

"P-E HYSTERESIS LOOP TRACER"



ร.พ.
พ 281พ
2538

นางสาวพรศรี ตั้งพัฒนากิจเจริญ

นางสาวสุศรีดา ลวางกูร

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

642551259

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P-E HYSTERESIS LOOP TRACER



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

P-E Hysteresis Loop Tracer

โดย

นางสาวพรศรี ตั้งพัฒนกิจเจริญ

นางสาวสุศรिका ลวางกูร

ภาควิชา

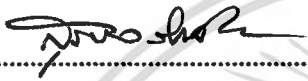
ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต ศรีโชติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย


ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....
(รองศาสตราจารย์ สุรพล รักvijit)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ



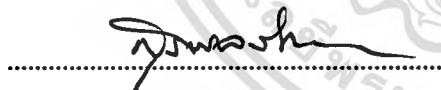
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต ศรีโชติ)

ประธานกรรมการ



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย)

กรรมการ



.....
(รองศาสตราจารย์ สุรพล รักvijit)

กรรมการ

.....
(อาจารย์ ภารุจ บัณฑิตอาราวิทย์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	P-E Hysteresis Loop Tracer
โดย	นางสาวพรศรี ตั้งพัฒนากิจเจริญ นางสาวสุทธิดา ลวางกูร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต ศรีโชติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2538

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของวงจร " Sawyer - Tower " กล่าวคือ เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาริเซชัน กระแสจะถูกเหนี่ยวนำขึ้นในเนื้อสาร และเมื่อทำการอินทิเกรตค่ากระแสดังกล่าวจะได้ค่าประจุไฟฟ้าที่แปรผันโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น เครื่องมือวัดนี้ประกอบไปด้วย 1) ภาคนำเนิตรูปสัญญาณอนาลอกที่สามารถควบคุมได้ (Analog Programming Generator) 2) ภาคนำจ่ายแรงดันกระแสตรงสูง 3) ภาคนำแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น ในที่นี้ใช้ Electrometer เป็นตัวอินทิเกรตกระแสเหนี่ยวนำให้อยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงประจุ และ 4) ภาคนำบันทึกและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้ากับค่าการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น ภาคนำเนิตรูปสัญญาณอนาลอกที่สามารถควบคุมได้จะสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมป้อนให้กับภาคนำจ่ายแรงดันสูง เพื่อให้ได้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ค่าแรงดันสูงมากขึ้น สัญญาณนี้จะถูกนำเข้าสู่แกน X ของส่วนแสดงผล ส่วนแกน Y จะเป็นสัญญาณของประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นที่ได้จาก Electrometer เมื่อนำเครื่องมือวัดที่ได้จากโครงการพิเศษนี้ไปทดสอบสารตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริก 2 ชนิด คือ แผ่น PZT (อูลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์) และแบเรียมทิตาเนต โดยจ่ายแรงดันในช่วง 50 - 200 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้จึงแสดงออกมาในรูปของ Minor Hysteresis Loop ที่มีลักษณะแตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title P-E Hysteresis Loop Tracer

Name Miss Pornri Tangpattanakitcharoen
Miss Sudtida Lavangkul

Special Project Adviser Assist. Prof. Wichit Sirichote
Assist. Prof. Dr. Aree Wichienchai

Department Applied Physics

Academic Year 1995

Abstract

The purpose of this special project is to develop an instrument for measuring the characteristic of piezoelectric materials. The principle of the measurement is based on "Sawyer-Tower circuit". By applying external electric field to the piezoelectric specimen, the current is then induced in the sample and is integrated to be an electronic charge which in turn is proportional to the polarization. The instrument consists of 1) an analog programming generator, 2) a high voltage DC supply, 3) an electrometer and 4) an X-Y recorder. The analog programming generator provides triangular waveform output used to program the output voltage of the high voltage power supply. The electrometer is used to integrate the induced current and the output is then put the Y-axis as the amount of electronic charge induced in the specimen. Test has been done with a piezoelectric samples ; Barium titanate and PZT disc. By applying voltage across the electrode ranging from 50V to 200V. Results have shown the different of minor hysteresis loop for such sample.

กิติกรรมประกาศ

การสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีของโครงการพิเศษนี้ สืบเนื่องมาจากความอนุเคราะห์ของบริษัท และคณะบุคคลหลายฝ่ายหลายท่าน ทางผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัว ผู้ให้ความรักใคร่เอ็นดู และเป็นกำลังใจให้สามารถทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผศ. วิชิต ศิริโชติ และ ผศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้สร้างแรงจูงใจ ให้โอกาสตลอดจนคำแนะนำและเทคนิคต่าง ๆ ในการทำโครงการพิเศษนี้

สภาวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ผู้เอื้อเพื่อเอกสารและข้อมูลต่างๆ

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี บริษัท พรีเมียร์โกลเบลคคอร์เปอร์เรชั่น จำกัด

ผู้เอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ

ที่ ๆ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี บริษัท พรีเมียร์โกลเบลคคอร์เปอร์เรชั่น จำกัด

ผู้ให้คำแนะนำอันทรงคุณค่า, ความปลอดภัยในการเดินทางในระหว่างคำคืนอันแสนน่าสะพรึงกลัว คำปลอบใจและอาหารมื้ออร่อย

คุณสันติ หาญกล้า คุณศุภชัย มานะพิทักษ์พงศ์ และคุณเอกกมล นิลอาษา

เพื่อนผู้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน

อาจารย์ทุก ๆ ท่าน

ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชา

เพื่อน ๆ ทุกคน

ผู้เป็นกำลังใจ

และผู้เกี่ยวข้องทุก ๆ ท่านที่มีได้เอื้อนาม

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	2
1.2 ขอบเขตการทำงาน	2
1.3 วิธีการดำเนินงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการพิเศษ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีของสารเพียโซอิเล็กทริก , พื้นฐานในการวัด Hysteresis Loop และการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม	4
2.1 ทฤษฎีของสารเพียโซอิเล็กทริก	4
2.1.1 สารเซรามิกที่มีโครงสร้างเป็น perovskite	4
2.1.2 สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	7
2.1.3 พฤติกรรมของสารเพียโซอิเล็กทริก	8
2.1.4 แรงดันเพียโซอิเล็กทริก	9
2.1.5 การสั่นของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและระยะขจัดทางไฟฟ้า	10
2.2 คุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	12
2.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์และโหมดการสั่น	12
2.2.2 ค่าคงที่ความถี่	17
2.2.3 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d และ g	17
2.2.4 สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล	18
2.2.5 ค่าเชิงกล	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6	ค่ามอดูลัสของ Young	20
2.2.7	อัตราส่วนของ Poisson	20
2.2.8	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	20
2.2.9	สนามไฟฟ้าบังคับ	21
2.2.10	การ Aging	22
2.2.11	อุณหภูมิคูรี	23
2.3	ชนิด , รูปแบบ และการนำสารเฟอร์ไรต์ไปประยุกต์ใช้งาน	23
2.3.1	ชนิดของทรานสดิวเซอร์	23
2.3.2	รูปแบบของสารเฟอร์ไรต์เซรามิกที่นำมาใช้งาน	25
2.3.3	การประยุกต์ใช้งานสารเฟอร์ไรต์เซรามิก	27
2.4	ทฤษฎีพื้นฐานและวงจรเบื้องต้นในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเฟอร์ไรต์	28
2.4.1	หลักการพื้นฐานในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเฟอร์ไรต์	28
2.4.2	วงจรเบื้องต้นในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเฟอร์ไรต์	29
บทที่ 3	หลักการและการทำงานของเครื่องมือ P-E Hysteresis Loop Tracer	31
3.1	หลักการทำงานของเครื่องมือ P-E Hysteresis Loop Tracer	31
3.1.1	อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณนอกที่สามารถควบคุมได้	32
3.1.2	แหล่งกำเนิดแรงดันสูง	42
3.1.3	เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า (Electrometer)	46
3.1.4	ตัวบันทึกผล	47
3.1.5	สรุปหลักการทำงานของเครื่องมือ P-E Hysteresis Loop Tracer	48
3.2	ขั้นตอนในการดำเนินงาน	51
บทที่ 4	การวิเคราะห์ผล P-E Hysteresis Loop	54
4.1	ลักษณะของสารเฟอร์ไรต์ที่ใช้ทดสอบ	54
4.2	ผลการทดลองวัด P-E Hysteresis Loop	55
4.3	การวิเคราะห์ผลจาก P-E Hysteresis Loop	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

หน้า

5.1 สรุปผลการทดลอง

62

5.2 แนวทางการพัฒนา

62

63

ภาคผนวก

เอกสารอ้างอิง

ประวัติผู้จัดทำโครงการพิเศษ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 โครงสร้างของแบเรียมทิตานต	4
รูป 2.2 ทิศทางของ โดเมนที่เกิดขึ้นภายในสารแบเรียมทิตานตที่เป็นเซรามิก	6
รูป 2.3 Hysteresis Loop ของผลึกเดี่ยวและเซรามิก	7
รูป 2.4 ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันเมื่อได้รับแรงเค้น	7
รูป 2.5 ผลึกควอทซ์ เมื่อได้รับแรงเค้น	8
รูป 2.6 ปฏิกิริยาการ Poling	9
รูป 2.7 การเปลี่ยนแปลงของสารเพียโซอิเล็กทริกจากการป้อนแรงดัน	9
รูป 2.8 การเปลี่ยนแปลงของสารเพียโซอิเล็กทริกจากการป้อนแรง	10
รูป 2.9 การเรียงตัวของไดโพล	11
รูป 2.10 ลักษณะของ Hysteresis Loop และลักษณะของความเครียดกับสนามไฟฟ้า	11
รูป 2.11 วงจรสมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริก	14
รูป 2.12 ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีแรงดันคงที่	16
รูป 2.13 ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีกระแสคงที่	17
รูป 2.14 Hysteresis Loop ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	21
รูป 2.15 ลักษณะของอุณหภูมิของสารต่าง ๆ กับการ Aging	22
รูป 2.16 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Unimorph	25
รูป 2.17 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Bimorph	26
รูป 2.18 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Stack	26
รูป 2.19 ทรานสดิวเซอร์ที่มีลักษณะแบบ Sandwich	26
รูป 2.20 ลักษณะของแรงเค้นกับเวลา	28
รูป 2.21 วงจรพื้นฐานของ Sawyer-Tower	29
รูป 3.1 สัญญาณอนาลอกที่ใช้ควบคุมและสัญญาณที่ขยายจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูง	32
รูป 3.2 สัญญาณสนามไฟฟ้าที่ผ่านสารเพียโซอิเล็กทริก	32
รูป 3.3 ลักษณะขาสัญญาณของ LM 324	33
รูป 3.4 ลักษณะขาสัญญาณของ LF 356	34
รูป 3.5 ลักษณะขาสัญญาณของ MC 14020	34
รูป 3.6 รูปแสดงอุปกรณ์ Analog Programming Generator	35

	ช หน้า
รูป 3.7 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของอุปกรณ์ Analog Programming Generator	36
รูป 3.8 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม	37
รูป 3.9 ส่วนยก offset ของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม	37
รูป 3.10 ส่วนของวงจร AC to DC Converter	38
รูป 3.11 ส่วนยก offset และวงจรแบ่งแรงดัน	38
รูป 3.12 ส่วนยก offset	39
รูป 3.13 วงจรสลับขั้วแรงดันที่เป็นสวิทช์อัตโนมัติ	40
รูป 3.14 ส่วนวงจรรวมของอุปกรณ์ Analog Programming Generator	41
รูป 3.15 รูปเครื่องมือ Bertan High Voltage Power Supply	42
รูป 3.16 ตำแหน่งขาและหน้าที่ของแต่ละขาที่ใช้ในโหมด Remote Analog Programming	44
รูป 3.17 รูปสัญญาณสามเหลี่ยมจากตัวบั่นทึกผล	45
รูป 3.18 รูปเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า (Electrometer)	47
รูป 3.19 รูปตัวบั่นทึกผล	48
รูป 3.20 ไดอะแกรมแสดงวิธีการวัด P-E Hysteresis Loop	49
รูป 3.21 วงจรแสดงวิธีการวัด P-E Hysteresis Loop	50
รูป 4.1 ลักษณะของอูลตราโซนิทราทรานสดิวเซอร์	54
รูป 4.2 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Unimorph	55
รูป 4.3 P-E Hysteresis Loop ของอูลตราโซนิทราทรานสดิวเซอร์ (PZT)	57
รูป 4.4 P-E Hysteresis Loop ของแบเรียมทิตานต	58

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1 โหมคการสันกับค่าคงที่สารเพียโซอิเล็กทริก

13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันในวงการอุตสาหกรรม ได้นำเอาวัสดุชนิดต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย สารเพียโซอิเล็กทริกก็เป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากกลุ่มผู้ผลิต และนักวิทยาศาสตร์ที่ทำการค้นคว้าและวิจัยเป็นอย่างมาก เพราะเหตุที่ว่าสารเพียโซอิเล็กทริกนี้จากคุณสมบัติสามารถนำไปเป็นทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณระหว่างไฟฟ้าและทางกล หรือที่เรียกว่า Electromechanical Transducer ซึ่งในสารเพียโซอิเล็กทริก จะแสดงคุณสมบัติ 2 ประการคือ

1. **ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) :** ผลึกจะสร้างสนามไฟฟ้าขึ้นเมื่อได้รับการกดหรือสั่นด้วยแรงกล เช่น หัวจุดเตาแก๊ส เป็นต้น

2. **ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับ (Reverse Piezoelectric Effect) :** ผลึกจะเกิดการกดหรือสั่นขึ้นเมื่อมันได้รับสนามไฟฟ้า เช่น หัวสั่นคลื่นอัลตราโซนิคสำหรับล้างงาน

แต่สารเพียโซอิเล็กทริก แต่ละชนิดจะให้สมบัติที่แตกต่างกัน ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน จึงแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมือในการที่จะวัดคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม และพัฒนาคุณภาพของสารเพียโซอิเล็กทริก โครงการพิเศษ ที่ชื่อ " P-E Hysteresis Loop " นี้จึงเกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะเป็นอุปกรณ์ ช่วยในการตรวจสอบคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก โดยการวัด P-E Hysteresis Loop ที่เกิดขึ้นจากการป้อนสนามไฟฟ้าให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องแล้วทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของประจุซึ่งสัมพันธ์กับการโพลาริเซชัน โดยที่อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ จะทำหน้าที่ป้อนสัญญาณเข้าไป ควบคุมการทำงานของ High Voltage Generator ให้มีแรงดันเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณควบคุม เพื่อที่จะป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก แล้วทำการตรวจวัด Hysteresis Loop ที่ได้จากสารเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัว ซึ่ง Loop ที่วัดได้นี้จะสามารถนำไปใช้คำนวณเพื่อหาสมบัติของสารแต่ละตัว เพื่อเป็นประโยชน์ในการเลือกสารเพียโซอิเล็กทริกให้เหมาะสมกับงาน และเพื่อเป็นช่องทางในการแก้ไขปัญหา และลดต้นทุนในการผลิตเครื่องมือให้มีราคาต่ำลง

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริก และรายละเอียดของส่วนประกอบ P-E Hysteresis Loop Tracer และ กระบวนการในการวัด Loop
2. สร้างอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กำหนดลักษณะของสัญญาณแรงดัน ซึ่งเรียกอุปกรณ์นี้ว่า " Analog Programming Generator " เพื่อที่จะไปควบคุมสัญญาณแรงดันที่ออกจาก High Voltage Generator ให้เป็นไปตามสัญญาณที่ป้อนเข้าไป เพื่อที่จะนำไปป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก แล้วทำการวัด Hysteresis Loop ของสาร
3. ศึกษาคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก ชนิดต่าง ๆ จาก Hysteresis Loop ที่วัดได้ แล้วจากคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกที่วัดได้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ

1.2 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก
2. ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องมือวัด P-E Hysteresis Loop
3. สร้างอุปกรณ์ในการวัด P-E Hysteresis Loop
4. นำสารเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัวมาวัด Hysteresis Loop และทำการเก็บข้อมูลของแต่ละตัว เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเหล่านั้น

1.3 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลในทางทฤษฎีเกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริก
2. ศึกษาถึงหลักการและวิธีการที่จะวัด Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริก รวมทั้งศึกษาการทำงานของเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัด เช่น Electrometer , High Voltage Generator และ Recorder เป็นต้น
3. วาดเป็น Block Diagram พร้อมทั้งแสดงถึงหลักการทำงานของเครื่องมือ
4. ออกแบบวงจรที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณแรงดัน โดยแยกพิจารณาทีละส่วน
5. ทำการต่อ และ ทดสอบวงจรทีละส่วน (ถ้าวงจรไม่ทำงานตามที่ต้องการให้ทำการออกแบบวงจรส่วนนั้น ๆ ใหม่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำแต่ละส่วนของวงจรมาต่อรวมกันตาม Block Diagram
7. ทำการวัด P-E Hysteresis Loop ของสารเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิด โดยทำการสังเกตผลที่ตัว Recorder
8. วิเคราะห์ผลจากการคำนวณค่าต่าง ๆ จาก Hysteresis Loop ที่ได้
9. สรุปผลการดำเนินงาน , ปัญหาที่เกิดขึ้น และ ส่วนที่ต้องปรับปรุงแก้ไขต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการพิเศษ

จากที่กล่าวมาแล้ว ปัจจุบันได้มีการนำสารเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ โดยเราสามารถสรุปขอบข่ายในการนำสารเพียโซอิเล็กทริกไปใช้งานได้ดังนี้

1. เป็นแหล่งกำเนิดกำลังทางกล (เป็นตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นแรงกล) เช่น
 - Piezoelectric Actuators
 - Piezoelectric Fans
 - Ultrasonic Cleaner , etc.
2. เป็นตัวตรวจวัด (เป็นตัวแปลงแรงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า) เช่น
 - Ultrasonic Sensors
 - Knocking Sensors
 - Shock Sensors
 - Acceleration Sensors , etc.
3. เป็นส่วนประกอบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ตัวแปลงสัญญาณ) เช่น
 - Ceramic Filters
 - Ceramic Resonators
 - Surface Acoustic
 - Wave Filters
 - Microforks , etc.

สำหรับประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการพิเศษนี้ คือ สามารถนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ช่วยในการ ทดสอบเพื่อที่วัด Hysteresis Loop ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก แต่ละตัว เพื่อที่จะช่วยในการค้นคว้าและวิจัย ในการที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้นและเหมาะสมกับงานด้านต่าง ๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีของสารเพียโซอิเล็กทริก , พื้นฐานในการวัด Hysteresis Loop และการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

2.1 ทฤษฎีของสารเพียโซอิเล็กทริก

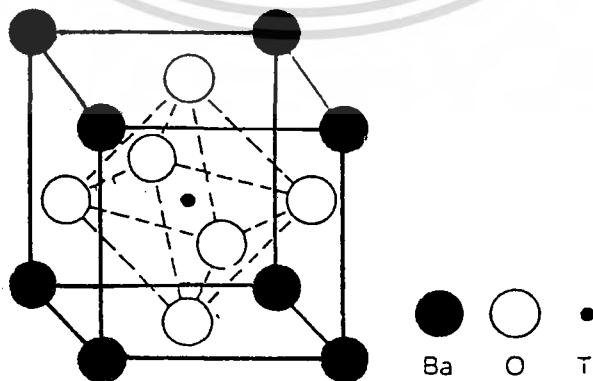
สารไดอิเล็กทริกเป็นสารที่แสดงสมบัติความเป็นฉนวน สามารถแบ่งออกได้เป็น

1. สารเฟอร์โรอิเล็กทริก < Ferroelectric >
2. สารไพโรอิเล็กทริก < Pyroelectric >
3. สารเพียโซอิเล็กทริก < Piezoelectric >
4. สารอิเล็กโตรสตรักชัน < Electrostriction >
5. สารอิเล็กโตร-ออปติก < Electro - Optic >
6. ตัวเก็บประจุ < Capacitor >

ในโครงการพิเศษนี้จะมุ่งเน้นศึกษาถึงสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก โดยสารที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกนี้มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น สารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบ Perovskite , เกลือ Rochelle และผลึกควอทซ์ เป็นต้น

2.1.1 สารเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบ Perovskite < Perovskite - Base Ceramic >

โครงสร้าง Perovskite เป็นโครงสร้างของผลึกเซรามิกที่ให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่น่าสนใจหลายประการ อาจกล่าวได้ว่า เป็นสารที่แสดงคุณสมบัติจาก Super Dielectric จนถึง Super Conductor



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ BaTiO₃

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบ ' Perovskite ' ได้แก่ CaTiO_3 โดยโครงสร้างของผลึกที่เป็นรูปลูกบาศก์อย่างง่ายจะสร้างขึ้นมาจาก Oxygen Octahedra ที่มี อีออน Ti^{4+} อยู่ที่ศูนย์กลาง Octahedra เหล่านี้จะอยู่ตรงกลางบนมุมของลูกบาศก์ที่มี อีออน Ca^{2+} อยู่ที่ศูนย์กลางลูกบาศก์

แบเรียมทิตาเนต (BaTiO_3) เป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเหมือนกับ CaTiO_3 ซึ่งก็คือการมีโครงสร้างแบบ ' Perovskite ' ดังแสดงในรูปที่ 2.1

BaTiO_3 คือ ต้นแบบของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก ใช้แสดงลักษณะของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งจัดว่าเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่งเช่นกัน

2.1.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบ Perovskite

- Spontaneous Polarization และผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริก

ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติหรืออุณหภูมิคูรี อีออนของทิตาเนียม Ti^{4+} จะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงจุดศูนย์กลาง < Off-Center Position > และไม่สัมพันธ์กับประจุลบใน Unit Cell เรียกได้ว่า Unit Cell แสดงลักษณะมีขั้ว มีไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (Electric Dipole Moment) หรือเกิดสภาพโพลาริซชันเอง (Spontaneously Polarized) นั่นคือมีไดโพลโมเมนต์จะเกิดขึ้นแล้วในสภาวะที่ยังไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า (สารไดอิเล็กทริกส่วนใหญ่ เช่น อะลูมินา , ซิลิกา , แก้ว , โพลีเมอร์ จะเกิดไดโพลโมเมนต์เมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้า) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิวิกฤติ พลังงานความร้อน ($\sim kT$) จะเพียงพอที่จะทำลายการเชื่อมโยงระหว่าง Unit Cell สารนั้นจะมีสภาพกลับกลายเป็นไม่มีขั้ว ในสภาวะนี้สารจะเป็นพาราอิเล็กทริก (Paraelectric)

คุณสมบัติที่สำคัญของแบเรียมทิตาเนต คือ สามารถเกิดโพลาริซชันเองที่อุณหภูมิห้อง และทิศทางของโมเมนต์ของขั้ว (Polar Moment) สามารถเปลี่ยนแปลงได้หากสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าความเข้มสูงพอ สิ่งนี้เป็นลักษณะสำคัญของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก กล่าวคือสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นสารที่เกิดโพลาริซชันเองได้ และทิศของการโพลาริซชันสามารถเปลี่ยนแปลงได้หากป้อนสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงพอ

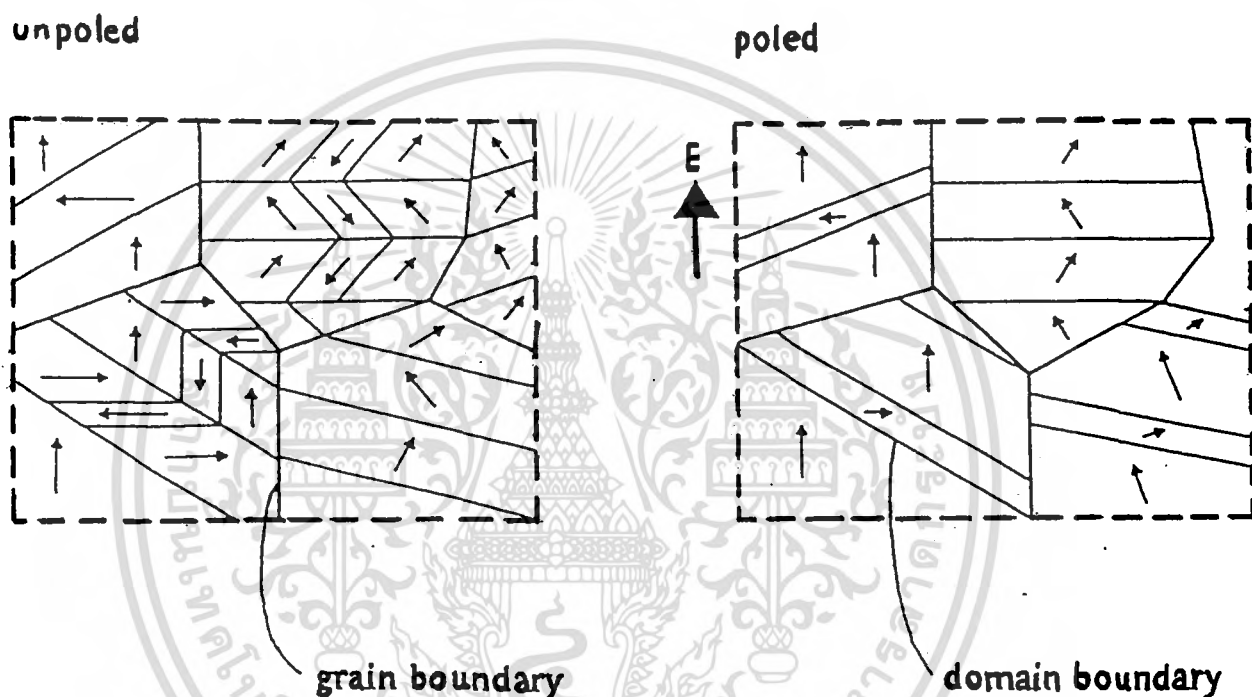
2.1.1.2 สารแบเรียมทิตาเนตที่เป็นเซรามิก และโดเมนของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

(Barium Titanate Ceramic and Ferroelectric Domains)

วิธีที่นิยมในการนำสารแบเรียมทิตาเนตมาทำให้อยู่ในรูปสารเซรามิก คือ การนำผงแบเรียมทิตาเนตมาขึ้นรูปในลักษณะแผ่นกลมบาง จากนั้นเผาจนสารเป็นของแข็งที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมิที่ใช้เผา ($\sim 1300^\circ\text{C}$) สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ ($\sim 130^\circ\text{C}$) ของสารแบเรียมทิตาเนต ดังนั้นเซรามิก จึงอยู่ในสภาวะพาราอิเล็กทริก (ไม่มีขั้ว) เมื่อเซรามิกเย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติจะมีขั้ว เกิดขึ้นการโพลาริซชันที่เกิดขึ้นเองนี้อาจเกิดจากความเครียดเชิงกลที่มีค่า $\sim 1\%$ (สิ่งนี้อาจจะดู

ไม่มาก แต่มีค่าถึงประมาณ 10 เท่าของความเครียดที่ทำให้เซรามิกเกิดการหัก) หากพิจารณาเซรามิกเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

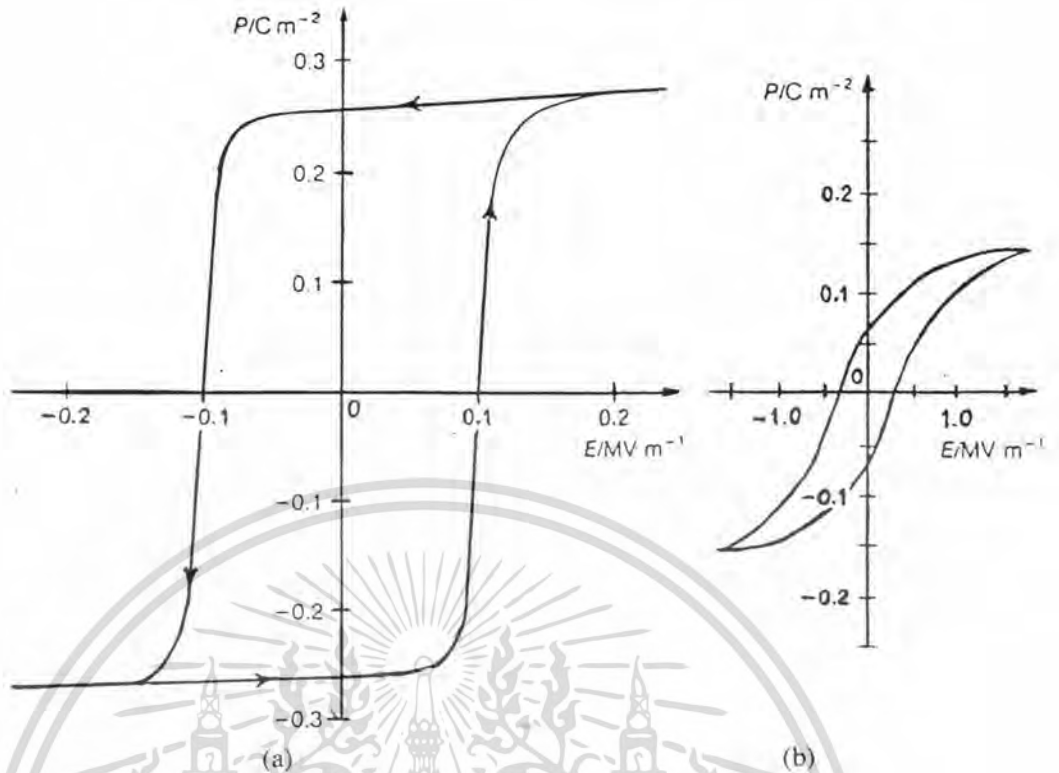
มิกที่อุณหภูมิสูง ในลักษณะของผลึกเดี่ยว (Single Crystal) การประกอบกันของผลึกทั้งหมดจะจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่ผลึกพยายามที่จะดึงในทิศของผลึกโดยเฉพาะแต่ละตัวของมัน แต่เพราะการบังคับโดยผลึกรอบข้าง ความดันค่ามาก ๆ จะเกิดขึ้น และ สิ่งเหล่านี้เป็นเหตุให้ผลึกเกิดจุดบกพร่องแบบ Twin อย่างกว้างขวาง แต่ละบริเวณที่เป็น Twin จะเกิดโพลาริซอย่างยูนิฟอร์ม แต่ทิศทางของการโพลาริเซชันอยู่ในแนว 180° และ 90° ซึ่งสัมพันธ์กัน ผลของการโพลาริซ ของแต่ละผลึกจะทำให้ไม่มีขั้ว จึงส่งผลให้เซรามิกทั้งหมดไม่มีขั้ว บริเวณ Twin จะอยู่เทอม Ferroelectric Domain โครงสร้างของโดเมนถูกแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ทิศทางของโดเมนที่เกิดขึ้นภายในสาร BaTiO_3 ที่เป็นเซรามิก

2.1.1.3 Ferroelectric Hysteresis

Hysteresis Loop เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก ในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าไม่เพียงแต่เซรามิกเท่านั้น (ที่สภาวะเริ่มต้นไม่มีขั้ว) ที่ถูกทำให้มีขั้วได้ โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง ($\sim 1 \text{ MVm}^{-1}$) หลังจากนำสนามไฟฟ้าออก พบว่าสารยังคงอยู่ในสภาวะที่มีขั้ว นั่นคือ สามารถทำให้สารเซรามิกมีขั้ว (และไม่มีขั้ว) ได้โดยผ่านการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไป จากหลักการดังกล่าวนี้นำไปสู่การประยุกต์งานใช้ที่สำคัญ



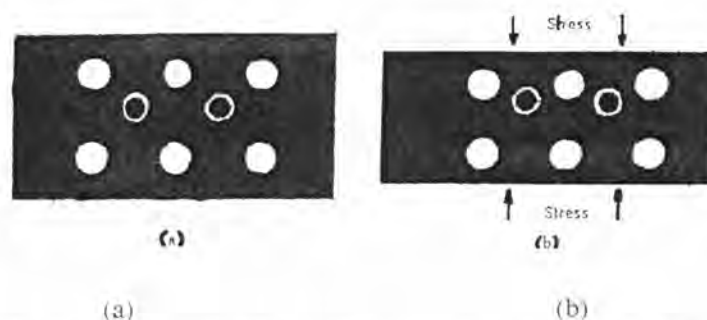
รูปที่ 2.3 แสดง Hysteresis Loop ในกรณี (a) โดเมนเดี่ยวของผลึกแบเรียมทิตาเนตที่อยู่ในลักษณะของผลึกเดี่ยว (b) แบเรียมทิตาเนตที่อยู่ในลักษณะของเซรามิก

2.1.2 สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric Ceramic) ^[5]

คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกค้นพบครั้งแรกโดย Pierre และ Jacques Curie ในช่วงทศวรรษ 1880 โดย

◆ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) เกิดจากการที่ผลึกสร้างศักย์ไฟฟ้าขึ้น เมื่อได้รับการสั่นเชิงกล

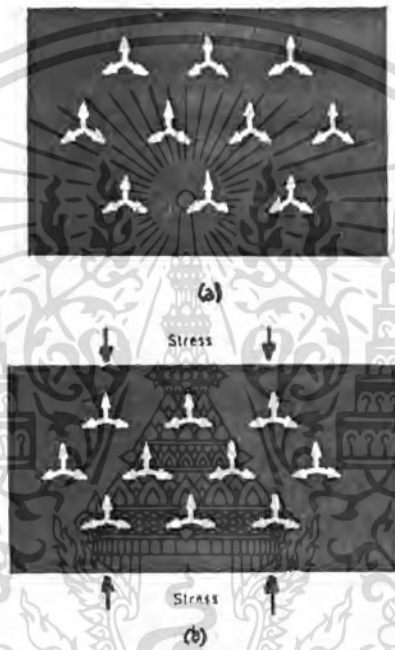
◆ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับ (Reverse Piezoelectric Effect) เกิดจากการที่ผลึกเกิดการสั่น เมื่อได้รับการป้อนสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 ผลึกเพียโซอิเล็กทริกที่มีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันเมื่อได้รับแรงกดดัน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในผลึกบางชนิด (รวมถึง polycrystal ด้วย) เช่น สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะแสดงทั้งปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก และ เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับ สารเหล่านี้มักถูกใช้เป็นทรานสดิวเซอร์แปลงสัญญาณไฟฟ้า-กล (Electromechanical Transducer)

เกลือ Rochelle และควอทซ์ เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกแบบผลึกเดี่ยว (Single - Crystal Piezoelectric Substances) ที่รู้จักกันมานานแล้ว โครงสร้างของควอทซ์แสดงดังรูปที่ 2.5 แต่เนื่องจากสารเหล่านี้มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ คือ ความไม่เสถียรของผลึกของเกลือ Rochelle และลักษณะองศาความอิสระ (Degree Of Freedom) ของควอทซ์



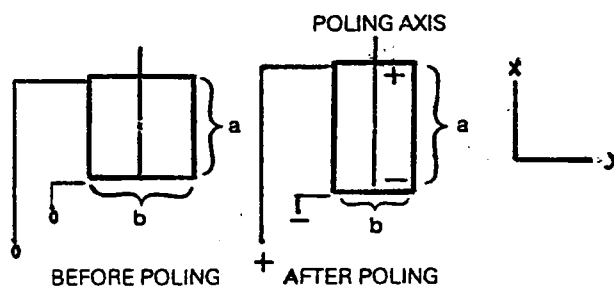
รูปที่ 2.5 แสดง โครงสร้างของผลึกควอทซ์ เมื่อ

- (a) ผลึกเมื่อไม่ได้รับแรงกด แกนทั้งสามจะสมมาตรกัน โดยถูกครแสดงถึงไดโพลโมเมนต์ที่มีผลรวมศูนย์
- (b) ผลึกเมื่อได้รับแรงกดทำให้เกิดโพลาไรเซชันในทิศทางใด ๆ ผลรวมของไดโพลโมเมนต์ไม่เท่ากับศูนย์

2.1.3 พฤติกรรมของสารเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Action)

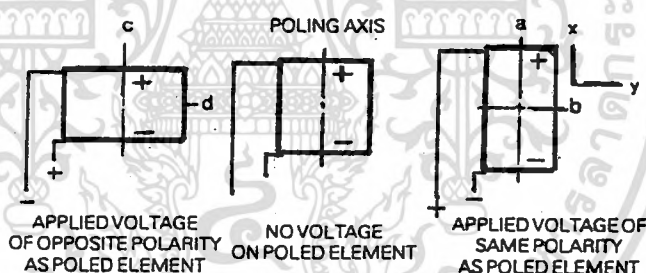
กระบวนการในการเกิดขั้วของสารเพียโซอิเล็กทริก จะทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด ทิศทางระหว่างขั้วที่ใช้ในการให้สนามไฟฟ้ากำลังสูงขณะขึ้นรูป (Poling) พิจารณาตามแนวแกน X) ในรูปที่ 2.6 แกนที่อยู่ระหว่างขั้วในการขึ้นรูป เรียกว่า แกนการ Poling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ปราบการ Poling

หลังจากที่กระบวนการเกิดขั้ว (Poling Process) เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว แรงดันที่ใช้ งานควรจะอยู่ต่ำกว่าแรงดันการ Poling เท่านั้นจึงจะไม่เปลี่ยนขนาดของสารเซรามิกหลังจากใช้งาน และการตอบสนองทางกลเป็นไปตามสัญญาณทางไฟฟ้าที่ให้ หากแรงดันที่ป้อนมีขั้วตรงกับแรงดันในการ Poling จะทำให้สารขยายขนาดตามแนวแกนการ Poling (X) และหดสั้นลงในทิศที่ตั้งฉากกับแกนการ Poling (Y) ในทางกลับกัน แรงดันที่มีขั้วตรงข้ามกับแรงดันในการ Poling จะทำให้สารมีการหดสั้นลงตามแนวแกนการ Poling (X) และขยายในทิศที่ตั้งฉากกับแกนการ Poling (Y) ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้ สารเซรามิกจะกลับไปสู่ทิศทางการ Poling เดิมหากนำแรงดันออกจากขั้ว ลักษณะดังกล่าวนี้แสดงดังรูปที่ 2.7

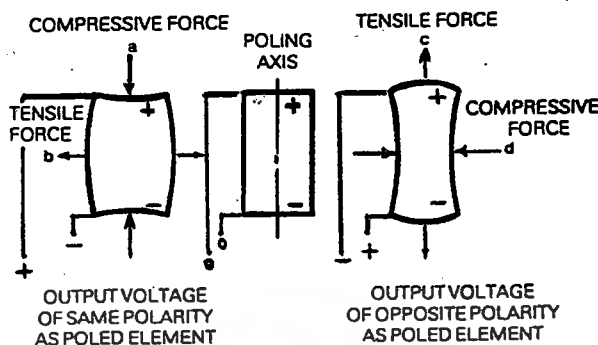


รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงทางกลของสารเพียโซอิเล็กทริกขณะป้อนแรงดัน

2.1.4 แรงดันเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Voltage)

หลังจากกระบวนการ Poling เสร็จสมบูรณ์ แรงกดและแรงดึงที่ป้อนให้กับสารเซรามิกจะทำให้สารเกิดแรงดันหรือความต่างศักย์ขึ้น ดังรูปที่ 2.8 แรงดันที่มีขั้วเดียวกันกับแรงดันในการ Poling เป็นผลมาจาก (a) แรงกดที่ป้อนขนานกับแกนการ Poling หรือ (b) แรงดึงที่ป้อนเข้าไปตั้งฉากกับแกนการ Poling และแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามจะเป็นผลมาจาก (c) แรงดึงป้อนขนานกับแกนการ Poling หรือ (d) แรงกดที่ป้อนเข้าไปตั้งฉากกับแกนการ Poling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของสารเพียโซอิเล็กทริกจากการป้อนแรง

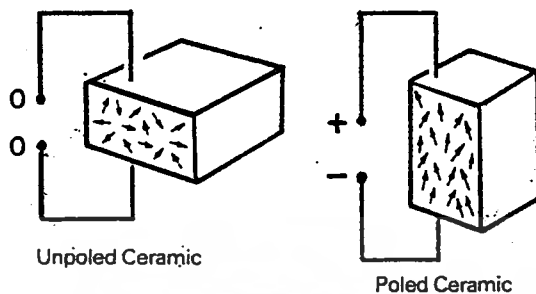
2.1.5 การสั่นของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและระยะขจัด (Piezoelectric Ceramic Vibrations and Displacements)

สาร Non-centrosymmetric คือสารที่มีโครงสร้างไม่สมมาตรที่จุดกึ่งกลาง ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าสุทธิภายใน Unit Cell ขึ้น เราเรียกบริเวณที่ไดโพลเรียงตัวในทิศทางเดียวกันนี้ว่า โดเมน ผลึกเดี่ยวที่มีโครงสร้างแบบนี้จะมีคุณสมบัติเป็น Anisotropic คือคุณสมบัติของสารจะแตกต่างกันไปตามทิศทางของการวัด ความเป็นเพียโซอิเล็กทริกก็เป็นลักษณะ Anisotropic อย่างหนึ่ง

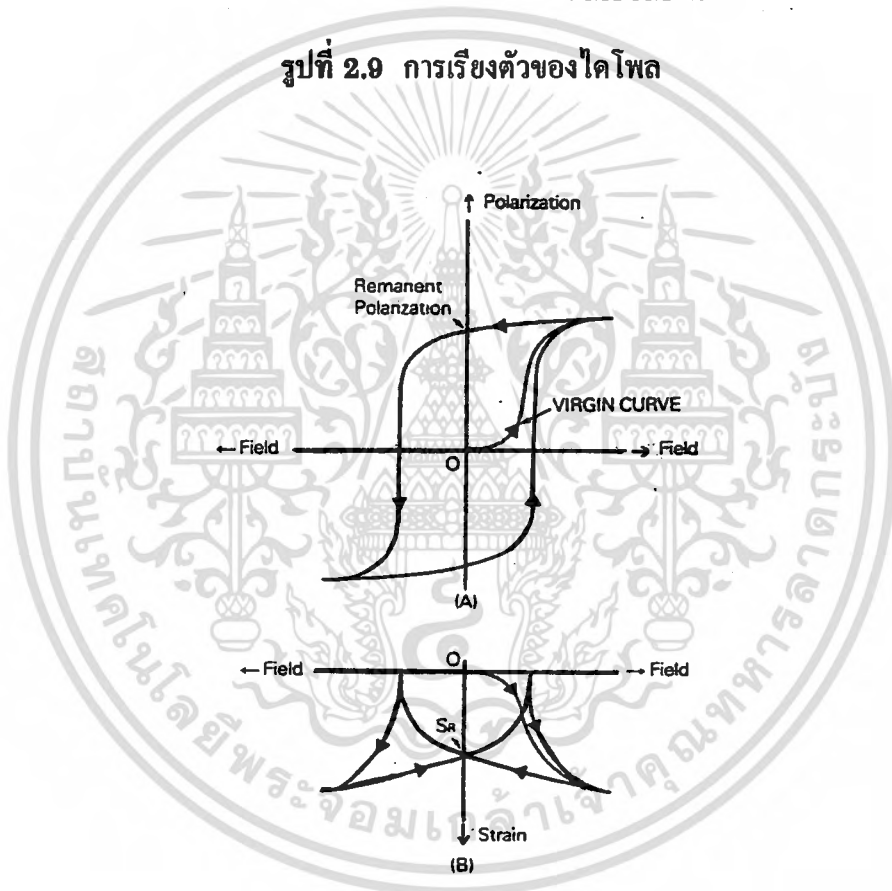
สำหรับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก Unit Cell จะไม่สมมาตรตรงจุดกึ่งกลางภายใต้อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง และจะสมมาตรตรงจุดกึ่งกลางเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหนืออุณหภูมินั้น อุณหภูมิดังกล่าวนี้ เรียกว่า "อุณหภูมิวิกฤตหรืออุณหภูมิคูรี (Curie Temperature)" กล่าวคือที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี สารเหล่านี้จะมีโครงสร้างสมมาตรตรงจุดกึ่งกลาง และไม่มีลักษณะของเพียโซอิเล็กทริก แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี สารเซรามิกเหล่านี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบไม่สมมาตรตรงจุดกึ่งกลาง หรือแสดงลักษณะเพียโซอิเล็กทริกออกมา

ภายในเซรามิกจะประกอบไปด้วย ผลึกหรือขอบเขตที่มีการเรียงทิศทางไม่เป็นระเบียบ โดยผลึกหรือขอบเขตนี้จะมีโดเมนเพียงหนึ่งหรือหลายโดเมนก็ได้ สารที่มีการเรียงทิศทางอย่างไม่เป็นระเบียบจะมีคุณสมบัติ Isotropic และไม่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จากการที่ป้อนขั้วไฟฟ้าและสนามไฟฟ้ากระแสตรงค่าสูง ๆ ไดโพลจะเคลื่อนตัวไปเพื่อให้ทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า สารจึงเกิดการโพลาริเซชันแบบถาวรขึ้น ดังรูปที่ 2.9 มีโดเมนจำนวนไม่มากที่สามารถเรียงไดโพลได้เหมือนกับในผลึกเดี่ยว แต่ก็เพียงพอที่จะทำให้สารนั้นกลายเป็นสารเพียโซ-

อีเล็กทริก หลังจากการ Poling สารจะยังคงมีโพลาริเซชันเหลืออยู่ (P_r) และยังคงมีความเค้นเหลืออยู่ (S_r) ดังแสดงในรูป 2.10 (A) และ (B)



รูปที่ 2.9 การเรียงตัวของไดโพล



รูปที่ 2.10 (A) แสดงลักษณะของ Hysteresis Loop , (B) ลักษณะของความเครียดกับสนามไฟฟ้า

เซรามิกที่ทำการ Poling แล้วจะได้รับความเค้น แลททิซของผลึกหรือขอบเขตที่ได้รับ ความเครียดเป็นเหตุให้มีบางโดเมนเพิ่มขึ้น คือมีการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ทั้งหมดของสาร ภายในช่วงความเค้นที่แน่นอนใด ๆ การเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์จะทำให้สมบัติความเป็นเพียโซอีเล็กทริกสูงขึ้น จึงสามารถนำไปใช้งานได้จริงเพราะการตอบสนองของสารเกือบจะเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Characteristics of Piezoelectric Ceramics)

ในการนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไปใช้งาน สิ่งสำคัญคือจะต้องมีความรู้เพียงพอเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกต่าง ๆ ก่อนจึงจะสามารถเลือกชนิดของสารที่เหมาะสมสำหรับงานด้านต่าง ๆ ได้ หัวข้อที่กล่าวต่อกว่าต่อไปนี้จะอธิบายคุณสมบัติที่สำคัญของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย

2.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์ และโหมดการสั่น (Resonant Frequency and Vibration Mode)^[6]

หากป้อนสัญญาณแรงดันที่ความถี่แปรค่าได้ให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีรูปร่างแน่นอน (ทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้า) พบว่ามีความถี่ที่แน่นอนค่าหนึ่งที่ทำให้เซรามิกเกิดการสั่นอย่างมาก ความถี่นี้เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) จะมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ (เรโซแนนซ์) ในการสั่นแบบยืดหยุ่นจำเพาะของเซรามิก โดยความถี่จำเพาะนี้เป็นฟังก์ชันกับรูปร่างของสาร

สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก มีโหมดการสั่นที่แตกต่างกัน (โหมดเรโซแนนซ์) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของสาร ทิศทางการโพลาไรเซชันและทิศทางการเรียงตัวของสนามไฟฟ้า แต่ละโหมดการสั่นให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์และคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกต่างกัน ตารางที่ 2.1 แสดงโหมดการสั่นทั่วไปที่สัมพันธ์กับรูปร่างของเซรามิก ความถี่เรโซแนนซ์ในแต่ละโหมดการสั่นและสัญลักษณ์ค่าคงที่ของสาร

ในตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ค่าคงที่ของสารเพียโซอิเล็กทริก มีความหมายดังนี้

N : ค่าคงที่ความถี่ (Frequency Constant) อธิบายในหัวข้อที่ 2.2.2

d : ค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Strain Constant) อธิบายในหัวข้อ 2.2.3

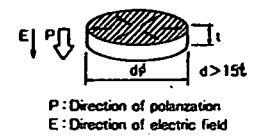
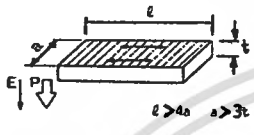
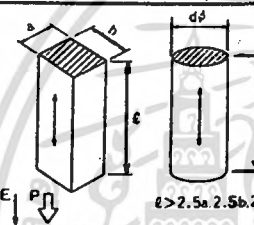
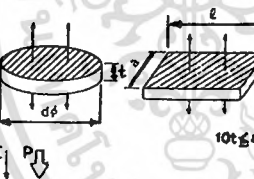
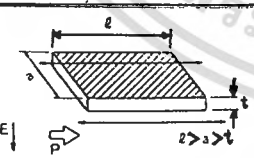
g : ค่าคงที่แรงดันเอาต์พุต (Voltage Output Constant) อธิบายในหัวข้อ 2.2.4

k : สัมประสิทธิ์คู่ควมทางไฟฟ้า-กล (Electromechanical Coupling Coefficient) อธิบายในหัวข้อ 2.2.4

Y^E : ค่ามอดูลัสของ Young (Young's modulus) อธิบายในหัวข้อ 2.2.6

ϵ^T : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) อธิบายในหัวข้อ 2.2.9

ตารางที่ 2.1 โหมดการสั่นและค่าคงที่ของสารเพียโซอิเล็กทริก

Vibration Mode	Shape/Vibration Mode	Resonant Frequency (fr)	Material Constant Symbol					
			k	d	g	Y^E	ϵ^T	N
Radial Mode	 <p>Thin disk with radial vibration mode. Polarization is oriented along the thickness of the disk.</p>	$\frac{N_1}{d}$	K_r	d_{31}	g_{31}	Y_{11}^E	ϵ_{33}^T	N_1
Length Mode	 <p>Thin rectangular plate, with the direction of vibration orthogonal to the polarization axis and with a single point of resonance.</p>	$\frac{N_2}{l}$	K_{31}	d_{31}	g_{31}	Y_{11}^E	ϵ_{33}^T	N_2
Longitudinal Mode	 <p>Square and cylindrical columns. Vibration is oriented along the direction of polarization. Only a single point of resonance.</p>	$\frac{N_3}{l}$	K_{33}	d_{33}	g_{33}	Y_{33}^E	ϵ_{33}^T	N_3
Thickness Mode	 <p>Disk and rectangular plates which are thin compared to their surface areas. They have multiple points of resonance in longitudinal vibration mode.</p>	$\frac{N_4}{t}$	K_t	d_{33}	g_{33}	Y_{33}^E	ϵ_{33}^T	N_4
Shear Mode	 <p>Disk or rectangular plates, with the electric field orthogonal to the direction of polarization, causing a shear vibration along the surface.</p>	$\frac{N_5}{t}$	K_{15}	d_{15}	g_{15}	Y_{44}^E	ϵ_{11}^T	N_5

เมื่อสารเพียโซอิเล็กทริกได้รับความเค้น T จะเกิดโวลตาไรเซชัน P ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความเค้นนั้น $T : P = dT$ (เมื่อ d คือ ค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก) ลักษณะเช่นนี้ก็คือ "ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก" ในทางตรงข้ามเมื่อสารเพียโซอิเล็กทริกได้รับสนามไฟฟ้าจากขั้ว จะเกิดความเครียด S ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับสนามไฟฟ้า $E : S = dE$ ซึ่งก็คือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับ" นั่นเอง สำหรับสารที่มีความยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ของความเครียด S กับความเค้นถูกกำหนดโดย $S = s^E T$ (s^E คือ Compliance); สำหรับสารไดอิเล็กทริกความสัมพันธ์ของระยะจัดทางไฟฟ้า D กับสนามไฟฟ้า E ถูกกำหนดโดย $D = \epsilon E$ สำหรับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกความสัมพันธ์เหล่านี้จะถูกกำหนดโดยสมการข้างล่างนี้ ทั้งสองสมการจะสัมพันธ์กับค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก ดังนี้

$$\begin{aligned} S_i &= s_{ij}^E T_j + d_{im} E_m \\ D_n &= d_{nj} T_j + \epsilon_{nm}^T E_m \end{aligned} \quad \dots(2.1)$$

เมื่อ $m, n = 1, 2, 3$; $i, j = 1, 2, \dots, 6$

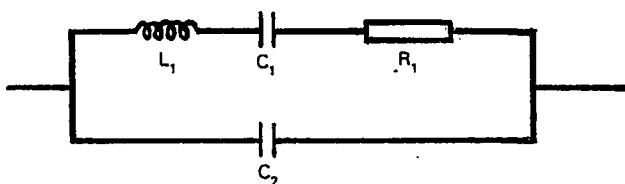
สมการเหล่านี้ เป็นสมการพื้นฐานของสารเพียโซอิเล็กทริก เมื่อสนามไฟฟ้า E และระยะจัดทางไฟฟ้า D แสดงขนาดของเวกเตอร์ ขณะที่ความเค้น T และความเครียด S คือขนาดแรงดึงที่สมมาตร เมื่อพิจารณาสมมาตรของผลึก สมการที่ 2.1 จะถูกลดรูปให้ง่ายขึ้น เนื่องจากค่าคงที่บางตัวในสมการจะถูกตัดทิ้ง และ ค่าคงที่ตัวอื่นบางตัวจะทำกับค่าคงที่ในชุดที่ 3

สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีแกนการโพลาไรซ์ ตามแนวแกน Z (3) และให้อีก 2 แกนที่ตั้งฉากกับแกน Z เป็น แกน X (1) และ Y (2) โครงสร้างผลึกของเซรามิกสามารถถูกแทนได้ในลักษณะเช่นเดียวกับกับผลึก (6 mm.) ในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นศูนย์ และไม่ขึ้นกับค่าใด ๆ คือค่าคงที่ 10 ตัวดังนี้

$$S_{11}^E \left(\frac{1}{Y_{11}^E} \right), S_{12}^E \left(\frac{1}{Y_{12}^E} \right), S_{13}^E \left(\frac{1}{Y_{13}^E} \right), S_{33}^E \left(\frac{1}{Y_{33}^E} \right), S_{44}^E \left(\frac{1}{Y_{44}^E} \right), d_{31}, d_{33}, d_{15}, \epsilon_{11}^T, \epsilon_{33}^T$$

ตัวอย่างสมการเพียโซอิเล็กทริกพื้นฐาน สำหรับการสั้นตามยาวของเซรามิกแผ่นสี่เหลี่ยมจะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{11}^T T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 &= d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{aligned} \quad \dots(2.2)$$



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานสดิวเซอร์ที่ทำจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก สามารถแทนโดยวงจรสมมูลซึ่งได้จาก สมการเพียโซอิเล็กทริกพื้นฐานที่แทนโหมคการสั้น วงจรนี้เรียกว่า วงจรสมมูลของ Maison โดยทั่วไปวงจรสมมูลที่ใช้แทนสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก แสดงดังรูปที่ 2.11 ในวงจรสมมูลนี้ ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม f_s , และความถี่เรโซแนนซ์ขนาน f_p จะกำหนดโดยสมการ

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \cdot \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad \dots(2.3)$$



ค่าคงที่ f_s และ f_p เป็นค่าที่จำเป็นในการหาค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า - กล (k)

ความถี่เรโซแนนซ์ สามารถ นิยามได้ใน 3 วิธี คือ

- (1) ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม f_s ของวงจรถออนุกรมสมมูลสำหรับทรานสดิวเซอร์ที่ทำจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก
- (2) ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำลง f_r คือการลดลงของความถี่ทั้งสอง เมื่อค่า Admittance ที่คร่อมขั้ว หรืออิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์ที่สร้างจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกอยู่ในเฟสที่เป็นศูนย์ (Null Phase)
- (3.) ความถี่ Admittance สูงสุด f_m เมื่อค่า Admittance ที่คร่อมโหลคของทรานสดิวเซอร์ที่สร้างจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีค่ามากที่สุด (ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด)

แต่อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างความถี่ทั้ง 3 ตัว f_s , f_r และ f_m จะน้อยมากจนละทิ้งได้ ในกรณีที่แท้จริงเมื่อเราวัดความถี่ f_m มันอาจเรียกได้เป็นความถี่เรโซแนนซ์ f_r ในทำนองเดียวกันความถี่ Admittance ต่ำสุด f_n อาจเรียกได้ว่าเป็นความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (Antiresonant Frequency) f_a

ความถี่เรโซแนนซ์ f_r สามารถที่จะวัดได้จากวงจร ต่อไปนี้

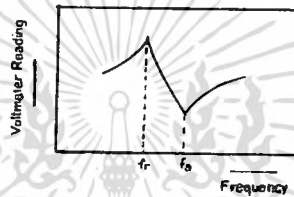
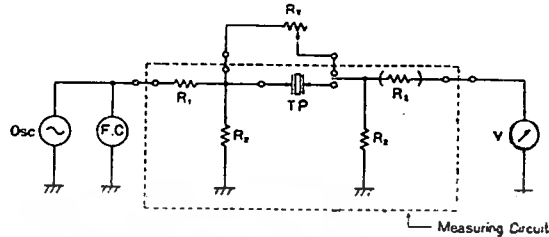
- (a) วิธีการวัดโดยใช้วงจรแรงดันคงที่

ในรูป 2.12 ตัวกำเนิดความถี่ Oscillator และตัวต้านทานอินพุท R_1 และ R_2 นำมาใช้เพื่อที่จะป้อนสัญญาณแรงดันคงที่ให้กับทรานสดิวเซอร์ที่ทำจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก กระแสที่ไหลผ่านทรานสดิวเซอร์จะถูกวัดคร่อมตัวต้านทาน R_2

ถ้าอิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์สูงกว่า R_2 มาก ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์จะแปรผันกับค่า Admittance ของทรานสดิวเซอร์ ความถี่ที่โวลต์มิเตอร์อ่านได้ที่ค่าสูงสุด คือ ความถี่

เรโซแนนซ์ f_r และความถี่ที่อ่านได้ต่ำสุดก็คือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ f_a

ตัวต้านทานปรับค่าได้ R_v จะใช้ในการหาค่าความต้านทานเรโซแนนซ์ R_r ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ในการคำนวณหาค่าเชิงกล (Mechanical) Q_m



รูปที่ 2.12 ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีแรงดันคงที่

เมื่อ

Osc : ตัวออสซิลเลเตอร์

FC : ตัวนับความถี่

R_v : ตัวต้านทานปรับค่าได้

TP : ตัวทรานสดิวเซอร์

V : โวลต์มิเตอร์

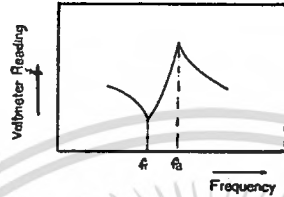
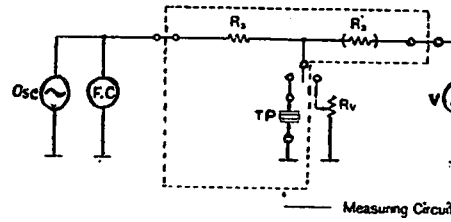
R_1 : ตัวต้านทานอ้างอิง 100 Ω

R_2 : ตัวต้านทานอ้างอิง 10 Ω

(b) วิธีการวัดโดยการใช่วงจรกระแสคงที่

ถ้าวงจรวัด f_r ใช้แหล่งกำเนิดกระแสคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ตัวต้านทาน R_3 จะควบคุมกระแสที่ไหลผ่านทรานสดิวเซอร์ที่ทำจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ถ้า R_3 สูงกว่าอิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์มาก ค่าที่โวลต์มิเตอร์อ่านได้จะแปรผันตรงกับอิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์ ความถี่เมื่อค่าที่อ่านได้น้อยที่สุด คือ ความถี่เรโซแนนซ์ f_r และความถี่เมื่อค่าที่อ่านได้สูงสุดคือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ f_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Osc : Oscillator
 F.C. : Frequency Counter
 Rv : Variable Resistor
 T.P. : Transducer
 V : Voltmeter
 R₂ : 100kΩ (Reference Value)
 R₃ in the output circuit may be omitted.

รูปที่ 2.13 ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีกระแสคงที่

2.2.2 ค่าคงที่ความถี่ (Frequency Constant : N)

ความเร็วของเสียงซึ่งแพร่กระจายผ่านสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก จะเป็นค่าเฉพาะสำหรับแต่ละโหนดการสั่น เมื่อเรโซแนนซ์ของโหนดการสั่นอื่น ๆ มีค่าแตกต่างกันไป สำหรับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีรูปร่างแน่นอน ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น λ ของการสั่นกับความยาวในการแพร่ l ที่จุดเรโซแนนซ์จะเป็นไปตามสมการ 2.4 เนื่องจากความเร็วของเสียงเป็นค่าคงที่ ทำให้ได้สมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6

$$\frac{\lambda}{2} = l \quad \dots(2.4)$$

$$v = f_r \cdot \lambda \quad \dots(2.5)$$

$$f_r \cdot l = \frac{v}{2} = N \quad \dots(2.6)$$

เมื่อ N คือ ค่าคงที่ความถี่ ค่า N ขึ้นอยู่กับโหนดการสั่น ความถี่เรโซแนนซ์อาจหาได้จากสมการ $f_r = \frac{N}{l}$ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.2.3 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d และ g

(a) ค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก d

ค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก คือ ความเครียดซึ่งเป็นผลจากการป้อนสนามไฟฟ้าความเข้มสม่ำเสมอที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้น กำหนดโดยสมการ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d = k \sqrt{\frac{\epsilon^T}{Y^E}} \quad (m/V) \quad \dots(2.7)$$

เมื่อ ϵ^T = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

Y^E = ค่ามอดูลัสของ Young (N / m²)

k = สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{Y_{11}^E}} \quad d_{33} = k_{33} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{Y_{33}^E}} \quad d_{15} = k_{15} \sqrt{\frac{\epsilon_{11}^T}{Y_{44}^E}} \quad \dots(2.8)$$

(b) ค่าคงที่แรงดันเออร์ทพุท g

ค่าคงที่แรงดันเออร์ทพุท เกี่ยวข้องกับความเข้มของสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นผลจากการบิดความเค้นสม่ำเสมอ ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีระยะขจัดทางไฟฟ้า กำหนดโดยสมการ

$$g = \frac{d}{\epsilon^T} \quad (V.m / N) \quad \dots(2.9)$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33}^T}, \quad g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T}, \quad g_{15} = \frac{d_{15}}{\epsilon_{11}^T} \quad \dots(2.10)$$

ค่าคงที่ d และ g ขึ้นอยู่กับโหมดการสั่น และ ค่าคงที่ในแต่ละโหมดการสั่นจะกำหนดจากสัญลักษณ์ที่แสดงในตารางที่ 2.1

ระยะขจัดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดันไฟฟ้า หรือ แรงดันที่เกิดขึ้นภายใต้แรงที่ป้อนให้ สามารถกำหนดโดยค่าคงที่ d และ g ตัวอย่างเช่นระยะขจัด Δl เกิดจากการป้อนแรงดัน V เข้าไปคร่อมขั้วในโหมดการสั่นตามยาว มีค่า

$$\Delta l = d_{31} \cdot \frac{\ell}{t} V \quad \dots(2.11)$$

ในทางกลับกัน แรงดัน V ที่เกิดจากการป้อนแรง F เข้าไปตามทิศทางของการสั่น มีค่า

$$V = g_{31} \cdot \frac{1}{a} \cdot F \quad \dots(2.12)$$

เมื่อ ℓ คือ ความยาวของสารตัวอย่าง

t คือ ความหนาของสารตัวอย่าง

a คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง

2.2.4 สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล (Electromechanical Coupling Coefficient : k)⁽⁶⁾

สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล คือ ค่าคงที่ซึ่งแทนประสิทธิภาพของสารเพียโซอิเล็กทริก เซรามิก โดยเฉพาะการแทนประสิทธิภาพของการเปลี่ยนกลับของพลังงานไฟฟ้า (ป้อนคร่อมขั้วของสารเซรามิก) เป็นพลังงานกล ถูกนิยามว่าเป็นค่า Root Mean Square ของพลังงานที่สะสมภายในผลึกในรูปของพลังงานกล โดยพลังงานสะสมนี้เป็นผลมาจากไฟฟ้าทั้งหมดที่ป้อนเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \sqrt{\frac{\text{Accumulated Mechanical Energy}}{\text{Supplied Electrical Energy}}}$$

ค่า k ขึ้นอยู่กับโหมดการสั่น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สามารถหาค่าได้จากสมการที่ใช้ความถี่ เรโซแนนซ์ f_r ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีแรงดันคงที่ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ f_a และ ความแตกต่างของทั้งสอง $\Delta f = f_a - f_r$

(a) การสั่นแนวรัศมีของทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแผ่นกลมบาง

$$k_r^2 \approx 2.529 \frac{\Delta f}{f_r} \quad \dots(2.13)$$

(b) การสั่นตามความยาวของทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมบาง

$$\frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r}\right) \quad \dots(2.14)$$

(c) การสั่นตามยาวของทรานสดิวเซอร์แบบทรงกระบอก

$$k_{33}^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right) \quad \dots(2.15)$$

(d) การสั่นตามความหนาของทรานสดิวเซอร์แบบแผ่นกลมบาง

$$k_t^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right) \quad \dots(2.16)$$

(e) การสั่นแบบเฉือนของทรานสดิวเซอร์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมบาง

$$k_{15}^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right) \quad \dots(2.17)$$

2.2.5 ค่าเชิงกล (Mechanical : Q_m)

ค่าเชิงกล Q_m ให้ค่าความชันของเรโซแนนซ์ของการสั่นเชิงกลรอบความถี่เรโซแนนซ์ มีค่าเป็นดังสมการ

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi f_r R_1 C_f \left[1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2\right]} \quad \dots(2.18)$$

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานเรโซแนนซ์

C_f คือ ค่าความจุอิสระที่คร่อมขั้วทั้ง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 ค่ามอดูลัสของ Young (Young 's Modulus : Y^E)

เมื่อความเค้น (T) ถูกป้อนให้กับวัตถุยืดหยุ่นภายในช่วงที่ยืดหยุ่นเป็นเชิงเส้น ความเครียด (S) มีค่าตามสูตร

$$S = s^E T$$

s^E คือ ค่าคงที่ความยืดหยุ่น (Compliance) และ ค่ามอดูลัสของ Young จะเป็นส่วนกลับของ Compliance นี้ สำหรับการสันตามความยาวในตารางที่ 2.1 ค่ามอดูลัสของ Young จะถูกกำหนดโดยสมการ

$$Y_{11}^E = (2\ell f_r)^2 \cdot \rho = v^2 \cdot \rho \quad (N / m^2) \quad \dots(2.19)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (kg / m^2)

v คือ ความเร็วเสียง (m / s)

2.2.7 อัตราส่วนของ Poisson (Poisson 's Ratio : δ^E)

เมื่อป้อนความเค้นคงที่ T เข้าไปในวัตถุยืดหยุ่น ภายในช่วงการยืดหยุ่นเป็นเชิงเส้น อัตราส่วนของ Poisson นิยามว่าเป็น

$$\delta^E = \frac{\text{Distortion Rate Orthogonal to Stress}}{\text{Distortion Rate along Stress}}$$

หรืออาจกล่าวได้ว่า อัตราส่วนของ Poisson คือ อัตราการบิดเบี้ยวไปของวัตถุที่ตั้งฉากกับความเค้นต่อ อัตราการบิดเบี้ยวไปของวัตถุที่ขนานกับแรงเค้น

2.2.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant : \mathcal{E}^T)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก คือ ระยะขจัดทางไฟฟ้าเป็นผลจากการป้อนสนามไฟฟ้าหนึ่งหน่วย โดยการป้อนนี้ไม่มีความเค้นเกิดขึ้น มีค่าเป็นไปตามสมการ

$$D = \mathcal{E}^T E \quad \dots(2.20)$$

เมื่อ D คือ ระยะขจัดทางไฟฟ้า

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

\mathcal{E}^T คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

อัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก \mathcal{E}^T กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสุญญากาศ \mathcal{E}_0 ($= 8.854 \times 10^{-12}$ F/m) เรียกว่า "ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์" ในกรณีของโหมคการสันตามความยาวที่แสดงในตารางที่ 2.1 ถ้าความถี่ของสรีที่คร่อมขั้วที่ 1 kHz เท่ากับ C_f ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ สำหรับสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับโพลาริเซชัน จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\mathcal{E}_{33}^T}{\mathcal{E}_0} = \frac{C_f t}{l \cdot a \cdot \mathcal{E}_0} \quad \dots(2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

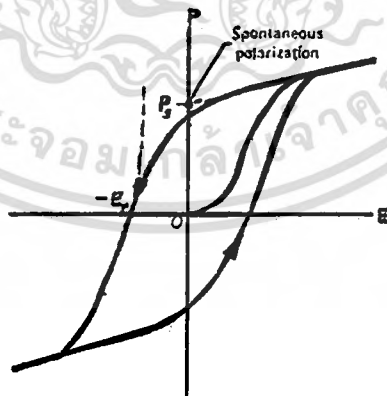
กรณีการสั้นตามความหนา ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สำหรับสนามที่ตั้งฉากกับทิศทางการโพลาไรซ์ จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\epsilon_{11}^T}{\epsilon_0} = \frac{C_f t}{l \cdot a \cdot \epsilon_0} \quad \dots(2.22)$$

- เมื่อ l คือ ความยาวของสารตัวอย่าง
 t คือ ความหนาของสารตัวอย่าง
 a คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง

2.2.9 สนามไฟฟ้าบังคับ (Coercive Field : E_C)

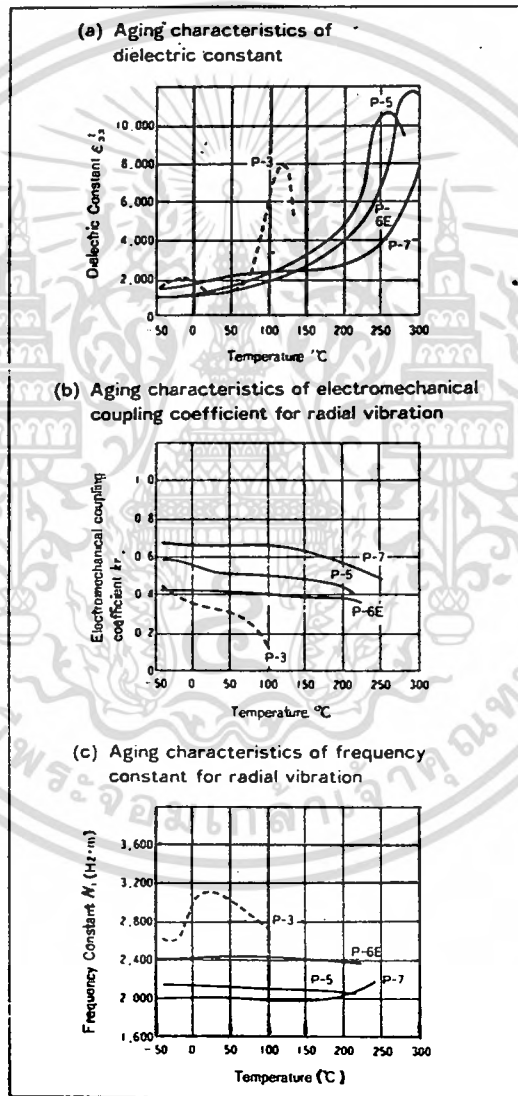
สารเฟอร์โรอิเล็กทริกมีโครงสร้างเป็นโดเมน ไดโพลโมเมนต์ในแต่ละโดเมนจะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน และเป็นเหตุให้เกิดการโพลาไรซ์ขึ้นเอง (Spontaneous Polarization) ความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าได้กับการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ทั้งหมด จะอยู่ในรูปของ "Hysteresis Loop" ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ครั้งแรกที่สารได้รับสนามไฟฟ้ามันจะยังไม่กลับไปสู่โครงสร้างของโดเมนในตอนเริ่มแรกเมื่อสนามไฟฟ้าถูกนำออกไปเป็นผลทำให้เกิดการโพลาไรเซชันคงค้างอยู่ P_r ในการทำให้ค่าโพลาไรซ์คงค้างอยู่ (P_r) นั้นหมดไปจะต้องป้อนสนามไฟฟ้าผันกลับ (ทิศทางตรงกันข้าม) ที่มีความเข้มคงที่ค่าหนึ่ง เข้าไปเพื่อใช้ในหักล้าง ค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้นี้ เรียกว่า สนามไฟฟ้าบังคับ : E_C



รูปที่ 2.14 Hysteresis Loop ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติส่วนมากของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะเปลี่ยนแปลงทีละน้อยกับเวลา หลังจากการ Poling การเปลี่ยนแปลงจะเป็นแบบลอการิทึม (Logarithmic) กับเวลา อัตราการ Aging ของคุณสมบัติต่าง ๆ ขึ้นกับส่วนประกอบของสารเซรามิกและวิธีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ในการ Aging ค่าที่แน่นอนของสมบัติต่าง ๆ เช่นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) การคัปปลิง และค่าคงที่ของสารเพียโซอิเล็กทริกจะมีค่าเฉพาะที่ค่าเวลามาตรฐานหลังจากการ Poling หากใช้เวลาลงจากการ Poling นานขึ้นสารจะมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของลักษณะของอุณหภูมิของสารต่าง ๆ



รูปที่ 2.15 ลักษณะอุณหภูมิของสารต่าง ๆ กับการ Aging

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.11 อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature)

อุณหภูมิคูรี คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์สูงสุดของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก สารเซรามิกแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิคูรีเฉพาะ เมื่อสารเซรามิกถูกทำให้ร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี สมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะหมดไปกลายเป็นสารพาราอิเล็กทริก (Paraelectric) ดังนั้นอุณหภูมิในการใช้งานจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี

2.3 ชนิด รูปแบบ และ การนำสารเพียโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้งาน

2.3.1 ชนิดของทรานสดิวเซอร์

มีการนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีหลายชนิดมาใช้ประโยชน์ แต่ละชนิดจะถูกทำให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ทำโดยการเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมีของเซรามิกเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเฉพาะด้าน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งสารเซรามิกออกได้เป็น 3 กลุ่ม

1. วัสดุแข็ง (Hard Material)
2. วัสดุอ่อน (Soft Material)
3. วัสดุที่สั่งทำขึ้นพิเศษ (Custom Material)

● วัสดุแข็งที่มีกำลังสูง (High Power " Hard " Material)

เซรามิกที่แข็งและมีกำลังสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวก Lead Zirconium Titanate จะสามารถทนต่อการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าหรือความเค้นได้สูง สารเหล่านี้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันกำลังสูงและทรานสดิวเซอร์

PZT - 4D (ชนิดที่ใช้ทางการทหารแบบ I)

วัสดุชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ทำเป็น Ultrasonic Cleaner ตัวทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิค และการประยุกต์ใช้การแพร่กระจายเสียงกำลังสูง PZT - 4D เลดเซอร์โคเรตทิตานเนตสามารถให้แอมพลิจูดในการขับเคลื่อนสูง และมีอัตราการสูญเสียพลังงานต่ำ

PZT - 8 (ชนิดที่ใช้ทางการทหารแบบ III)

วัสดุนี้ใช้ในงานกำลังสูง แม้ว่าระดับความสามารถจะต่ำกว่า PZT - 4D เพียงเล็กน้อย แต่คุณภาพเชิงกลสูง และมีแฟกเตอร์การสูญเสียต่ำ

- **วัสดุอ่อนที่มีความไวสูง (High Sensitivity " Soft " Materials)**

สารเซรามิกอ่อนจะมีความไวและค่า Permittivity สูง แต่ภายใต้สภาวะการขับสูงจะเกิดความร้อนขึ้นภายในสารในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน วัสดุเหล่านี้จะใช้เป็นตัวตรวจวัดต่าง ๆ เช่น ทรานสดิวเซอร์กำลังต่ำ และตัวรับสัญญาณ วัสดุประเภทนี้เช่น

PZT - 5A (ชนิดที่ใช้ในทางการทหารแบบ II)

วัสดุนี้จะใช้เป็นตัวรับสัญญาณหรือส่วนกำเนิดสัญญาณในไฮโดรโฟน ,ตัววัดความเร่ง, ตัวตรวจวัดการสั่น PZT - 5A คือ เลดเซอร์โคโรเนตทิตานเนตที่มีความไว ค่า Permittivity และ ความคงที่กับเวลาสูง

PZT - 5J (ชนิดที่ใช้ทางการทหาร แบบ V)

สารนี้ใช้ในพีวล์ , ไฮโดรโฟน และการประยุกต์ในด้านอื่น ๆ ที่ต้องการการรวมพลังงาน และแรงดันเอาท์พุทสูง PZT - 5J คือ เลดเซอร์โคโรเนตทิตานเนตที่มีค่า Permittivity และค่าคงที่แรงดันเพียโซอิเล็กทริกสูง

PZT - 5H (ชนิดที่ใช้ทางการทหาร แบบ VI)

สารนี้ใช้ในตัวรับสัญญาณที่ไว ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และงานด้านอื่น ๆ อย่างกว้างขวาง จากไฮโดรโฟนจนถึงเครื่องพิมพ์แบบใช้หมึกฉีด PZT-5H จะให้ค่า Permittivity ,ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมและค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกสูง มีอุณหภูมิคูร์ต่ำสุดในบรรดาวัสดุที่อ่อนทั้งหมด (หรือตระกูล PZT - 5) ซึ่งทำให้เกิดการจำกัดช่วงอุณหภูมิการใช้งาน และมีความเสถียรกับเวลาต่ำ

PZT - 5R

สารนี้จะใช้แทน PZT - 5A เมื่อต้องการความไวสูงเกินกว่า PZT - 5R มีความไวต่อเสียง, สัมประสิทธิ์คู่ควม และค่า Permittivity สูง

- **วัสดุที่สั่งทำขึ้นพิเศษ (Custom Material)**

วัสดุเซรามิกหลายชนิดถูกสร้างขึ้น เพื่อให้ได้สมบัติตรงตามต้องการกับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้าน เช่น

PZT - 7A

PZT - 7A คือ เลคเซอร์โคเรเนตทิตานเนตที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำ ค่า Permittivity ต่ำ และมีความคงที่กับอุณหภูมิสูง ลักษณะการ Aging ต่ำ (เสถียรกับเวลาสูง) จะให้การเพี้ยนไปของเฟสน้อยลงในวงจรเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้า

PT 2 - เลคทิตานเนต

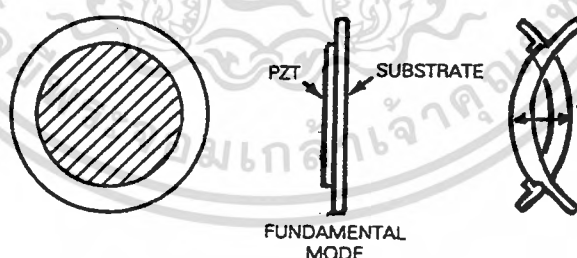
เลคทิตานเนตที่ทำขึ้นจะมีความไวสูงในแกนการ Poling (โหมด "33") และมีความไวต่ำในโหมด "31" สิ่งนี้ทำให้สารเหมาะที่จะถูกใช้งานในโหมด Hydrostatic การประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้าน และไฮโดรโฟน

2.3.2 รูปแบบของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่นำมาใช้งาน

สารเพียโซอิเล็กทริกที่ถูกนำมาใช้งานมักมีขนาดเล็ก ค่าที่ให้ได้สูงสุดของส่วนประกอบเพียง 1 ตัวจะอยู่ในระดับไมครอน ดังนั้นจึงต้องทำการขยายโดยการจัดเรียงสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในลักษณะต่าง ๆ เช่น Unimorph , Bimorph และ Stack

1. Unimorph

Unimorph จะทำขึ้นโดยการติดแผ่นบาง ๆ ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกับฐานรองที่ไม่ไว การจับสารเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทั้งหมด ลักษณะแบบ Unimorph นี้เหมาะสำหรับใช้สร้างเป็นไฮโดรโฟน ตัวตรวจวัด และ Actuator

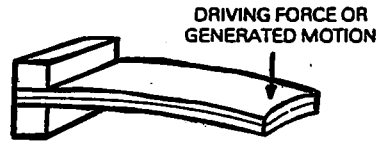


รูปที่ 2.16 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Unimorph

2. Bimorphs

Bimorph ทำขึ้นโดยติดสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเข้าด้วยกัน 2 ชั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในด้านความยาวของสารทั้ง 2 ชั้นสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างมาก ปกติจะอยู่ในช่วงที่เกินกว่า $10 \mu\text{m} / \text{V}$

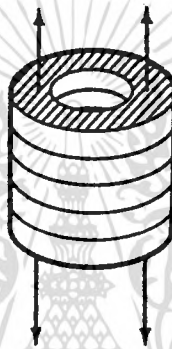
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Bimorph

3. Actuator Stacks

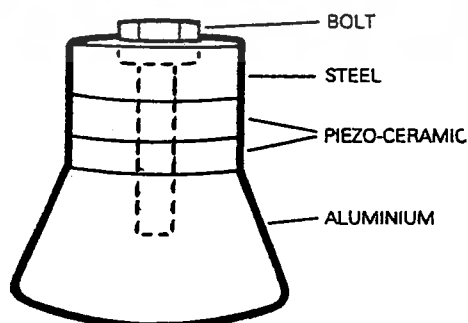
Stack เป็นการนำสารเพียโซอิเล็กทริกมาต่ออนุกรมในเชิงกล และขนานกัน ในเชิงไฟฟ้า กันหลาย ๆ ชั้น ระยะเวลาของทรานสดิวเซอร์แต่ละตัวรวมกันเท่ากับระยะเวลาทั้งหมด Stack โดยทั่วไป ต้องใช้ในงานที่ต้องการระยะที่ยาว (ปกติระหว่าง 5 และ 180 mm.)



รูปที่ 2.18 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Stack

4. Sandwich Transducers

เป็นการยากที่จะทำให้บล็อกเดี่ยวของเซรามิกเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 kHz การใช้งานตัวเรโซเนเตอร์แบบ Composite Half Wave จะใช้ประกอบกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก แบบ 2 วงแหวนหรือมากกว่าเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นโลหะ การจัดเรียงแบบนี้ทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่ต่ำได้



รูปที่ 2.19 ทรานสดิวเซอร์ที่มีลักษณะแบบ Sandwich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การประยุกต์ใช้งานสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

Murata^[6] เป็นผู้บุกเบิกนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมาใช้ในอุตสาหกรรม และเสนอช่วงการใช้งานของผลิตภัณฑ์ให้กว้างขวางขึ้น

การประยุกต์ใช้สารเพียโซอิเล็กทริก มักจะใช้สารเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบ polycrystal แทนสารเพียโซอิเล็กทริกทั่วไป เนื่องจากสารเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นเซรามิกเหล่านี้มีประโยชน์เหมาะสมในการใช้งานมากกว่า จากลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของสารแต่ละชนิดสามารถถูกนำมาแยกออกเพื่อใช้ในแต่ละงาน เซรามิกมีความแข็งแรง และทน และสามารถสร้างชิ้นได้ในเกือบทุกขนาดและทุกรูปร่างที่ต้องการ ไม่ไวต่อสารเคมี และสามารถป้องกันความชื้นและสภาพบรรยากาศต่าง ๆ ได้ดี

แบเรียมทิตาเนต ($BaTiO_3$) ที่เป็นสารเซรามิกที่นำมาใช้เป็น ultrasonic transducer และเมื่อไม่นานมานี้ได้เกิดสารใหม่ในกลุ่มของเลดทิตาเนต เลดเซอร์โคโรเนต (lead titanate, lead zirconate; $PbTiO_3 \cdot PbZrO_3$) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า-กล และมีเสถียรภาพ (รวมถึงลักษณะที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ) สูงกว่าสารอื่น ๆ ที่มีอยู่ การประยุกต์ใช้งานสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกนี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เมื่อเปรียบเทียบกับสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดอื่น ๆ

◆ ข้อดีของ $BaTiO_3$ และ $PbTiO_3 \cdot PbZrO_3$ คือ

1. มีประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณไฟฟ้า-กลสูง (High electromechanical transformation efficiency)
2. การมีความสามารถในการนำไปขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่าง ๆ ได้ดี (Machinability)
3. ช่วงกว้างของการใช้งาน สามารถกำหนดได้จากส่วนประกอบของสารที่แตกต่างกัน (มีค่า degree of freedom อยู่ในช่วงกว้าง จึงสามารถใช้งานได้หลากหลาย)
4. มีเสถียรภาพสูง
5. เหมาะสำหรับใช้เป็นสารในเชิงเศรษฐกิจ คือสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก

สรุปขอบข่ายของการนำไปประยุกต์ใช้งานสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

เนื่องจากการที่สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเป็นตัวแปลงพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล การนำไปใช้งาน จึงอยู่ใน 4 กรณีดังนี้ คือ

1. แหล่งกำเนิดพลังงานกล (ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นกล)
 - Piezoelectric Actuators
 - Piezoelectric Fans
 - Ultrasonic Cleaner และ อื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวตรวจวัด (ตัวแปลงสัญญาณกลเป็นไฟฟ้า)

- Ultrasonic Sensors
- Knocking Sensors
- Shock Sensors
- Accelerator Sensors และ อื่น ๆ

3. ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า (ตัวแปลงสัญญาณ)

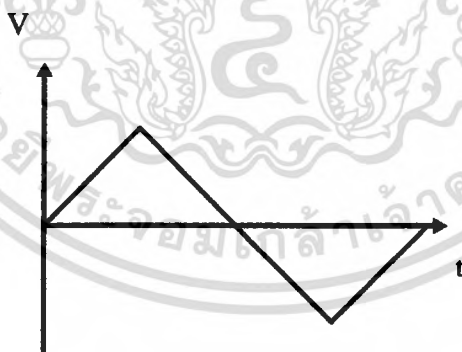
- Ceramic Filters
- Ceramic Resonators
- Surface Acoustic Wave Filters
- Microfork และ อื่น ๆ

4. ด้านอื่น ๆ

- Piezoelectric Buzzers
- Piezoelectric Transformer
- Piezoelectric Lighter และ อื่น ๆ

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานและวงจรเบื้องต้นในการวัด P-E Hysteresis Loop

2.4.1 หลักการพื้นฐานในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2.20 ลักษณะของแรงดัน (V) กับเวลา (t)

ในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริก ทำได้โดยการป้อนสนามไฟฟ้า ความเข้มสูง (E) ในรูปของสัญญาณแรงดันสูงที่ค่าแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงกับเวลา ลักษณะของรูปสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.20 เข้าไปในสารเพียโซอิเล็กทริก แล้วทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงการ

โพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า ในรูปของประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น ค่าประจุ Q นี้สัมพันธ์กับโพลาริเซชัน P ดังสมการ

$$P = \frac{Q}{A} \quad (C/m^2) \quad \dots(2.24)$$

นำการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชัน P ในรูปของสัญญาณประจุที่วัดได้พลอตกับ สนามไฟฟ้า E ที่อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดัน จะได้ลักษณะที่แสดงถึงสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก คือ การเกิด Hysteresis Loop ขึ้น

2.4.2 วงจรเบื้องต้นในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริก

วงจร Sawyer-Tower

V_y คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมแผ่นหักเห (Deflection Plate) ตามแนวตั้งของออสซิลโลสโคปมีค่าเป็น

$$V_y = \frac{1}{C} \int I . dt = \frac{1}{C} \int \frac{dQ_x}{dt} . dt = \frac{Q_x}{C} \quad \dots(2.25)$$

จากกฎของเกาส์ ในการหาค่าประจุอิสระ Q_x ของขั้วผลึก (ในหน่วย mks) เป็น

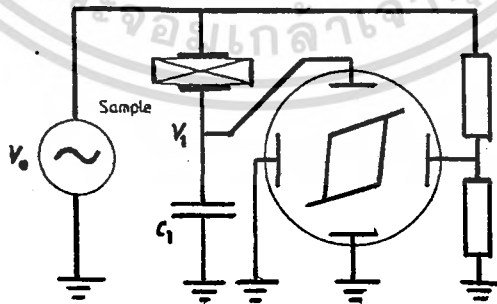
$$\begin{aligned} Q_x &= AD = A(\epsilon_0 E + P) \\ &= A(\epsilon_0 E + \chi \epsilon_0 E + P_f) = A(\epsilon \epsilon_0 E + P_f) \end{aligned} \quad \dots(2.26)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของขั้ว

χ คือ electric susceptibility

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

P_f คือ ส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของการโพลาริเซชัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกของสาร



รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐาน Sawyer-Tower

พิจารณาจากวงจรรูปที่ 2.21 หากเลือกให้ C มีค่ามากพอ จะทำให้แรงดันตกคร่อมผลึกจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่คร่อมแผ่นหักเหตามแนวนอน V_x ซึ่งจะได้

$$V_y = \frac{Q_x}{C} = (A/C)(\epsilon \epsilon_0 V_x/S + P_f) \quad \dots(2.27)$$

ในกรณีของสารที่มีค่าไดอิเล็กทริกเป็นเชิงเส้น P_f จะมีค่าเป็นศูนย์ จอแสดงภาพของออสซิลโลสโคปจะแสดงเส้นตรงที่ให้ค่าความชันแปรผันโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ และค่าความจุของสาร C_x ซึ่งจะได้

$$\frac{dV_y}{dV_x} = \epsilon \epsilon_0 A/CS = C_x/C \quad \dots(2.28)$$

ซึ่งจากวงจร Sawyer - Tower ทำให้เราสามารถนำหลักการนี้ไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์ Analog Programming Generator ในบทที่ 3 ต่อไปได้



บทที่ 3

หลักการและการทำงานของเครื่องมือ

3.1 หลักการทำงานของเครื่องมือ P-E Hysteresis Loop Tracer

จุดประสงค์ของโครงการพิเศษนี้ก็คือ การสร้างอุปกรณ์เพื่อกำเนิดสัญญาณแบบอนาล็อก < Analog Signal > ซึ่งเรียกว่า "Analog Programming Generator" เพื่อช่วยในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริกต่าง ๆ ที่เราพิจารณาโดยสัญญาณอนาล็อกที่สร้างขึ้นนี้จะใช้ในการควบคุมเครื่องมือที่เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันสูง < High Voltage Generator > เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูงซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามสัญญาณอนาล็อกที่ควบคุม แล้วนำไปป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันภายในสารและเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าประจุ (Q) เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกนั้นเปลี่ยนแปลงไป แล้วทำการวัดค่าประจุ (Q) จาก Electrometer เพื่อนำสัญญาณที่วัดได้จาก Electrometer และ สัญญาณจาก High Voltage Generator ไปเข้าที่ตัวบันทึกผลเพื่อทำการบันทึกในแกน Y และแกน X ตามลำดับ เพื่อที่จะทำให้เกิด P-E Hysteresis Loop ขึ้นมาจากสารเพียโซอิเล็กทริกที่เราต้องการทราบคุณสมบัติ

ในการพิจารณาหลักการการทำงานของเครื่องมือวัด P-E Hysteresis Loop จำเป็นต้องพิจารณาถึงหน้าที่และหลักการทำงานของแต่ละเครื่องมือ โดยเราสามารถแยกเครื่องมือหรืออุปกรณ์แต่ละส่วนออกเป็นดังนี้ คือ

1. อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณอนาล็อกที่สามารถควบคุมได้ < Analog Programming Generator > ซึ่งในโครงการพิเศษนี้จะทำการสร้างอุปกรณ์ในส่วนนี้ขึ้นเอง

2. แหล่งกำเนิดแรงดันสูง < High Voltage Generator >

3. เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า < Electrometer > ซึ่งในการวัด P-E Hysteresis Loop นี้จะวัดเป็นค่าประจุ (Q)

4. ตัวบันทึกผล < Recorder >

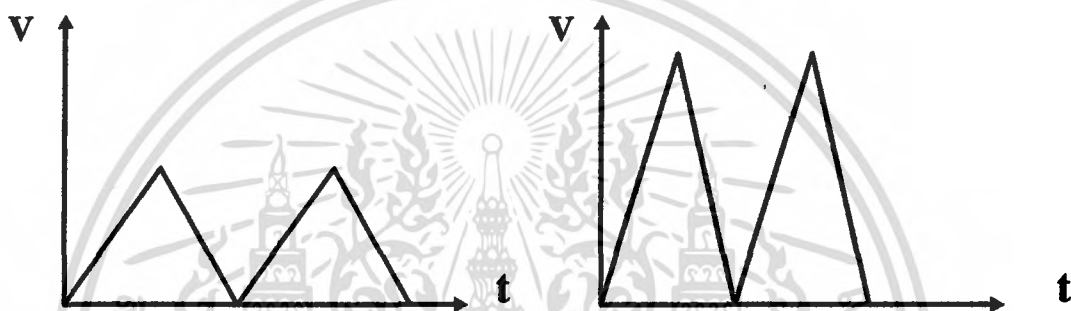
โดยสามารถแยกพิจารณาถึงหน้าที่ และหลักการทำงานของแต่ละเครื่องมือในหัวข้อต่อไป
ดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณอนาลอกที่สามารถควบคุมได้ < Analog -

Programming Generator >

หน้าที่

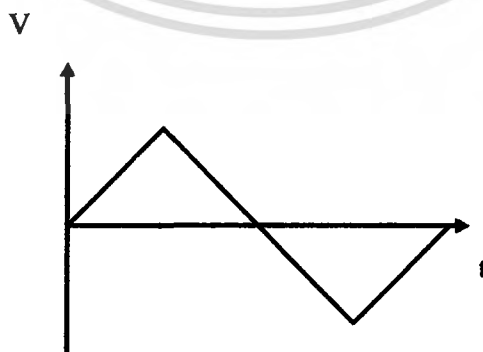
อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ใช้กำเนิดสัญญาณแรงดันเป็นรูปสามเหลี่ยมกับเวลาดังรูปที่ 3.1(a) โดยที่สามารถกำหนดคาบเวลาและขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณอนาลอกได้ ซึ่งจะนำไปควบคุมสัญญาณแรงดันที่ป้อนให้และออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูง < High Voltage Generator > เพื่อให้สัญญาณที่ออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูงนี้คือ สัญญาณขยายที่มีลักษณะของสัญญาณเป็นไปตามสัญญาณที่ควบคุม ดังรูปที่ 3.1(b)



รูปที่ 3.1 (a) สัญญาณอนาลอกที่ใช้ควบคุม

(b) สัญญาณอนาลอกซึ่งถูกขยายที่
ออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูง

แต่เนื่องจากขีดจำกัดของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ใช้ (คือสามารถกำเนิดแรงดันสูงที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกได้เท่านั้น) แต่สัญญาณที่จะใช้ทดสอบจำเป็นต้องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าด้านลบด้วย เนื่องจากต้องการแสดง P-E Hysteresis Loop ดังนั้นหน้าที่อีกประการหนึ่งของอุปกรณ์นี้ก็คือ เป็นวงจรสวิตช์โดยจะทำการสวิตช์เพื่อให้กระแสไหลผ่านสารเพียโซอิเล็กทริกได้ 2 ทิศทาง ดังนั้นสัญญาณอนาลอกที่ผ่านการขยายแล้วจะต้องผ่านอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ก่อนที่จะผ่านเข้าไปยังสารเพียโซอิเล็กทริก สัญญาณดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สัญญาณแรงดันอนาลอกที่ผ่านสารเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสามารถสรุปถึงหน้าที่ของอุปกรณ์ Analog Programming Generator ได้ดังนี้

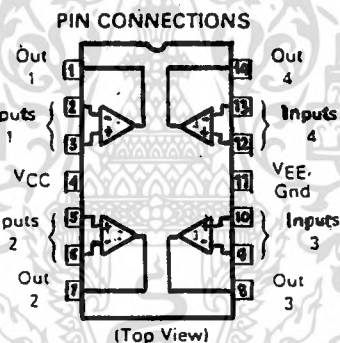
1. กำเนิดสัญญาณแรงดันรูปสามเหลี่ยมที่สามารถกำหนดคาบเวลา และแอมพลิจูดของสัญญาณได้ ซึ่งใช้ควบคุมสัญญาณแรงดันที่ออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูง
2. เป็นวงจรสวิทช์อัตโนมัติเพื่อให้กระแสไหลผ่านสารเพียโซอิเล็กทริก ได้ 2 ทิศทางหรือวงจรสลับขั้วอัตโนมัติ

หลักการทำงาน

ในการพิจารณาถึงหลักการทำงานของวงจรที่ทำหน้าที่จากที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะและคุณสมบัติในการนำไปใช้งานของไอซีที่ใช้ในวงจร Analog Programming Generator อย่างคร่าว ๆ ดังนี้ (ในส่วนรายละเอียดของการนำไปใช้งานของไอซีจะกล่าวในภาคผนวก)

1. **LM324** Quad Low Power Operational Amplifiers.

มีลักษณะดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะขาสัญญาณของ LM324

LM324 มีรายละเอียดดังนี้

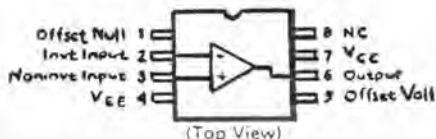
- ทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟตัวเดียวที่มีช่วงตั้งแต่ 3 - 32 V
- มี OPAMP 4 ตัวใน 1 Package
- มีช่วงการใช้งานกว้างสามารถใช้กับแหล่งจ่ายไฟที่เป็นลบได้
- มีกระแสอินพุทที่ใช้ในการไบอัสต่ำ : 100 nA (สูงสุดใน LM324A)
- มีสถานะอินพุทที่แตกต่างกัน

ในการใช้งาน LM324 โครงงานพิเศษนี้ จะทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟ ± 12 V สำหรับหน้าที่ของ LM324 ในวงจรต่าง ๆ จะกล่าวรายละเอียดในส่วนหลักการทำงานของวงจรต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **LF356** Monolithic JFET Input Operation Amplifiers.

มีลักษณะดังรูปที่ 3.4



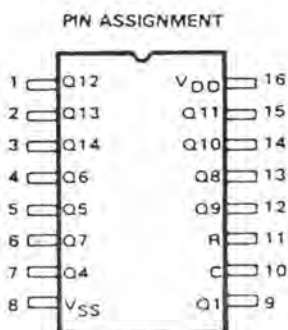
รูปที่ 3.4 ลักษณะขาสัญญาณของ LF356

LF356 มีรายละเอียดดังนี้

- มีกระแสอินพุทไบอัสต่ำ (30 pA)
- มีกระแสอินพุท Offset ต่ำ (3.0 pA)
- มีแรงดันอินพุท Offset ต่ำ (1.0 mV)
- การชดเชยอุณหภูมิของแรงดันอินพุท Offset (-3.0 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)
- กระแสอินพุทที่รบกวนต่ำ (0.01 pA / $\sqrt{\text{Hz}}$)
- อินพุทอิมพีแดนซ์สูง ($10^{12} \Omega$)
- มีอัตราส่วน CMRR สูง (100 dB)
- มีอัตราขยายแรงดันไฟตรงสูง (106 dB)
- แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ V_{CC} มีค่า + 18 V และ V_{EE} มีค่า -18 V
- ช่วงแรงดันอินพุท + 16 V

สำหรับในการใช้งาน LF356 ในโครงงานพิเศษนี้จะทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟ $\pm 12 \text{ V}$ ในส่วนของหน้าที่ในการใช้งาน LF356 จะกล่าวในส่วนของหลักการการทำงานต่อไป

3. **MC14020** 14 Bit Binary Counter มีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะขาสัญญาณของ MC14020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC14020 มีรายละเอียดดังนี้

- มีเสถียรภาพในการทำงานสูง
- มีไดโอดป้องกันอินพุตทุกตัว
- ช่วงแรงดันของแหล่งจ่ายไฟเท่ากับ 3.0 V ถึง 18 V
- มีขา Common Reset

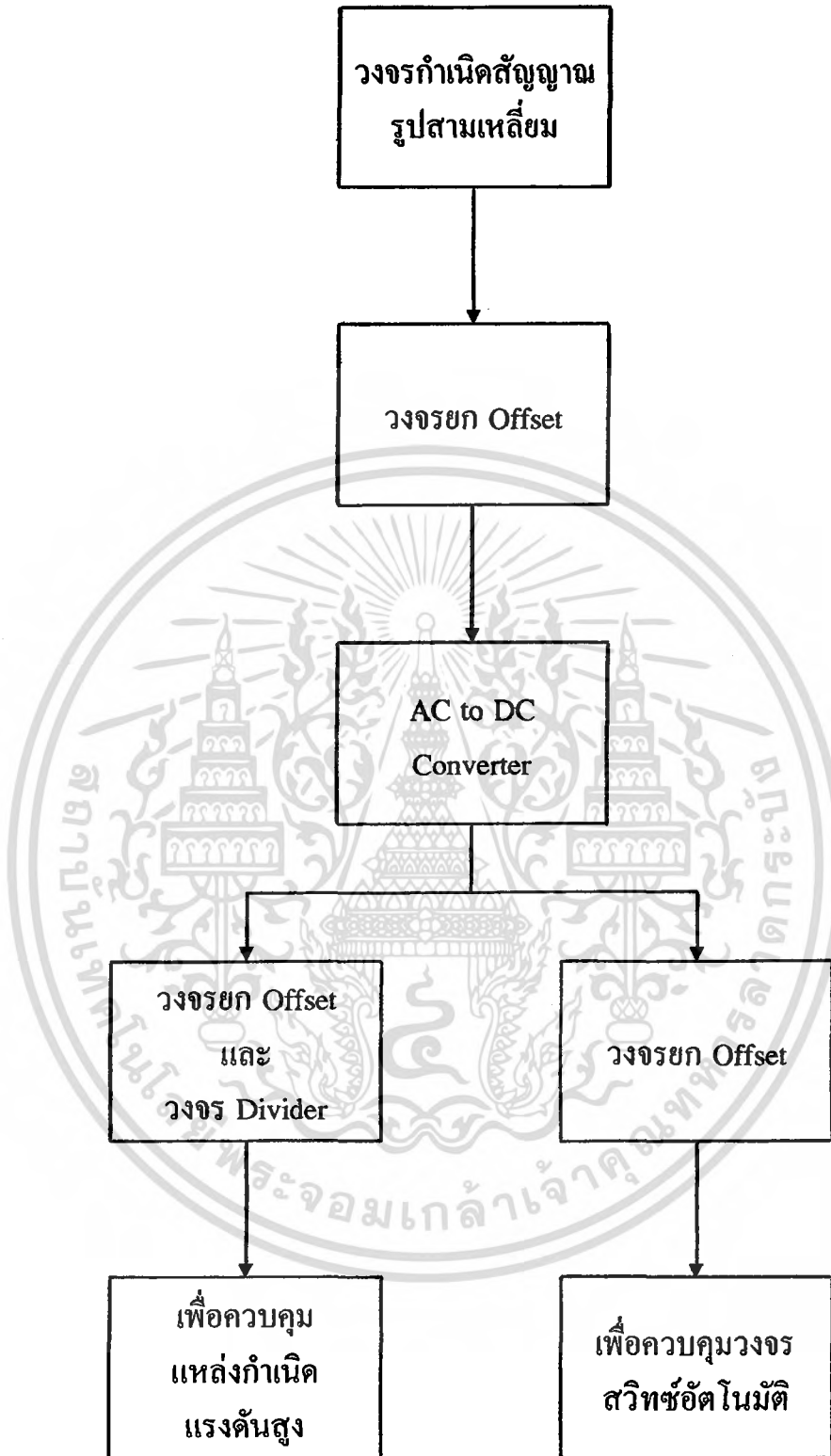
สำหรับการใช้งาน MC14020 ในโครงงานพิเศษนี้ จะทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟ +12 V และใช้ทำหน้าที่เป็นวงจรหารความถี่ของสัญญาณอนาล็อกที่ใช้ควบคุม

วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเพื่อป้อนให้กับแหล่งกำเนิดแรงดันสูง สัญญาณที่ออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูงจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับที่ได้จากส่วน Analog Programming Generator แต่ขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณที่ออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูงจะขยายขึ้น 200 เท่า กล่าวคือ Analog Programming Generator จะทำหน้าที่ควบคุมลักษณะสัญญาณและค่าแอมพลิจูดที่นำไปใช้ขับสารเพียโซอิเล็กทริกให้เกิดการตอบสนองขึ้น รวมทั้งเพื่อให้การตอบสนองเป็นไปอย่างสมบูรณ์หรือก็คือการเกิด Hysteresis Loop ขึ้นครบรอบ จึงจำเป็นที่จะต้องให้แรงดันทั้งบวกและลบไปขับสาร แต่เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูงเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีเพียงซีกบวกเท่านั้น เราจึงต้องมีส่วนของวงจรสวิตช์สลับขั้วเข้ามาช่วย โดยการสลับขั้วนี้จะต้องสอดคล้องกับสัญญาณที่ออกจาก Analog Programming Generator ด้วย นั่นคือ นอกจาก Analog Programming Generator จะทำหน้าที่ควบคุมลักษณะสัญญาณที่จะป้อนให้กับแหล่งกำเนิดแรงดันสูงแล้ว ยังเป็นส่วนควบคุมการทำงานของวงจรสลับขั้วสัญญาณแรงดันสูงให้มีทั้งซีกบวกและลบไปขับสารตัวอย่างให้เกิดเป็น loop ที่แสดงถึงสมบัติของมันออกมา ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น



รูปที่ 3.6 รูปแสดงอุปกรณ์ Analog Programming Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

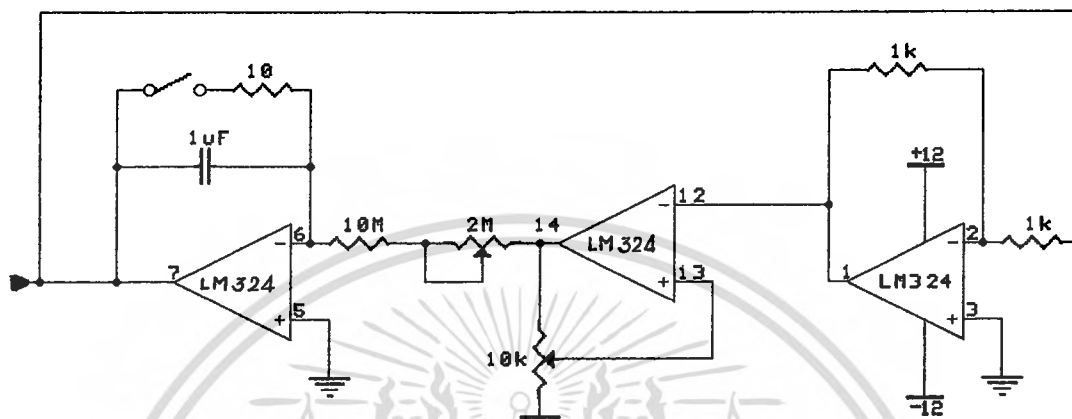


รูปที่ 3.7 ไคอะแกรมแสดงการทำงานของอุปกรณ์ Analog Programming Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณากัน โดยละเอียดแล้วเราสามารถแบ่งการทำงานของวงจร Analog Programming Generator เป็นส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

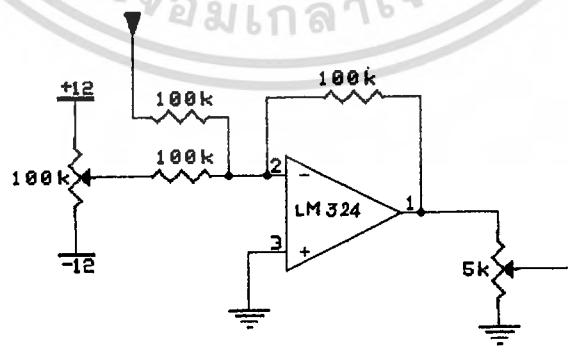
1. ส่วนกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.8 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

จากหลักการพื้นฐานของวงจร Sawyer-Tower ใช้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมในการจับสารตัวอย่าง เนื่องจากต้องการให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามต่อเวลาคงที่ เราจะสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมโดยอาศัยหลักการของวงจร integrator เปลี่ยนสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ออกจากส่วนของ comparator ให้เป็นรูปสามเหลี่ยม และเพื่อให้ได้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงต้องอาศัยการป้อนกลับของสัญญาณด้วย

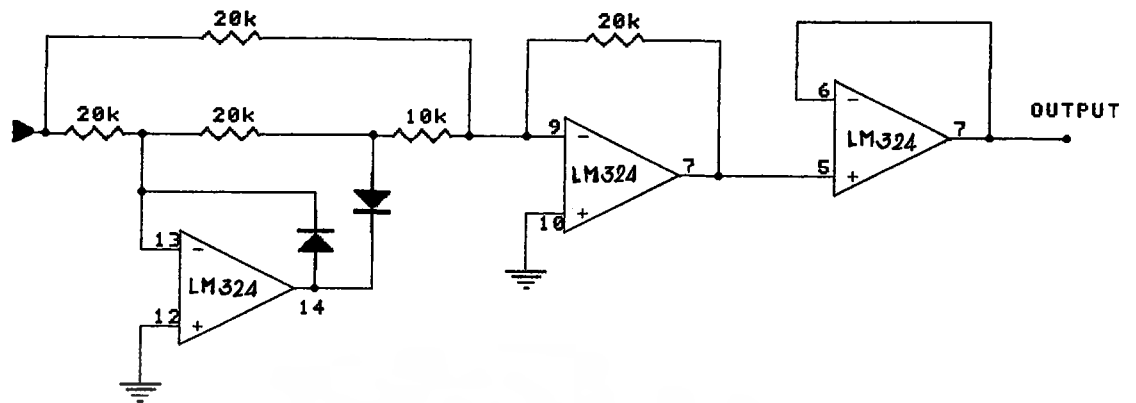
2. ส่วนการยก Offset



รูปที่ 3.9 ส่วนยก Offset ของวงจรกำเนิดรูปสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

เป็นส่วนที่ใช้ในการปรับสมมาตรของรูปคลื่นทั้งทางซิกบวกและลบให้เท่ากัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

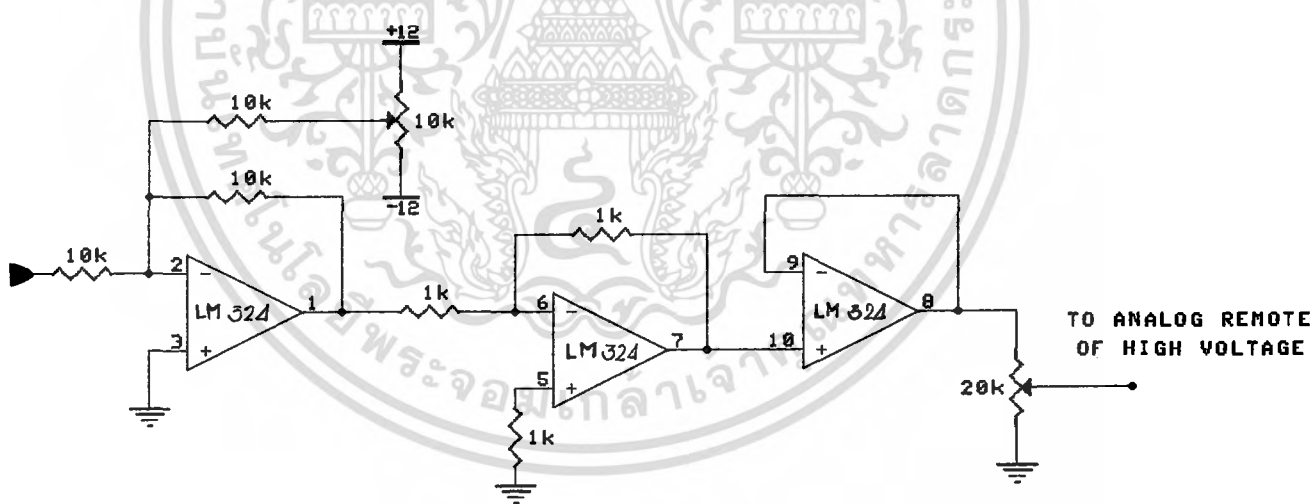
3. วงจร AC to DC Converter



รูปที่ 3.10 ส่วนของวงจร AC to DC Converter

เนื่องจากอินพุทของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ใช้สามารถรับสัญญาณได้เพียงซีกบวกเท่านั้น ดังนั้นในการขยายสัญญาณจึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับเปลี่ยนฝั่งซีกลบให้เป็นบวกดังรูปที่ 3.1(a) ก่อนที่จะนำไปผ่านเข้าสู่แหล่งกำเนิดแรงดันสูงต่อไป

4. ส่วนยก Offset และ Divider



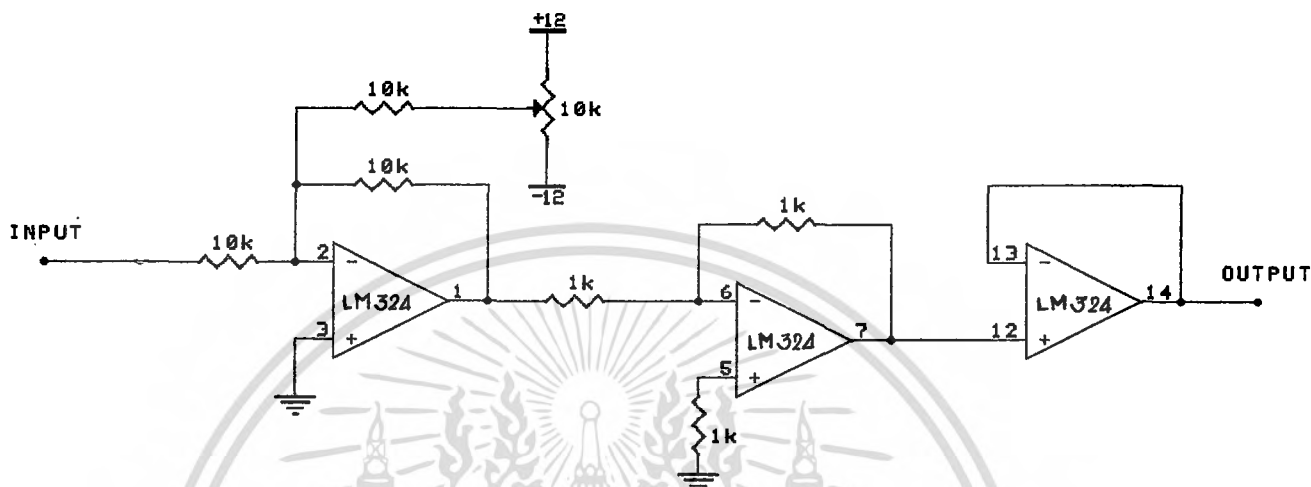
รูปที่ 3.11 ส่วนยก Offset และวงจรแบ่งแรงดัน

เมื่อสัญญาณผ่านจาก AC to DC Converter แล้ว จะให้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีเฉพาะซีกบวกเท่านั้น เราจะทำการปรับ Offset ให้มีส่วนของไฟลบติดเข้ามาเล็กน้อยดังรูปที่ 3.17 ทั้งนี้เพื่อให้เกิดมีช่วงเวลาสำหรับการสลับขั้วได้ตรงจังหวะของรูปสัญญาณ คือสลับขั้วในจังหวะที่สัญญาณมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อรูปสัญญาณที่ทำการสลับขั้วแล้วเปลี่ยนรูปไป ส่วน Divider มีไว้เพื่อปรับค่าแอมพลิจูดของสัญญาณให้อยู่ในช่วงที่แหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็น ขอบขงจะเขชนัดในกรคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันสูงสามารถรับได้ (0-5 V) และมีขนาดที่เหมาะสมที่จะขับสารตัวอย่างแต่ละตัว สัญญาณที่ผ่านออกจากช่วงนี้แล้วจะถูกส่งไปควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงต่อไป

5. ส่วนยก Offset



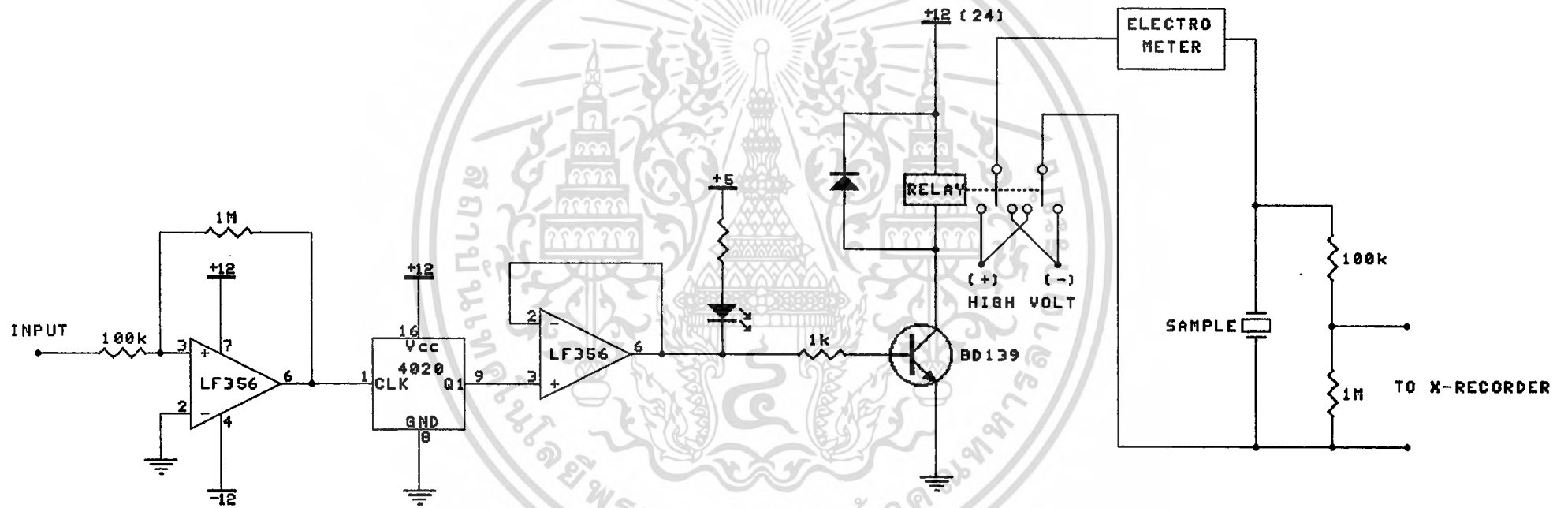
รูปที่ 3.12 ส่วนยก Offset

สัญญาณส่วนที่ออกจาก AC to DC Converter จะผ่านเข้ามายังส่วนนี้ เพื่อใช้เป็นส่วนควบคุมการทำงานของวงจรสลับขั้วอัตโนมัติ โดยส่วนของการยก Offset จะเป็นตัวปรับให้การสลับขั้วเกิดขึ้นในขณะที่สัญญาณผ่านศูนย์หรือมีค่าติดลบน้อย ๆ ส่วนยก Offset นี้ถูกแยกออกจากส่วนที่จะผ่านสัญญาณไปยังแหล่งกำเนิดแรงดันสูงเนื่องจากสัญญาณนี้จะต้องถูกกำหนดไว้ที่ค่าติดลบต่ำสุดค่าหนึ่ง (ประมาณ -1 V) จึงจะสามารถใช้เป็นตัวกำเนิดสัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรสลับขั้วอัตโนมัติได้ เราจะทำการปรับเพียงครั้งเดียวและตั้งค่าไว้ที่เดิมตลอด จึงเป็นการไม่สะดวกหากจะรวมส่วนนี้เข้ากับส่วนควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่จะต้องมีการปรับอยู่ตลอดเวลาเมื่อมีการเปลี่ยนค่าแรงดันที่นำมาขับสาร

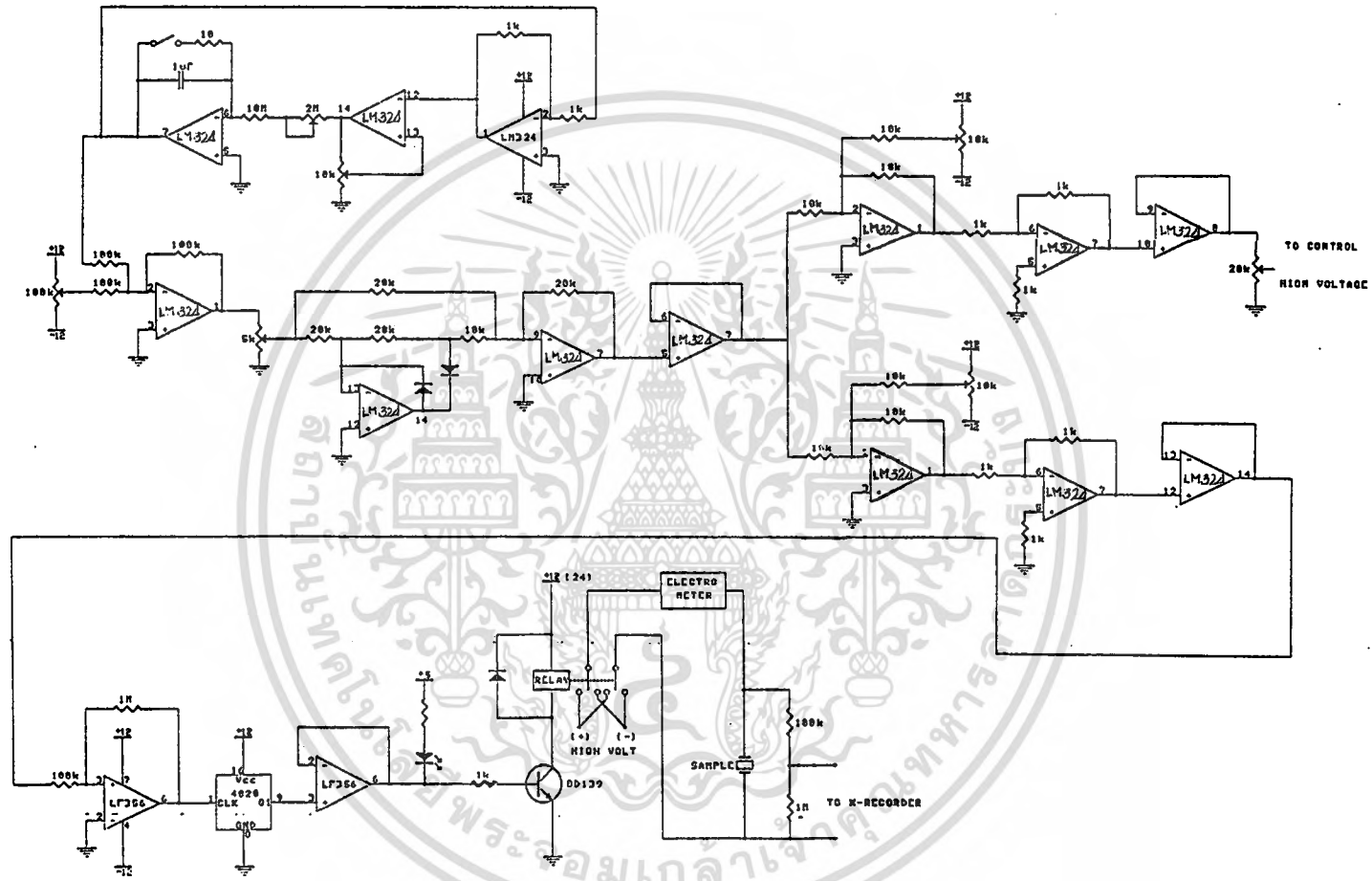
6. ส่วนของวงจรสลับขั้วอัตโนมัติ

จากที่กล่าวไปแล้วว่าเอาท์พุทที่ออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูงจะมีเพียงซีกบวกเท่านั้น จึงไม่อาจทำให้เกิด Hysteresis Loop ขึ้นอย่างครบรอบได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องสร้างส่วนสลับขั้วแรงดันดังรูปที่ 3.13 โดยอาศัยสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นในช่วงแรกมาสร้างเป็นพัลส์ควบคุมการทำงานของสลับขั้วให้เกิดขึ้นอย่างถูกต้องและตรงตามจังหวะที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรสลับขั้วแรงดันที่เป็นสวิตช์อัตโนมัติ



รูปที่ 3.14 ส่วนวงจรรวมของอุปกรณ์ Analog Programming Generator

3.1.2 แหล่งกำเนิดแรงดันสูง < High Voltage Generator >

หน้าที่

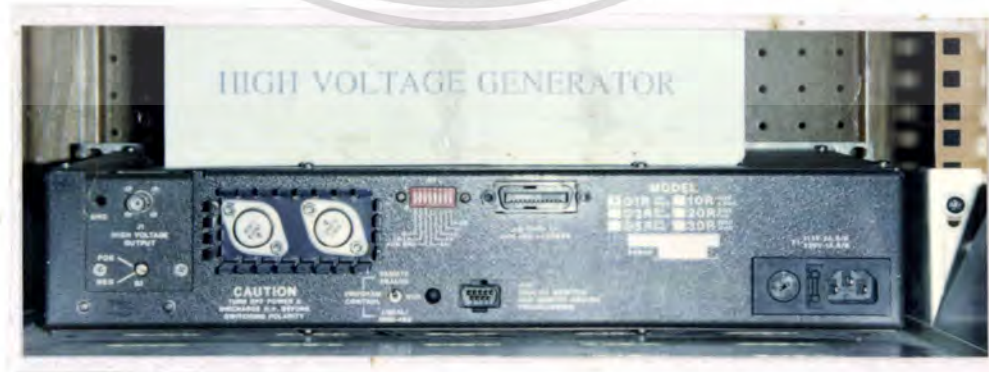
แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ทำหน้าที่รับสัญญาณอนาล็อกที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม (เปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างต่อเนื่องกับเวลา) จากอุปกรณ์ Analog Programming Generator ที่สร้างขึ้น เพื่อทำการขยายให้มีแรงดันสูง (ค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถจ่ายได้คือ 1 kV) และมีสัญญาณที่มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมเหมือนกับสัญญาณที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ Analog Programming Generator เพื่อที่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าค่าสูง ๆ ที่มีลักษณะต่อเนื่องกับเวลา ซึ่งใช้ในการป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบ เพื่อให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำภายในสารได้

หลักการทำงาน

เครื่องมือกำเนิดแรงดันสูงนี้ จะใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวัด P-E Hysteresis Loop ของสารเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งจำเป็นต้องกำเนิดแรงดันที่ใช้ในการทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง โดยโครงการพิเศษนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีของ บริษัท พรีเมียร์ โกลเบิลคอร์เปอร์เรชั่น จำกัด หรือ TDO ให้นำเครื่องมือที่เรียกว่า " Bertan High Voltage Power Supply " มีลักษณะดังรูปที่ 3.15



(a)



(b)

รูปที่ 3.15 รูปเครื่องมือ Bertan High Voltage Generator (a) ด้านหน้า (b) ด้านหลัง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งคุณสมบัติการใช้งานของเครื่องมือ มีดังนี้

1. สามารถแสดงผลที่ LED ได้ 5 ตัวเลขโดยสามารถแสดงซ้ำได้
2. สามารถใช้สัญญาณดิจิทัล ในการ โปรแกรมได้ โดยผ่านการต่อกับ IEEE-488
3. สามารถใช้สัญญาณอนาลอกในการโปรแกรมได้ โดยอินพุต 0 ถึง + 5 Vdc ต่อผ่าน Rear Panel Analog Programming Connector
4. มีสัญญาณรบกวนและสัญญาณกระเพื่อมต่ำ
5. สามารถให้แรงดันได้สูงสุด 1 kV
6. สามารถจำกัดค่ากระแสและแรงดันที่จ่ายได้
7. มีวงจรป้องกัน โหลด

ฯลฯ

ในการใช้งานของเครื่อง Bertan นี้ร่วมกับอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้น จำเป็นต้องเลือกใช้ในโหมดของ "Remote Analog Programming" เพื่อที่จะทำให้สัญญาณที่รับเข้ามาจากอุปกรณ์ซึ่งสร้างสัญญาณอนาลอกที่ได้ทำการสร้างขึ้น สามารถควบคุมสัญญาณแรงดันขยายที่ออกจากเครื่อง Bertan ให้มีลักษณะเป็นไปตามสัญญาณที่ใช้ควบคุม

เมื่อเข้ามาอยู่ในโหมดดังกล่าวโดยการเลือกสวิทช์ดังรูปที่ 3.15 ที่ด้านหลังของเครื่องมือ ไปตรงข้อความ " Remote Analog Programming " แล้วสัญญาณแรงดันจะถูกควบคุมโดยทำการผ่านสัญญาณที่ใช้ควบคุมไปยังตัวเชื่อมต่อที่เรียกว่า " Rear Panel Connector " ซึ่งคู่มือในการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานเมื่ออยู่ในโหมด " Remote Analog Programming " มีดังนี้

* โหมด Remote Analog Programming

มีหลายเทคนิคที่จะใช้ควบคุมในระยะไกลสำหรับ Bertan ทุกเทคนิคใช้สัญญาณแรงดันในการ โปรแกรมค่าและทุกวงจรจะเทียบกับการวนเคียวกันทั้งหมด

เครื่องมือที่ง่ายที่สุดก็คือ ใช้การ โปรแกรมระยะไกลด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ (Remote Potentiometer Programming) จึงจำเป็นที่จะต้องติดตั้ง Rear Panel Connector ในโหมดนี้ ตัวต้านทานปรับค่าได้ จะต่อระหว่างเอาต์พุตอ้างอิงของแหล่งจ่ายไฟและกราวด์ ขาที่ใช้ปรับของตัวต้านทานปรับค่าได้จะต่ออยู่กับสัญญาณอินพุต แรงดันที่ใช้ควบคุมซึ่งถูกป้อนเข้าไปจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันของตัวต้านทานปรับค่าได้ เราใช้ตัวต้านทาน 5 k Ω แบบ Carmet หรือแบบ Wirewound ควบคุม ความละเอียดของการตั้งค่าเอาต์พุตจะถูกกำหนดโดยค่าของตัวต้านทานปรับค่าได้นี้

การโปรแกรมแรงดันจะทำได้โดยการป้อนสัญญาณแรงดันตรงอินพุตควบคุม ช่วงของแรงดันในการ โปรแกรมจะกำหนดโดยแหล่งจ่ายไฟของ Bertan โดยปกติคือ 0 ถึง +5 V แต่ในบางรุ่นของ Bertan ต้องการ 0 ถึง -5 V หรือ 0 ถึง +9 V (แต่ใน Bertan รุ่นที่เลือกใช้จะมีแหล่งเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายไฟ 0 ถึง +5 V) ถ้าแหล่งกำเนิดในการโปรแกรมต้องการแรงดันที่สูงกว่า เช่น 0 ถึง +10 V จำเป็นต้องใช้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดแรงดันที่ป้อนให้กับอินพุตควบคุมของแหล่งกำเนิดไฟ ละเอียดของ Remote Analog Programming มีค่าได้ไม่จำกัด

อินพุตอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดไฟโดยปกติจะสูง ($\sim 1 \text{ M}\Omega$) สำหรับความถูกต้องสูง และมีสัญญาณรบกวนต่ำ วงจรที่ให้สัญญาณในการโปรแกรมควรมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ ($\sim 100 \Omega$) ทำให้ความผิดพลาดลดลง

ในส่วนของการแสดงผล Bertan จะมีส่วนของวงจร Analog to Digital Converter (ADC) หรือเพียงสัญญาณอนาล็อกเป็นตัวเลข ซึ่งแสดงผลที่จอแสดงผลแบบ LED

* การทำงานในโหมด Remote Analog Programming

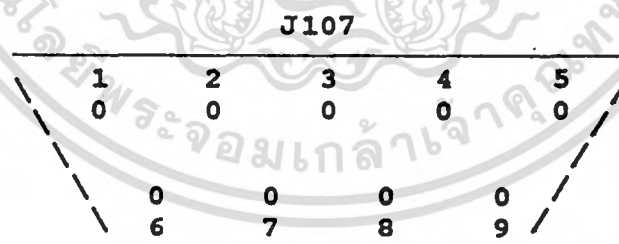
1. สวิตช์ควบคุมโปรแกรม

ก่อนที่ระบบจะถูกโปรแกรมด้วยสัญญาณอนาล็อก (0 ถึง +5 Vdc) จะต้องสำรวจให้แน่ใจว่าได้ตั้งสวิตช์ควบคุมโปรแกรมไปที่ ตำแหน่ง Remote Analog เรียบร้อยแล้ว

2. การควบคุมระยะไกล

เอาต์พุตของแรงดันที่มีค่าสูงสามารถถูกโปรแกรมระยะไกลจาก แหล่งกำเนิดแรงดันภายนอก แรงดันที่ใช้โปรแกรม 0 ถึง +5 Vdc ป้อนให้กับขา 6 ของ J107 Connector Jack บน Rear Panel จะโปรแกรมแรงดันเอาต์พุตค่าสูงจากศูนย์ถึงแรงดันสูงสุด

การโปรแกรมสามารถทำได้โดยการใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ต่อระหว่าง ขา 4 (+5 Vdc) และขา 7 (GND) กับขากลางที่ใช้ปรับค่าต่อกับขา 6 ตัวต้านทานปรับค่าได้ควรมีสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิต่ำ ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบ Wirewound หรือแบบ Cermet ที่มีค่าความต้านทานอยู่ในช่วง $5 \text{ k}\Omega - 20 \text{ k}\Omega$ ซึ่งค่าเอาต์พุตจะมีค่าแปรผันกับตำแหน่งของขาที่ใช้ปรับค่า



รูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งขาและหน้าที่ของแต่ละขาที่ใช้ในโหมด Remote Analog Programming

ขา หน้าที่

- 1 ควบคุมแรงดันเอาต์พุตบัฟเฟอร์, 0 ถึง +5 Vdc ต่อกับ $10 \text{ k}\Omega$
- 2 ไม่ใช่
- 3 ระดับ TTL ที่สอดคล้องกับลอจิกอินพุต ลอจิกอินพุตเป็นศูนย์จะไม่สามารถกำเนิดแรงดันสูงได้ วงจรเปิดหรือลอจิกอินพุตเป็นหนึ่ง จะสามารถกำเนิดแรงดันสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดลอกหรือแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขา หน้าที่
- 4 เอาท์พุทอ้างอิง +5 Vdc ; เทียบกับกราวด์ของอนาลอก
 - 5 ควบคุมกระแสเอาท์พุทบัฟเฟอร์ , 0 ถึง +5 Vdc ต่อกับ 10 k Ω
 - 6 อินพุท Remote Analog Programming , 0 ถึง + 5 Vdc
 - 7 กราวด์ของอนาลอก
 - 8 กราวด์ของดิจิตอล
 - 9 NPN Open Collector เกี่ยวข้องกับกราวด์ของดิจิตอล แสดงขั้วของแรงดันเอาท์พุท การ Saturation ของ NPN แสดงขั้วบวก "0" การ Cut-Off ของ NPN แสดงขั้วลบ "1"

จากคู่มือในโหมด " Remote Analog Programming " เนื่องจาก Bertan ที่ใช้เป็นเครื่องรุ่นที่ใช้แหล่งกำเนิดไฟ 0 ถึง +5 Vdc ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ขาสัญญาณที่ใช้ควบคุมดังนี้ คือ

ขาที่ 6 เป็นขา Remote Analog Programming Input ซึ่งเป็นขาที่รับสัญญาณอนาลอกควบคุมจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

ขาที่ 7 เป็นขากราวด์ของสัญญาณอนาลอก ซึ่งต่อร่วมกับกราวด์ของอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุม ลักษณะของขา ดังรูปที่ 3.16

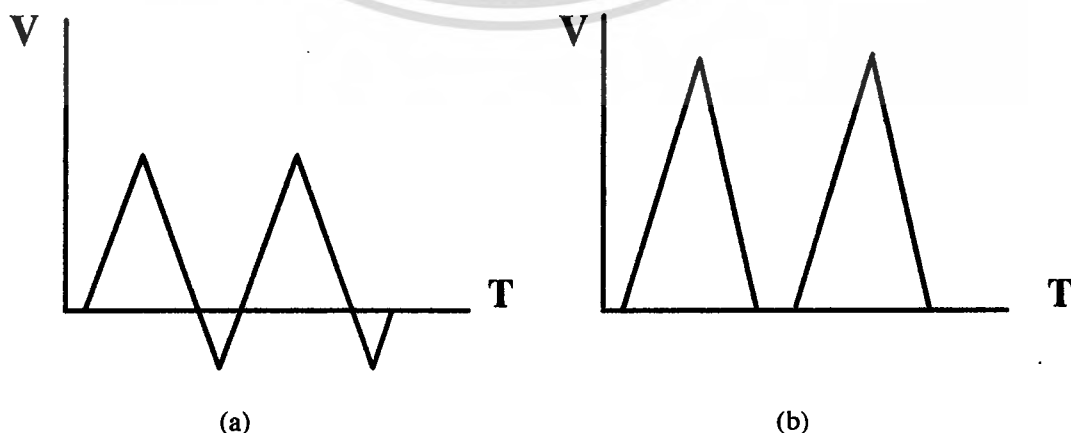
ตัวอย่างการขยายสัญญาณแรงดันเมื่อค่าแรงดันที่ Bertan รุ่นนี้สามารถจ่ายได้สูงสุดเป็น 1 kV ขณะที่สัญญาณที่แหล่งกำเนิดไฟ 0 ถึง + 5 V

สัญญาณควบคุมที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 V สัญญาณแรงดันขยายจาก Bertan มีค่า 0 ถึง 1 kV

สัญญาณควบคุมที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 V สัญญาณแรงดันขยายจาก Bertan มีค่า 0 ถึง 200 kV

สัญญาณควบคุมที่มีค่าอยู่ในช่วง -0.5 ถึง 0.5V สัญญาณแรงดันขยายจาก Bertan มีค่า 0 ถึง 100kV

เนื่องจากขีดจำกัดของ Bertan คือไม่สามารถจ่ายแรงดันที่เป็นลบได้ ดังนั้นเมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุทที่ไปควบคุม Bertan เป็นดังรูปที่ 3.17 (a) จะทำให้ได้สัญญาณของเอาท์พุทที่ออกจาก Bertan เป็นดังรูปที่ 3.17 (b) ซึ่งสัญญาณดังกล่าวมีเพียงด้านบวกด้านเดียวเท่านั้น



รูปที่ 3.17 แสดงรูปสัญญาณสามเหลี่ยมจากตัวบันทึกผล

3.1.3 เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า < Electrometer >

หน้าที่

เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าทำหน้าที่วัดสัญญาณกระแสเหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (ในระดับต่ำกว่า μA) จากการป้อนสนามไฟฟ้าค่าสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับเวลาผ่านสารเพียโซอิเล็กทริก แล้วทำการอินทิเกรตกับเวลาวัดเป็นค่าประจุ (Q) จากความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้า คือ จำนวนประจุที่ไหลผ่านวัตถุต่อหน่วยเวลา

$$I = \frac{Q}{t} \quad (A)$$

$$Q = I t \quad (C) \quad \dots(3.1)$$

Electrometer จึงทำหน้าที่วัดค่าประจุ Q เป็นคูลอมบ์มิเตอร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าโพลาไรเซชัน (P) จากบทที่ 2 เป็นดังสมการ 2.24

$$P = \frac{Q}{A} \quad (C/m^2)$$

ดังนั้นค่าประจุ Q ที่วัดได้จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ ทำให้สามารถวัด P-E Hysteresis Loop จากตัวบันทึกผลได้

หลักการทำงาน

เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าหรือ Electrometer นี้เป็นเครื่องมืออีกเครื่องหนึ่งซึ่งช่วยในการวัดค่าประจุ Q ซึ่งสัมพันธ์กับค่าโพลาไรเซชัน (P) ของสารเพียโซอิเล็กทริก ดังที่กล่าวมาข้างต้นโดยเครื่องมือนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก TDO ในการศึกษาวิจัยเช่นกัน เครื่องมือดังกล่าวเป็นของ Keithley ดังรูปที่ 3.18

* คุณสมบัติการนำ Electrometer เครื่องดังกล่าวมาใช้งานในโรงงานพิเศษดังกล่าวมีดังนี้

1. ใช้วัดแรงดัน (V) , กระแส (I) , ความต้านทาน (R) , ค่าประจุ (Q) ค่าน้อย ๆ ได้เนื่องจากในโรงงานดังกล่าวต้องการวัดค่าประจุ Q ดังนั้น Electrometer จึงทำหน้าที่เป็นคูลอมบ์มิเตอร์ (Coulombmeter) ซึ่งสามารถวัดได้ดังนี้

ช่วงที่สามารถวัดได้คือ $10^{-13} C$ ถึง $10^{-5} C$ (x 1 หรือ x 3)

ความถูกต้องมีค่า $\pm 5 \%$ ของค่าเต็มสเกลบนช่วงนั้น

ค่า Drift เนื่องจากกระแส Offset ไม่เกิน $5 \times 10^{-15} C/s$

2. ในกรณีที่ต้องการในสัญญาณไปพลอตกราฟที่ตัวบันทึกผล (Recorder) จำเป็นต้องใช้สัญญาณแรงดันในการป้อนให้กับตัวบันทึกผล ดังนั้นเครื่องมือนี้สามารถให้แรงดันเอาต์พุตกับตัวบันทึกผลได้ $\pm 3 V$ สำหรับค่าเต็มสเกลของอินพุต และมีความต้านทานภายใน $3 k\Omega$ ขั้วของเอาต์พุตจะตรงข้ามกับขั้วของอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สามารถจ่ายกระแสเอาท์พุทไปยังตัวบันทึกผลมีค่า $\pm 1 \text{ mA}$ สำหรับค่าเต็มสเกลของอินพุทมีค่าเปลี่ยนแปลง $\pm 5 \%$ กับตัวบันทึกผลที่มีความต้านทาน 1400Ω
4. สวิตช์ของมิเตอร์สามารถเลือกตำแหน่งศูนย์ได้ คือ เลือกด้านซ้ายเป็นศูนย์ (ซ้ายบวกหรือลบ) หรือเลือกตำแหน่งศูนย์ตรงกลาง
5. กระแสอินพุทค่าน้อย ๆ $5 \times 10^{-15} \text{ A}$ ใช้ลด Zero Offset ที่มีความต้านทานของแหล่งกำเนิดสูง และมีความละเอียดสูงเมื่อวัดค่ากระแสและประจุ

ในการวัดที่ได้ผลสูงสุด จะใช้วิธีในการวัด 2 วิธีด้วยกัน

1. Shunt (แบบธรรมดา) ซึ่งจะให้ความต้านทานอินพุทที่เลือกเป็นโวลท์
2. Feedback (แบบเร็ว) ซึ่งจะให้แรงดันอินพุทค่าเป็นแอมมิเตอร์หรือคูลอมบ์มิเตอร์



รูปที่ 3.18 รูปเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า (Electrometer)

3.1.4 ตัวบันทึกผล < Recorder >

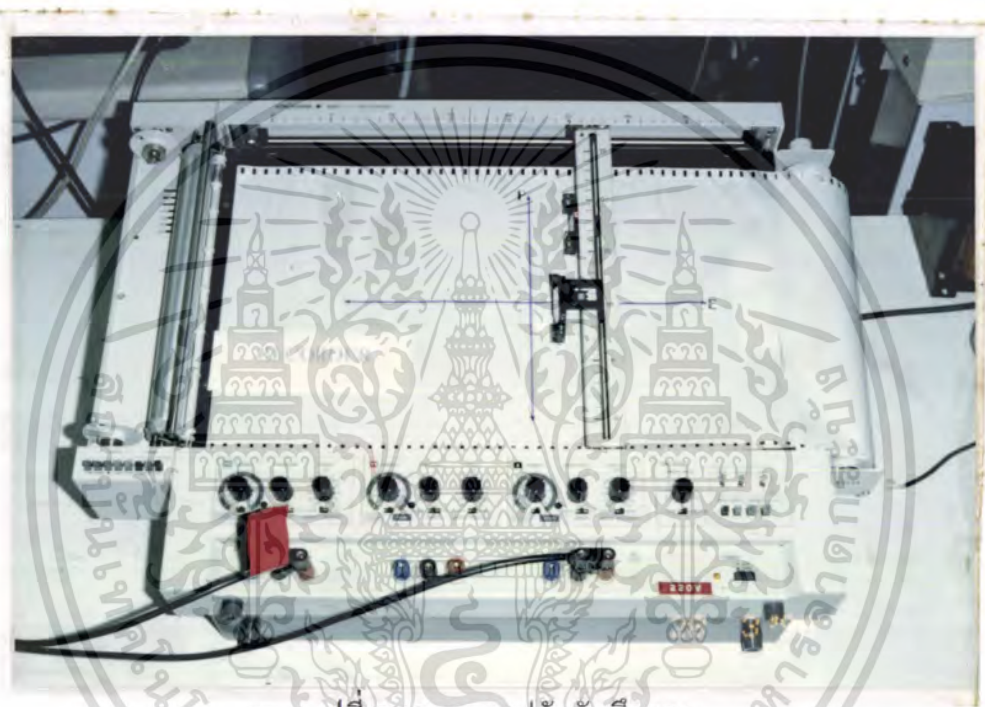
หน้าที่

ตัวบันทึกผลจะทำหน้าที่ บันทึกค่าโพลาริเซชัน (P) จากเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าหรือ Electrometer โดยทำการพลอตเป็นกราฟ ในแกน Y พร้อมกับค่าสนามไฟฟ้า (E) ที่ได้รับมาจากเอาท์พุทของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงเป็นแกน X ซึ่งผลได้จากตัวบันทึกผลคือ P-E Hysteresis Loop ที่ได้จากสารเพียโซอิเล็กทริกนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางาน

ตัวบันทึกผลนี้เป็นตัวแสดงผล P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบ โดยจะรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจาก Electrometer ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่าประจุ Q ที่วัดได้จากสารเพียโซอิเล็กทริก (อ่านค่าได้จากหน้าปัดของ Electrometer) โดยที่ค่าประจุ Q สัมพันธ์กับค่าโพลาริเซชัน (P) ดังสมการที่ 2.24 จากนั้นนำสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้มาทำการบันทึกผลโดยแสดงเป็นกราฟกับค่าสนามไฟฟ้า (E) ที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับเวลาจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูงตัวบันทึกผลดังรูปที่ 3.19 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก TDO ในการศึกษาวิจัยเช่นกัน



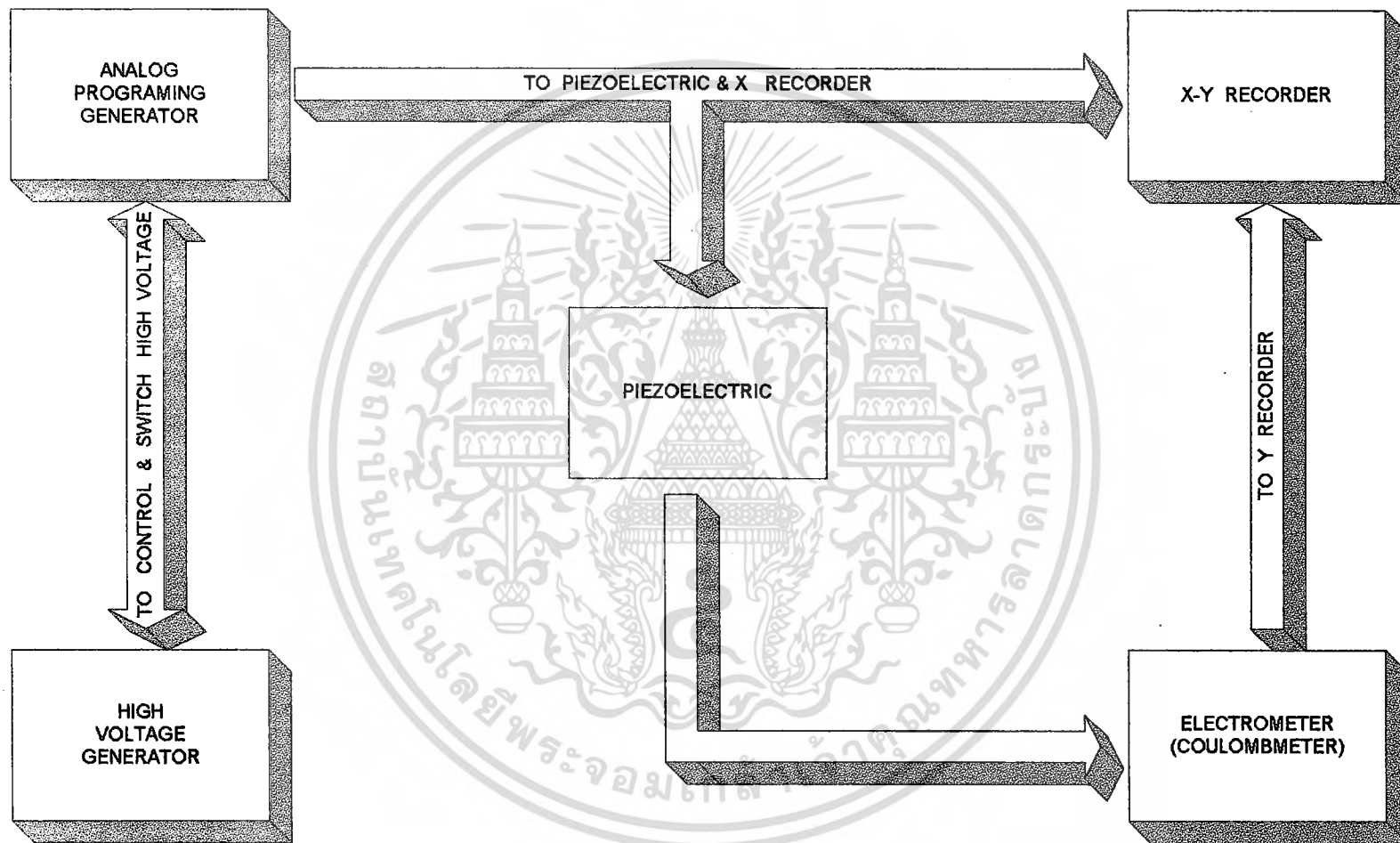
รูปที่ 3.19 แสดงรูปตัวบันทึกผล

3.1.5 สรุปหลักการทํางานของเครื่องมือ P-E Hysteresis Loop Tracer

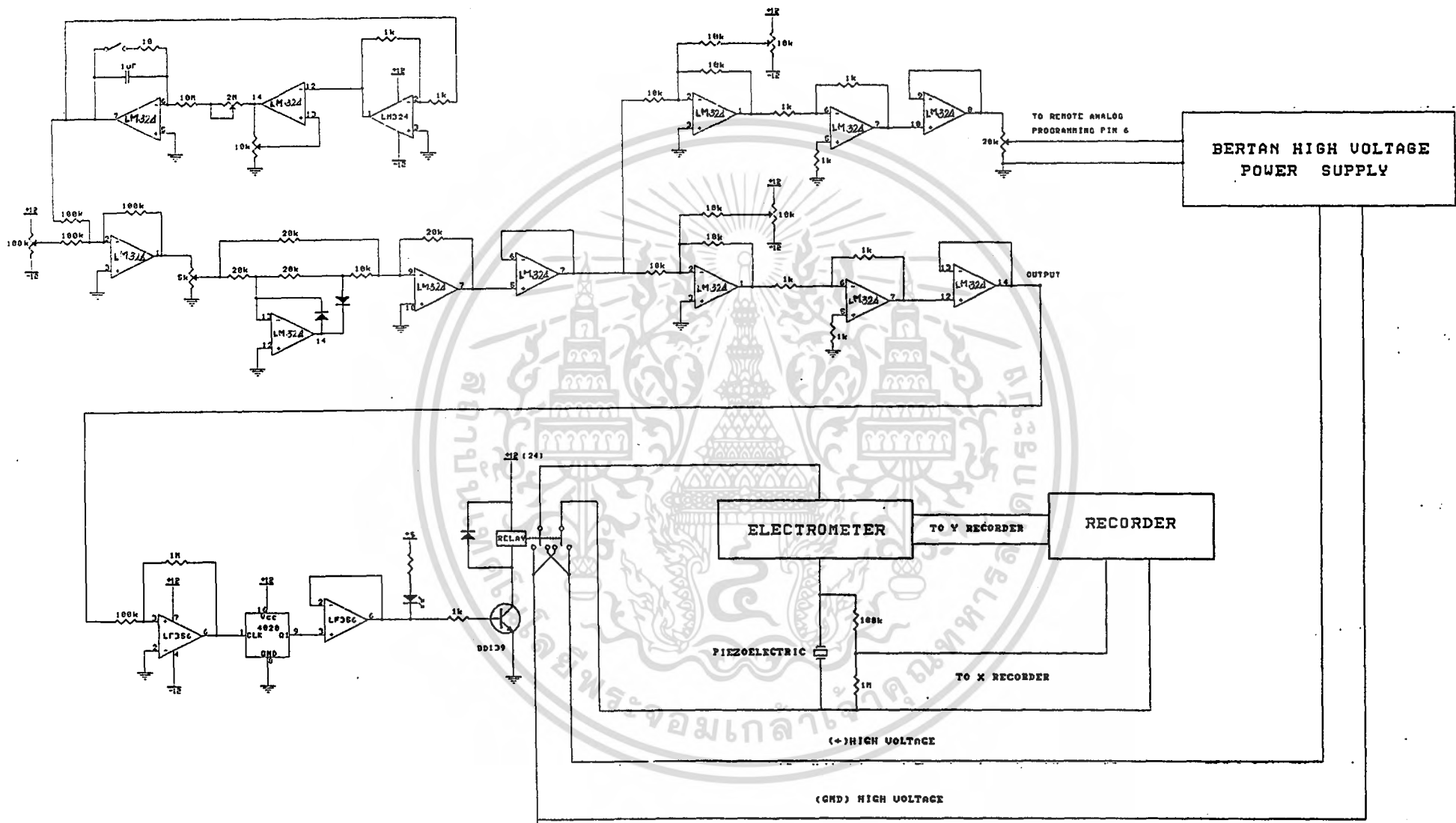
อุปกรณ์ Analog Programming Generator ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณอนาลอกลักษณะสามเหลี่ยมซึ่งใช้ควบคุมสัญญาณแรงดันสูงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูง (High Voltage Generator) ซึ่งใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้า (E) ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามสัญญาณอนาลอกที่ใช้ควบคุม สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการโพลาริเซชันสัญญาณของค่าประจุ (Q) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับโพลาริเซชัน (P) จะถูกวัดการเปลี่ยนแปลงโดยคูลอมบ์มิเตอร์ (จาก Electrometer) สัญญาณของค่า P จะถูกนำมาแสดงเป็นกราฟกับสนามไฟฟ้า (E) ที่ป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกโดยตัวบันทึกผล จนเกิดเป็น P-E Hysteresis Loop ขึ้น จากรูปที่ 3.20 และ 3.21 แสดงไดอะแกรมการทํางานวงจรรวมของ

เครื่องมือ P-E Hysteresis Loop ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ไคอะแกรมแสดงวิธีการวัด P-E Hysteresis Loop



รูปที่ 3.21 วงจรแสดงวิธีการวัด P-E Hysteresis Loop

3.2 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

หลังจากการศึกษาและวิจัยถึงหน้าที่และหลักการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวัด P-E Hysteresis Loop ของสารเพียโซอิเล็กทริกแล้ว ต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงวิธีการทดลองวัดสารเพียโซอิเล็กทริก ดังนี้

1. ต่ออุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ตามวงจรดังรูปที่ 3.21 โดยนำสารเพียโซอิเล็กทริกที่ต้องการทดสอบมาต่อร่วมในวงจร
2. ในส่วนของ Analog Programming Generator (จากวงจรดังรูปที่ 3.14) มีดังนี้
 - 2.1 นำขาสัญญาณจากขากลาง (Wiper) ของตัวต้านทานปรับค่าได้ 20 k Ω จาก LM324 ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของตัวแหล่งกำเนิดแรงดันสูงในรูป 3.16 ซึ่งเป็นขาสัญญาณที่ใช้ควบคุมสัญญาณแรงดันที่แหล่งกำเนิดแรงดันสูง
 - 2.2 นำกราวด์ของวงจร (หรือกราวด์จากแหล่งกำเนิดไฟ) ต่อร่วมกับกราวด์ของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ขา 7 (ทำหน้าที่เป็นกราวด์ของสัญญาณอนาลอก)
 - 2.3 ทำการปรับค่าความถี่สวิทช์และแอมพลิจูดของสัญญาณจากตัวต้านทานปรับค่าได้ 2 M Ω และ 20 k Ω ได้ตามลำดับ โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จาก Oscilloscope
3. ในส่วนของ Bertan High Voltage Power Supply มีดังนี้
 - 3.1 ปรับสวิทช์เลือกโหมดการทำงานไปที่ตำแหน่ง Remote Analog Programming
 - 3.2 ในโหมดที่สามารถใช้สัญญาณอนาลอกในการ โปรแกรม จำเป็นที่จะต้องต่อขาที่ 6 กับสัญญาณอนาลอกที่ใช้ควบคุม และขาที่ 7 ต่อกับกราวด์ของสัญญาณอนาลอกที่ใช้ควบคุม
 - 3.3 กดปุ่ม Power (ทางด้านซ้ายมือของเครื่อง) ไปที่ตำแหน่ง ON ทำการตั้งค่ากระแสเพื่อจำกัดกระแสที่จ่ายให้กับโหลด (ซึ่งก็คือเพียโซอิเล็กทริก) โดยการ
 - กดปุ่ม Set
 - กดปุ่ม Limit
 - กดปุ่ม mA
 - ทำการปรับเลือกค่ากระแสที่ต้องการ โดยหมุนปุ่มปรับค่า
 - กดปุ่ม Enter
 - 3.4 ต่อสายสัญญาณเอาต์พุทของแรงดันสูงจากด้านหลังของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงไปยังอุปกรณ์ Analog Programming Generator ในส่วนของวงจรสวิทช์เพื่อทำให้เกิดกระแสไหลผ่านเพียโซอิเล็กทริก 2 ทิศทาง

4. ในส่วนของ Electrometer มีดังนี้
 - 4.1 ปรับสวิตช์จากปุ่ม Meter ไปที่ตำแหน่ง Power ON
 - 4.2 ปรับสวิตช์จากปุ่ม Meter ไปที่ตำแหน่ง Center Zero
 - 4.3 หมุนปุ่มเลือกสัญญาณที่ต้องการวัดไปที่ Coulomb เพื่อวัดค่าประจุ พร้อมกับเลือกสเกลที่ใช้วัดจาก 10^{-13} ถึง 10^{-5} C
 - 4.4 หมุนปุ่มเลือกค่าเต็มสเกล (100 , 30 , 10 , 3 , 1)
5. ในส่วนของโหนดหรือสารเพียโซอิเล็กทริกมีดังนี้
 - 5.1 นำสัญญาณจากแหล่งกำเนิดแรงดันสูงต่อกับสารเพียโซอิเล็กทริก โดยผ่านอุปกรณ์ Analog Programming Generator ที่ทำหน้าที่สวิตช์ให้สัญญาณแรงดันสูงผ่านเพียโซอิเล็กทริก 2 ทิศทาง
 - 5.2 นำตัวต้านทาน 100 k Ω และ 1 M Ω ต่อกัน และนำมาต่อขนานกับสารเพียโซอิเล็กทริกดังรูปที่ 3.13
6. ในส่วนของ Recorder มีดังนี้
 - 6.1 เตรียมกระดาษแสดงผลวางบนแผ่นรองตามตำแหน่งที่ใช้บันทึกผล
 - 6.2 กดปุ่ม Power ให้ตัวบันทึกผลทำงาน
 - 6.3 เลือกสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง Hold เพื่อยึดให้กระดาษติดแน่นกับแผ่นรอง
 - 6.4 ตั้งตำแหน่ง Zero ให้กับเข็มบันทึก โดยปรับสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง Zero แล้วหมุนปุ่มปรับค่าตำแหน่ง Zero ตามต้องการ โดยทำการปรับทั้งแกน X และแกน Y
 - 6.5 นำสัญญาณแรงดันสูงที่คร่อมตัวต้านทาน 1 M Ω มาต่อเข้ากับอินพุทของแกน X
 - 6.6 นำสัญญาณแรงดันจาก Electrometer มาต่อเข้ากับอินพุทของแกน Y
7. เมื่อเริ่มทำการทดลอง ทำตามขั้นตอนดังนี้
 - 7.1 ตรวจสอบส่วนต่าง ๆ ของวงจรให้แน่ใจว่าได้ทำถูกต้องจากข้อ 1 - 6
 - 7.2 ทำการเปิดสวิตช์ High Voltage (ทางด้านขวา) ของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงให้กำเนิดสัญญาณแรงดันสูงไปยังสารเพียโซอิเล็กทริก
 - 7.3 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่หน้าจอแสดงผล LED ว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการหรือไม่ ถ้า LED ที่แสดงการ Trip สว่างจะต้องทำการปิดสวิตช์ High Voltage แล้วทำการปรับค่ากระแสจำกัดใหม่โดยเพิ่มค่าขึ้น
 - 7.4 ที่ตัวบันทึกผลทำการเปลี่ยนตำแหน่งจาก Zero เป็น Measure เพื่อเริ่มบันทึกผล แล้วกดปุ่ม Meas จะสังเกตเห็นว่าเข็มบันทึกเริ่มเคลื่อนที่ ปรับสเกลแกน X และแกน Y ตามลำดับ
 - 7.5 เลือกสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง Pen Down เพื่อให้เข็มบันทึกทำการวาดกราฟจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 เปลี่ยนสารพิษไฮโดรคาร์บอนที่ใช้ทดสอบตัวอื่น ๆ ทำการเก็บบันทึกผลข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณผลที่แสดงถึงคุณสมบัติของสารพิษไฮโดรคาร์บอนแต่ละสารสำหรับในส่วนของผลการทดลอง และการคำนวณผลจะกล่าวในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผล P-E Hysteresis Loop

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานและนำผลดังกล่าวมาวิเคราะห์ ในส่วนนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผล P-E Hysteresis Loop ที่ได้จากสารเพียโซอิเล็กทริก 2 ชนิดด้วยกันคือ

1. อุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer)
2. แบเรียมทิตาเนต (BaTiO_3)

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะของสารดังกล่าว ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

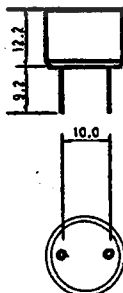
4.1 ลักษณะของสารเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบ

ในการศึกษาถึงสารเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบ จำเป็นที่จะต้องทราบถึงลักษณะทั่วไปของสารดังกล่าวก่อน เนื่องจากการที่ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของสารจะทำให้เราสามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อศึกษาถึงสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกต่อไปได้

4.1.1 อุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer)

ลักษณะภายนอกของอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ มีลักษณะดังรูปที่ 4.1

T 40-16 & R 40-16



รูปที่ 4.1 ลักษณะอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของลักษณะภายในของทรานสดิวเซอร์จะมีรูปแบบเป็น Unimorph ซึ่งเหมือนกับแบบเรียมทิตาเนต แต่ใช้สาร PZT ซึ่งอยู่บนแผ่นโลหะที่ไม่ไวเป็นทรานสดิวเซอร์เหมือนดังในรูปที่ 4.1 ขนาดของสารเพียโซอิเล็กทริก (PZT) ที่ใช้ทำเป็นอูลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ เป็นดังนี้

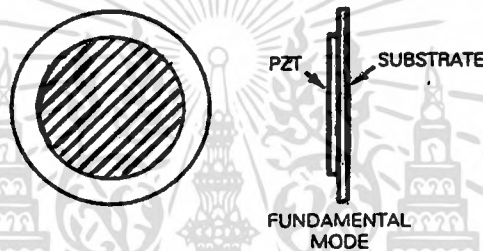
$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลาง } (d) = 9 \text{ mm} = 0.9 \text{ cm}$$

$$\text{ความหนา } (t) = 10 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด } (A) = 0.6361 \text{ cm}^2$$

4.1.2 แบบเรียมทิตาเนต (BaTiO₃)

ลักษณะโครงสร้างที่เป็นแบบ perovskite ของแบบเรียมทิตาเนต แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 สารแบบเรียมทิตาเนตที่เรานำมาทดสอบมีลักษณะรูปแบบเป็น Unimorph มีลักษณะดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Unimorph

จากรูปที่ 4.2 แบบเรียมทิตาเนตที่เป็นเซรามิกแผ่นบางๆ ติดอยู่กับฐานรองโลหะที่ไม่ไวขนาดของแบบเรียมทิตาเนตที่ใช้ทดสอบเป็นดังนี้

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลาง } (d) = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}$$

$$\text{ความหนา } (t) = 10 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด } (A) = 3.1416 \text{ cm}^2$$

4.2 ผลการทดลองวัด P-E Hysteresis Loop

จากการทดลองวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริกทั้งสอง กราฟที่แสดงผลจากตัวบันทึกผลนั้นจะได้เป็นค่าแรงดัน V_Q ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่าประจุ (Q) ที่วัดได้ในแกน Y และแรงดัน V_E ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสนามไฟฟ้า (E) ที่ป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบในแกน X เป็นตามสมการ 4.1

$$E = \frac{V_E}{d} \quad \dots(4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d คือ ความหนาของสารเพียโซอิเล็กทริก

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุ (Q) กับแรงดัน V_0 ซึ่งเป็นเอาต์พุตของ Electrometer สามารถหาได้จากหัวข้อที่ 3.1.3 ที่กล่าวถึงในส่วนของ การนำสัญญาณค่าประจุ (Q) ไปพลอตกราฟที่ตัวบันทึกผล จำเป็นต้องใช้สัญญาณแรงดัน V_0 ในการป้อนให้กับตัวบันทึกผล โดยที่ Electrometer สามารถให้แรงดันเอาต์พุต (V_0) ± 3 V ที่เป็นค่าเต็มสเกลซึ่งสัมพันธ์กับค่าเต็มสเกลของค่าประจุ (Q) ที่ต้องการวัด

กราฟแสดงผลที่วัดได้ระหว่างค่าประจุ (Q) กับแรงดัน V_0 ของอุตราโซนิกทรานสดิวเซอร์และเบรียมทิตานตแสดงดังรูปกราฟที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ค่าสเกลที่บันทึกผลในแกน X และแกน Y มีดังนี้ สำหรับสารเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 ชนิด มีดังนี้

$$\text{แกน X} = 0.5 \text{ V/cm}$$

$$\text{แกน Y} = 0.25 \text{ V/cm}$$

แต่เนื่องจากแรงดันที่วัดได้ในแนวแกน X นั้น เป็นค่าแรงดันที่วัดคร่อมตัวต้านทาน $1 \text{ M}\Omega$ ที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน $100 \text{ k}\Omega$ ดังรูปที่ 3.13 เนื่องจากต้องการลดขนาดของแรงดันที่ต้องการวัดจริงลง 10 เท่า ดังนั้นในการคำนวณผลแรงดันที่ผ่านสารเพียโซอิเล็กทริกจริงจึงจำเป็นต้องคูณ 10 กับค่าสเกลที่บันทึกได้ตามแนวแกน X ดังนั้นผลที่ได้ใหม่ของสารเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 เป็นดังนี้

$$\text{แกน X} = 0.5 * 10 \text{ V/cm} = 5 \text{ V/cm}$$

$$\text{แกน Y} = 0.25 \text{ V/cm}$$

ในส่วนของ การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างประจุ Q กับแรงดัน V_0 ที่แสดงบนตัวบันทึกผล จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเต็มสเกลของประจุ Q ที่วัดได้กับแรงดันเอาต์พุต V_0 เต็มสเกลที่มีค่า ± 3 V จะได้จากผลการทดลองที่วัดค่าเต็มสเกลของ Q ดังนี้

$$* \text{ ค่าเต็มสเกลของประจุ } Q \text{ ที่บันทึกผลได้} = 10^{-5} \text{ C}$$

สามารถหาความสัมพันธ์ของค่า Q และ V_0 ได้จาก

$$\text{ค่าเต็มสเกลของแรงดัน } V_0 \text{ มีค่า } 3 \text{ V} = \text{ค่าเต็มสเกลของประจุ } Q \text{ มีค่า } 10^{-5} \text{ C}$$

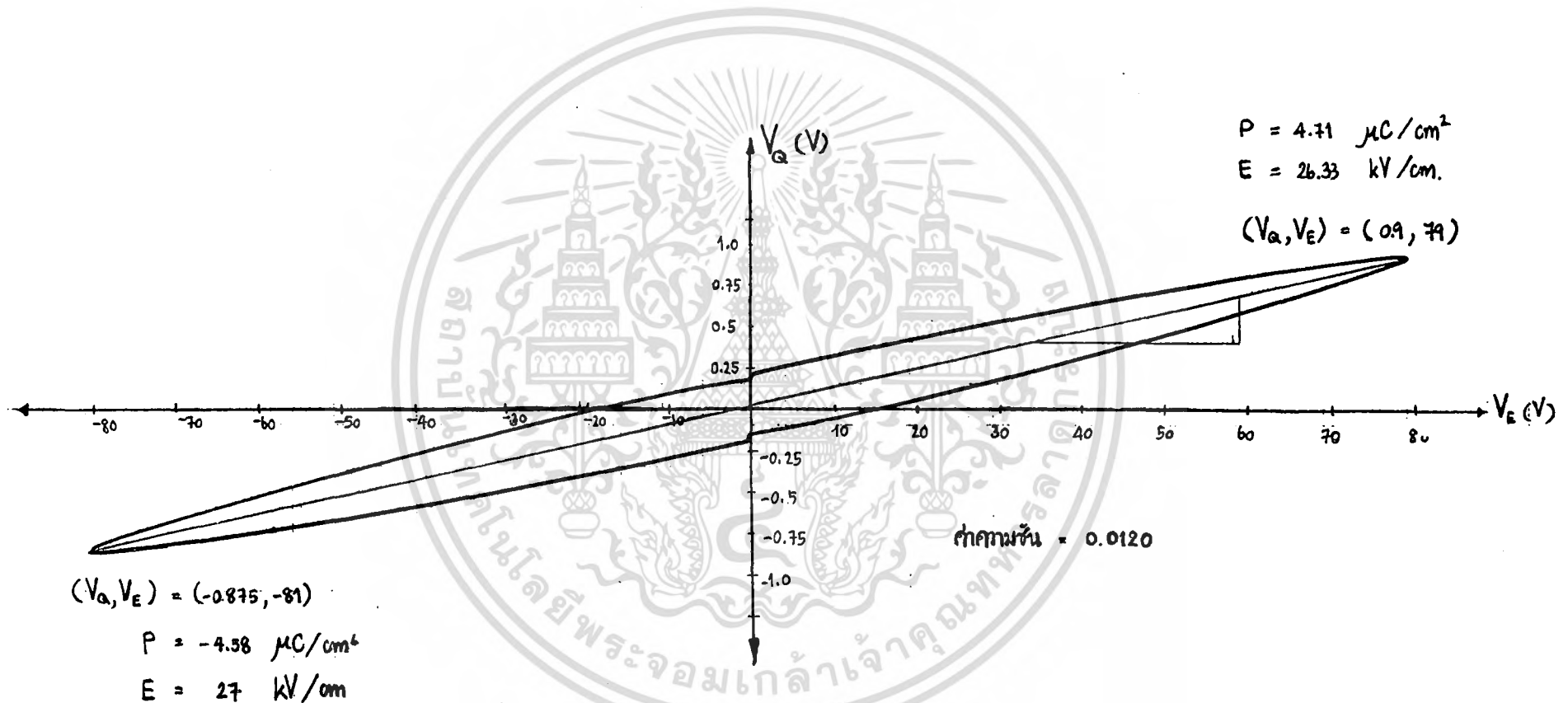
$$\text{ดังนั้นแรงดัน } V_0 \text{ มีค่า } 1 \text{ V} = \text{ค่าประจุ } Q \text{ มีค่า } 3.33 * 10^{-6} \text{ C} \quad \dots(4.2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเต็มสเกลที่แกน Y กับค่าประจุ Q จะเป็น

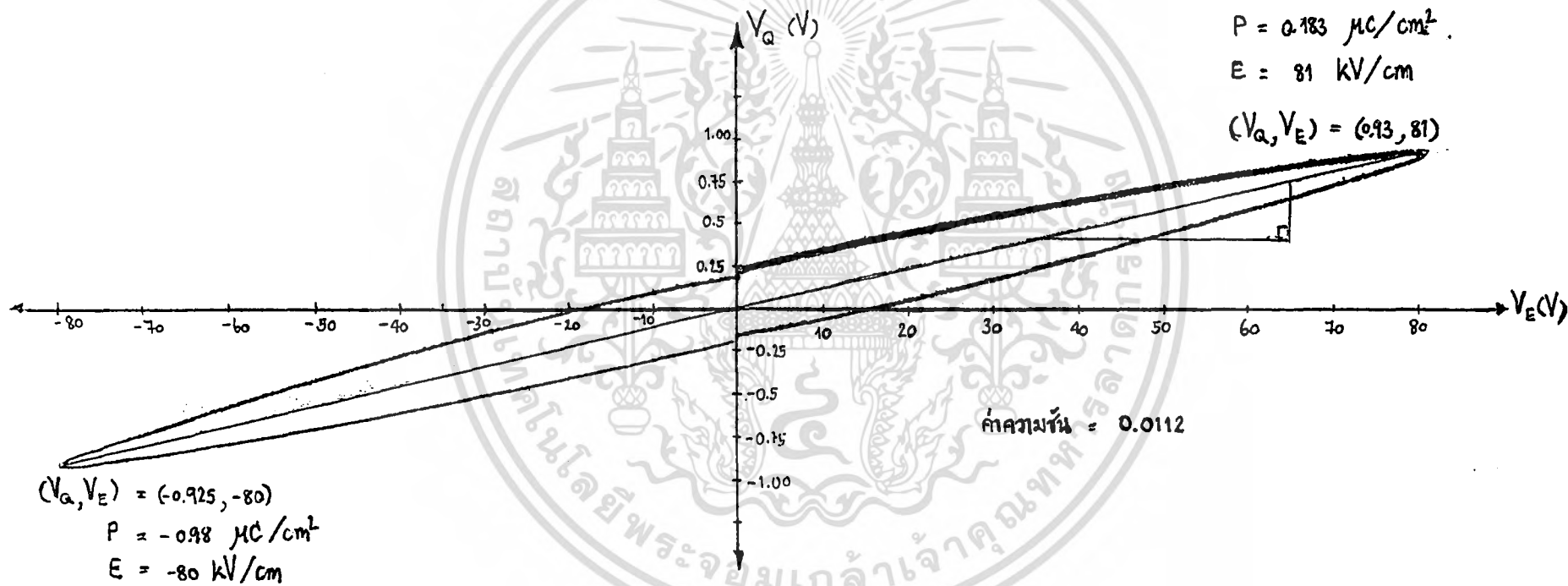
$$\text{แรงดันเต็มสเกล } V_0 \text{ มีค่า } 1 \text{ V} = \text{ค่าประจุ } Q \text{ มีค่า } 3.33 * 10^{-6} \text{ C}$$

$$\text{แรงดันเต็มสเกล } V_0 \text{ มีค่า } 0.25 \text{ V} = \text{ค่าประจุ } Q \text{ มีค่า } 0.8325 * 10^{-6} \text{ C} \quad \dots(4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 P-E Hysteresis Loop ของอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (PZT)



รูปที่ 4.4 P-E Hysteresis Loop ของแบเรียมทิตานेट

เพราะฉะนั้นความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.3 จะทำให้เราสามารถคำนวณค่าประจุ Q ตรงตำแหน่งที่เราต้องการได้

ในส่วนแกน X ซึ่งหมายถึงสนามไฟฟ้า E ที่ป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก โดยตัวบັນทิกผลจะทำการบັນทิกเป็นแรงดัน V_E จะสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการ 4.1

$$E = \frac{V_E}{d} \quad \dots(4.1)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของสารเพียโซอิเล็กทริก

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า E ตรงตำแหน่งที่เราต้องการทราบได้

การคำนวณผลที่ได้จาก P-E Hysteresis Loop

เนื่องจากผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะได้ผลเพียงแค่ Minor Hysteresis Loop ของสารทั้งสองเท่านั้น ดังนั้นในการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เป็นสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัวจึงไม่สามารถทำได้ ในส่วนการคำนวณนี้จึงทำเพียงแค่การคำนวณหาค่าความชันของแกนของ Minor Hysteresis Loop ที่ได้เท่านั้น เพื่อนำเอาค่าความชันที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับสมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริกของสารทั้งสอง

1. PZT ที่ใช้ทำเป็นอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer)

$$\text{ความชันของแกน Minor Hysteresis Loop} = \frac{(0.7 - 0.4) (V)}{(59 - 34) (V)} = 0.0120$$

2. แบเรียมทิตาเนต ($BaTiO_3$)

$$\text{ความชันของแกน Minor Hysteresis Loop} = \frac{(0.75 - 0.4) (V)}{(65 - 34) (V)} = 0.0112$$

จากค่าความชันของแกน Minor Hysteresis Loop ที่ได้ เป็นค่าที่บอกถึงการตอบสนองของสาร (การเกิดโพลาริเซชัน) ต่อสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก จากผลการคำนวณ พบว่า ค่าความชันที่ได้จาก PZT ที่ใช้ทำอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์มากกว่าค่าที่ได้จากแบเรียมทิตาเนต เราจึงสามารถทำการวิเคราะห์ได้ว่า PZT ที่ใช้ทำเป็นอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ตอบสนองต่อการป้อนสนามไฟฟ้าได้ดีกว่าแบเรียมทิตาเนต คือ เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันมากกว่าและมีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกดีกว่าแบเรียมทิตาเนต

4.3 การวิเคราะห์ผลจาก P-E Hysteresis Loop

พิจารณาจากสมการแสดงความสัมพันธ์ของ Loop ที่อยู่บนพื้นฐานของวงจร Sawyer-Tower (ดังสมการ 2.28)

$$\frac{dV_y}{dV_x} = \frac{A \epsilon \epsilon_0}{CS} \quad \dots(4.2)$$

- เมื่อ $\frac{dV_y}{dV_x}$ คือ ค่าความชันของแกนกราฟ
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง (m²)
 - ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวอย่าง
 - ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในอากาศ = $8.85 \cdot 10^{-12}$ (Farad/m)
 - C คือ ความจุของเครื่องมือ (Farad)
 - S คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (m)

จากสมการที่ (4.2) สามารถสรุปค่าตัวแปรของสารแต่ละตัวได้ดังนี้

	PZT	BaTiO ₃
พื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง (m ²)	$0.6361 \cdot 10^{-4}$	$3.1416 \cdot 10^{-4}$
ความหนาของสารตัวอย่าง (m)	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารตัวอย่าง	1300-1700	100-1800
ค่าความชันของแกนกราฟ	0.012	0.0112

นำค่าตัวแปรต่าง ๆ ของ PZT แทนลงในสมการ (4.2) เพื่อคำนวณหาค่าความจุของเครื่องมือ จะได้

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{A \epsilon \epsilon_0}{\frac{dV_y}{dV_x} S} \\
 &= \frac{0.6361 \cdot 10^{-4} \cdot 1700 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}{0.0120 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \\
 &= 7.975 \cdot 10^{-6} \text{ F}
 \end{aligned}$$

นำค่าความจุที่คำนวณได้แทนลงในสมการ (4.2) ในกรณีของ BaTiO₃ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ BaTiO₃ ต่อไป จะได้

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{dV_y}{dV_x} \frac{CS}{A\varepsilon_0} \\ &= 0.0112 * \frac{7.975 * 10^{-6} * 10 * 10^{-6}}{3.1416 * 10^{-4} * 8.85 * 10^{-12}} \\ &= 1586.66\end{aligned}$$

ทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BaTiO₃ ทางทฤษฎีกับค่าที่คำนวณได้พบว่าไม่ถูกต้องนัก แต่ก็อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ การที่ค่าที่คำนวณได้ไม่ถูกต้อง เนื่องจากข้อผิดพลาดที่เกิดจากวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความหนาของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับไมโครเมตรซึ่งหากผิดพลาดไปก็จะส่งผลต่อค่าที่คำนวณได้เป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ยังมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารที่นำมาใช้เป็นค่าที่ประมาณจากค่าที่เป็นช่วง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากในปัจจุบันสารเพียโซอิเล็กทริกเป็นสารที่มีความสำคัญในวงการอุตสาหกรรม ความต้องการในการตรวจวัดคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกจาก Hysteresis Loop จึงเพิ่มมากขึ้น แต่ในปัจจุบันเครื่องมือดังกล่าวนี้มีราคาสูงมาก ดังนั้นจึงต้องหาทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น โดยหากพิจารณาจากหลักการพื้นฐานของคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในกรณีของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับแล้ว พบว่าจะสามารถนำไปสู่การสร้างเครื่องมือตรวจวัดคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกให้มีราคาต่ำลงได้

ในโครงการพิเศษนี้ได้นำหลักการของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับมาสร้างเป็นเครื่องมือตรวจวัดคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก หรือก็คือ P-E Hysteresis Loop Tracer นั่นเอง กล่าวคือ เมื่อทำการป้อนสนามไฟฟ้าความเข้มสูงให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรเซชันขึ้นภายในเนื้อสาร จากหลักการดังกล่าวนี้เราได้ทำการพิจารณาการป้อนสนามไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของแรงดัน และโพลาไรเซชันในรูปของประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นภายในเนื้อสาร ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองนี้จะแสดงอยู่ในรูปของ Hysteresis Loop ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สามารถบอกถึงคุณสมบัติของสารแต่ละชนิดได้

เมื่อพิจารณา Hysteresis Loop ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นพบว่าเป็นเพียง Minor Hysteresis Loop เท่านั้น และจาก Minor Loop นี้สามารถบอกได้ว่าสารเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบมีการโพลาไรเซชันตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่ให้ได้ดีเพียงไร เหตุที่วัดได้เฉพาะ Minor Loop เนื่องจากแรงดันที่จ่ายให้กับสารมีค่าไม่สูงทำให้ค่าของสนามไฟฟ้าไม่เข้มพอที่จะทำให้เกิด Major Hysteresis Loop ขึ้น นั่นคือไม่สามารถที่จะหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ เช่น P_s (spontaneous polarization) , E_c (coercive field) ได้ อย่างไรก็ตามผู้จัดทำได้นำค่าความชันของแกน Minor Loop เข้าแทนค่าในสมการความสัมพันธ์ของ Loop บนพื้นฐานของวงจร Sawyer-Tower แล้วพบว่าสามารถคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่างได้ แต่ค่าดังกล่าวนี้มีได้เป็นค่าที่ถูกต้องนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดและข้อผิดพลาดหลายประการที่เกิดขึ้น

1. ความสามารถของ Electrometer ในการวัดค่าประจุ ไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น และขีดจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ กล่าวคือ เมื่อป้อนแรงดันที่มีค่าสูงขึ้นมา ๆ ประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำก็จะ

มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเกิดสเกลที่ Electrometer และตัวบันทึกผลจะสามารถรับได้ และที่แรงดันสูงนี้อาจทำให้ Electrometer เสียหายเนื่องจากผลของกระแสได้

2. ข้อจำกัดของเครื่องบันทึกผลที่ไม่สามารถรับค่าแรงดันอินพุทได้เกิน 50 V แต่ในทางทดลองเราสามารถป้อนแรงดันเกินกว่า 50 V ได้เนื่องจากมีตัวต้านทานแบ่งแรงดันมายังตัวบันทึกผล

3. ความสมบูรณ์และความสามารถของวงจรที่สร้างขึ้นไม่สามารถทนต่อแรงดันสูงมาก ๆ ได้ กล่าวคือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แผ่นลายวงจร ที่ใช้ในวงจรที่สร้างขึ้นไม่สามารถทนแรงดันสูงมาก ๆ (พิจารณาใน order ของกิโลโวลท์)

4. ค่าพารามิเตอร์ของสารตัวอย่างบางค่าที่ใช้ในการคำนวณ ได้มาจากการประมาณค่ามิได้ เป็นค่าที่ถูกต้อง

ฯลฯ

5.2 แนวทางการพัฒนา

จากการศึกษาและปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงการพิเศษในหัวข้อ "P-E HYSTERESIS LOOP TRACER" นี้ ทำให้ผู้จัดทำเกิดแนวความคิดในการปรับปรุงคุณภาพของ Tracer ที่สร้างให้ดีขึ้น และใคร่ขอแนะนำเพื่อเป็นแนวทางต่อผู้ที่สนใจหรือต้องการศึกษาและพัฒนาให้เครื่องมือวัดนี้สามารถใช้งานได้จริงในวงการอุตสาหกรรม

1. การปรับปรุงช่วงของการวัดประจุของ Electrometer ให้สามารถวัดได้ในช่วงกว้างขึ้น กล่าวคือ เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นการไหลของประจุของสารเพียโซอิเล็กทริกก็จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหาก Electrometer สามารถวัดประจุได้ในช่วงกว้างก็จะสามารถวัด Major Hysteresis Loop ได้
2. การออกแบบลายวงจรตลอดจนปรับปรุงวงจรให้ใช้งานที่แรงดันสูงขึ้นได้
3. การปรับปรุงส่วนของวงจรสลับขั้วอัตโนมัติให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
4. เนื่องจากสารเพียโซอิเล็กทริกบางชนิดจำเป็นต้องใช้แรงดันในการขับสูง ดังนั้นการพัฒนาอาจสร้างให้เครื่อง "P-E HYSTERESIS LOOP TRACER" สามารถจ่ายแรงดันสูงขึ้นกว่านี้ และเพื่อความปลอดภัยอาจใช้การเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ในส่วนของการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

ภาคผนวก

ตาราง I แสดงสัญลักษณ์และค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัดสารเพียโซอิเล็กทริก

Symbols

Symbol	Description	Units
C	Capacitance	farad
d_{ij}	Piezoelectric constant	$m / V \equiv \text{coul} / N$
d_i	Inner diameter	meter (inch)
dia	Diameter	meter (inch)
d_m	Mean diameter $(d_o + d_i) / 2$	meter (inch)
d_o	Outer diameter	meter (inch)
E	Electric field	V / m
ϵ_o	Permittivity of space (8.85×10^{-12})	farad / meter
F	Force	Newton
f_m	Frequency of minimum impedance	Hz
f_n	Frequency of maximum impedance	Hz
g_{ij}	Piezoelectric constant	$Vm \ N \equiv m^2 / \text{coul}$
h	Height	meter (inch)
k_{ij}	Electromechanical coupling coefficient	
K	Relative dielectric constant	
l	Length	meter (inch)
N	Frequency constant	Hz m (KHz·inch)
n	Number	
ρ	Density	kg m ³
P	Pressure	N m ²
Q_m	Mechanical Q	
$\tan \delta$	Dielectric loss factor	
S	Strain	m m
s	Elastic compliance coefficient	m ² N
T	Stress	N m ²
t	Thickness	meter (inch)
V	Voltage	volt
w	Width	meter (inch)
Y	Modulus of elasticity	N m ²
Z_m	Impedance at f_m	ohms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง II แสดงโหมดการสั่น , ระยะเวลาจัด และแรงดันเอาท์พุท

ในกรณีของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ทิศทางของพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกหรือการตอบสนองจะขึ้นอยู่กับ การจัดเรียงตัวของแนวแกนการ poling การจัดเรียงตัวนี้จะกำหนดทิศทางของการทำงานหรือการตอบสนอง เพื่ออธิบายถึงทิศทางต่าง ๆ นี้ เราจะพิจารณาแกน Orthogonal โดย 1 สอดคล้องกับแกน X , 2 สอดคล้องกับแกน Y และ 3 สอดคล้องกับแกน Z โดยทั่วไปแล้วทิศทางของการโพลาริเซชันจะถูกกำหนดในลักษณะของ 3 แกน ในเทอม 4, 5 และ 6 จะหมายถึง Shear Mode ลักษณะต่าง ๆ

โดยทั่วไปจะพิจารณาสมการในตาราง I เพื่อประมาณค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r หรือ f_o) ค่าความจุตลอดจนค่าระยะเวลาจัด (ΔL , ΔW , Δr , Δthk : เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง) หรือแรงดัน L, W, r, thk, OD และ ID หมายถึง ความยาว, ความกว้าง, รัศมี, ความหนา, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ตามลำดับ F หมายถึง แรงที่เราจ่ายให้กับระบบในหน่วย Newtons ส่วนพจน์ต่าง ๆ ที่เหลือ (N , K , d และ g) ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่แสดงสมบัติดังที่กำหนดในตาราง I ค่าต่าง ๆ ที่ใส่ลงในสูตรเหล่านี้จะต้องอยู่ในหน่วย MKS (meters , Volts และ Farads)

ตาราง III ตารางแสดงการเปลี่ยนหน่วยวัดค่าคงที่

การเปลี่ยนแปลงหน่วยนี้ทำขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงข้อสับสนที่เกิดขึ้นของการใช้หน่วยการวัดรูปร่างของสารเพียโซอิเล็กทริกที่ต่างกันไป นอกจากนี้หน่วยการวัดแล้วยังรวมถึงหน่วยเชิงมุม, เชิงเส้น, พื้นที่ และปริมาตร : แรง, ทอร์ก, แรงดันและความหนาแน่น : และค่าอิมพีแดนซ์เชิงกลที่ยุ่งยาก

ค่าคงที่พื้นฐานต่าง ๆ นี้ใช้ในตาราง

$$1 \text{ เมตร} = 39.37 \text{ นิ้ว}$$

$$1 \text{ ปอนด์} = 453592 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดโลก} = 9.80665 \text{ m.s}^{-2}$$

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ } 4^\circ \text{ C} = 999.973 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ } 0^\circ \text{ C} = 13595.1 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำทะเลที่อุณหภูมิ } 0^\circ \text{ C} = 1028 \text{ kg.m}^{-3}$$

ตาราง II แสดงโหมดการสั่น , ระยะขจัด และแรงดันเอาต์พุต

Shape	Axes	Polarization Direction	Applied Field	Mode of Vibration or Displacement	Applied Stress
Plate					
Thin Disc					
Ring					
Tube					
Hemisphere					
Shear Plates					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เผยแพร่ (Stress or Strain indicated by subscript 5)
 ไม่วารณัติใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามคัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency	Capacitance	(Static) Displacement	(Static) Voltage
$F_r = \frac{N_1}{L \text{ or } W}$ $F_r = \frac{N_{33}}{thk}$	$Cap = \frac{K_{33}^T \epsilon_0 L W}{thk}$	$\Delta W = \frac{d_{31} V W}{thk}$ $\Delta L = \frac{d_{31} V L}{thk}$ $\Delta thk = d_{33} V$	$V = \frac{g_{31} F_1}{W}$ $V = \frac{g_{31} F_2}{L}$ $V = \frac{g_{33} F_3 thk}{L W}$
$F_r = \frac{N_p}{OD}$ $F_r = \frac{N_{33}}{thk}$	$Cap = \frac{K_{33}^T \epsilon_0 \pi r^2}{thk}$	$\Delta r = \frac{2d_{31} V r}{thk}$ $\Delta thk = d_{33} V$	$V = \frac{g_{31} F_1}{2\pi r}$ $V = \frac{g_{33} F_3 thk}{\pi r^2}$
$F_r = \frac{N_b}{(OD-ID)}$ $F_r = \frac{N_{33}}{thk}$	$Cap = \frac{K_{33}^T \epsilon_0 \pi (OD^2-ID^2)}{4thk}$	$\Delta r = \frac{d_{31} V (OD-ID)}{2thk}$ $\Delta thk = d_{33} V$	$V = \frac{g_{31} F_1}{2\pi (OD-ID)}$ $V = \frac{4g_{33} F_3 thk}{\pi (OD^2-ID^2)}$
$F_r = \frac{N_1}{L}$ $F_r = \frac{2N_{33}}{(OD-ID)}$ $F_r = \frac{2N_c}{(OD+ID)}$	$Cap = \frac{K_{33}^T \epsilon_0 \pi L (OD+ID)}{(OD-ID)}$	$\Delta L = \frac{2d_{31} V L}{(OD-ID)}$ $\Delta r = d_{33} V$	$V = \frac{g_{31} F_1 (OD-ID)}{L (OD+ID)}$ $V = \frac{g_{32} F_3 (OD-ID)}{2 (OD^2-ID^2)}$
$F_r = \frac{2N_1}{(OD-ID)}$ $F_r = \frac{2N_p}{(OD+ID)}$	$Cap = \frac{K_{33}^T \epsilon_0 \pi (OD+ID)^2}{4(OD-ID)}$	$\Delta thk = d_{33} V$ $\Delta r = \frac{2d_{31} V r}{thk}$	n/a n/a
NB F_r (sphere) $\approx 0.8 \times F_r$ (hemisphere)			
$F_r = \frac{N_s}{thk}$	$Cap = \frac{K_{33}^T \epsilon_0 L W}{thk}$	$\Delta L = d_{31} V$	$V = \frac{g_{15} F_{15}}{W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วาทกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง III ตารางแสดงการเปลี่ยนหน่วยวัดค่าคงที่

LENGTH

Multiply Number of BY To Obtain ↓						
	Millimetres	Centimetres	Metres	Thou	Inches	Feet
Millimetres	1	10	10 ³	2.540·10 ⁻²	2.540·10	3.048·10 ²
Centimetres	10 ⁻¹	1	10 ²	2.540·10 ⁻³	2.540	2.048·10
Metres	10 ⁻³	10 ⁻²	1	2.540·10 ⁻⁵	2.540·10 ⁻²	3.048·10 ⁻¹
Thou	3.937·10	3.937·10 ²	3.937·10 ⁴	1	10 ³	1.200·10 ⁴
Inches	3.937·10 ⁻²	3.937·10 ⁻¹	3.937·10	10 ⁻³	1	1.200·10
Feet	3.281·10 ⁻³	3.281·10 ⁻²	3.281	8.333·10 ⁻⁵	8.333·10 ⁻²	1

INVERSE LENGTH

Multiply Number of BY To Obtain ↓						
	X Per Millimetre	X Per Centimetre	X Per Metre	X Per Thou	X Per Inch	X Per Foot
X Per Millimetre	1	10 ⁻¹	10 ⁻³	3.937·10	3.937·10 ⁻²	3.281·10 ⁻³
X Per Centimetre	10	1	10 ⁻²	3.937·10 ²	3.937·10 ⁻¹	3.281·10 ⁻²
X Per Metre	10 ³	10 ²	1	3.937·10 ⁴	3.937·10	3.281
X Per Thou	2.540·10 ⁻³	2.540·10 ⁻²	2.540·10 ⁻⁵	1	10 ³	8.333·10 ⁻⁵
X Per Inch	2.540·10	2.540	2.540·10 ⁻²	10 ³	1	8.333·10 ⁻²
X Per Foot	3.048·10 ²	3.048·10	3.048·10 ⁻¹	1.200·10 ⁴	1.200·10	1

AREA

Multiply Number of BY To Obtain ↓						
	Square Millimetres	Square Centimetres	Square Metres	Circular Thou	Square Inches	Square Feet
Square Millimetres	1	10 ²	10 ⁶	5.067·10 ⁻²	6.452·10 ²	9.290·10 ⁴
Square Centimetres	10 ⁻²	1	10 ⁴	5.067·10 ⁻⁶	6.452	9.290·10 ²
Square Metres	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	1	5.067·10 ⁻¹⁰	6.452·10 ⁻⁴	9.290·10 ⁻²
Circular Thou	1.973·10 ³	1.973·10 ⁵	1.973·10 ⁹	1	1.273·10 ⁶	1.833·10 ⁸
Square Inches	1.550·10 ³	1.550·10 ¹	1.550·10 ³	7.854·10 ⁻⁷	1	1.440·10 ²
Square Feet	1.076·10 ⁵	1.076·10 ¹	1.076·10	5.454·10 ⁻⁹	6.944·10 ³	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับให้ครูใช้ในงานเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ควรที่จะนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVERSE AREA

Multiply Number of BY To Obtain ↓						
	X Per Square Millimetre	X Per Square Centimetre	X Per Square Metre	X Per Circular Thou	X Per Square Inch	X Per Square Foot
X Per Square Millimetre	1	10 ⁻²	10 ⁻⁶	1.973·10 ³	1.550·10 ⁻³	1.076·10 ⁻⁵
X Per Square Centimetre	10 ²	1	10 ⁻⁴	1.973·10 ⁵	1.550·10 ⁻¹	1.076·10 ⁻³
X Per Square Metre	10 ⁶	10 ⁴	1	1.973·10 ⁹	1.550·10 ³	1.076·10
X Per Circular Thou	5.067·10 ⁻⁴	5.067·10 ⁻⁶	5.067·10 ⁻¹⁰	1	7.854·10 ⁻⁷	5.454·10 ⁻⁹
X Per Square Inch	6.452·10 ²	6.452	6.452·10 ⁻⁴	1.273·10 ⁶	1	6.944·10 ⁻³
X Per Square Foot	9.290·10 ⁴	9.290·10 ²	9.290·10 ⁻²	1.833·10 ⁶	1.440·10 ²	1

ANGULAR MEASURE

Multiply Number of BY To Obtain ↓				
	Seconds	Minutes	Degrees	Radians
Seconds	1	6.000·10	3.600·10 ³	2.063·10 ⁵
Minutes	1.667·10 ⁻²	1	6.000·10	3.438·10 ³
Degrees	2.778·10 ⁻⁴	1.667·10 ⁻²	1	5.730·10
Radians	4.848·10 ⁻⁶	2.909·10 ⁻⁴	1.745·10 ⁻²	1

INVERSE ANGULAR MEASURE

Multiply Number of BY To Obtain ↓				
	X Per Second	X Per Minute	X Per Degree	X Per Radian
X Per Second	1	1.667·10 ⁻²	2.778·10 ⁻⁴	4.848·10 ⁻⁶
X Per Minute	6.000·10	1	1.667·10 ⁻²	2.909·10 ⁻⁴
X Per Degree	3.600·10 ³	6.000·10	1	1.745·10 ²
X Per Radian	2.063·10 ⁵	3.438·10 ³	5.730·10	1

VOLUME

Multiply Number of BY To Obtain ↓				
	Cubic Centi- metres	Cubic Metres	Cubic Inches	Cubic Feet
Cubic Centimetres	1	10 ⁶	1.639·10	2.832·10 ⁴
Cubic Metres	10 ⁻⁶	1	1.639·10 ⁻⁵	2.832·10 ⁻²
Cubic Inches	6.102·10 ⁻²	6.102·10 ⁴	1	1.728·10 ³
Cubic Feet	3.531·10 ⁻⁵	3.531·10	5.787·10 ⁻⁴	1

INVERSE VOLUME

Multiply Number of BY To Obtain ↓				
	X Per Cubic Centi- metre	X Per Cubic Metre	X Per Cubic Inch	X Per Cubic Foot
X Per Cubic Centimetre	1	10 ⁻⁶	6.102·10 ⁻²	3.315·10 ⁻⁵
X Per Cubic Metre	10 ⁶	1	6.102·10 ⁴	3.531·10
X Per Cubic Inch	1.639·10	1.639·10 ⁻⁵	1	5.787·10 ⁻⁴
X Per Cubic Foot	2.832·10 ⁴	2.832·10 ⁻²	1.728·10 ³	1

FORCE

Multiply Number of BY To Obtain ↓						
	Dynes	Newtons	Grams	Kilograms	Ounces	Pounds
Dynes	1	10^5	$9.807 \cdot 10^2$	$9.807 \cdot 10^5$	$2.780 \cdot 10^4$	$4.448 \cdot 10^5$
Newtons	10^{-5}	1	$9.807 \cdot 10^{-3}$	9.807	$2.780 \cdot 10^{-1}$	4.448
Grams	$1.020 \cdot 10^{-3}$	$1.020 \cdot 10^2$	1	10^3	$2.835 \cdot 10$	$4.536 \cdot 10^2$
Kilograms	$1.020 \cdot 10^{-6}$	$1.020 \cdot 10^{-1}$	10^{-3}	1	$2.835 \cdot 10^{-2}$	$4.536 \cdot 10^{-1}$
Ounces	$3.597 \cdot 10^{-5}$	3.597	$3.527 \cdot 10^{-2}$	$3.527 \cdot 10$	1	$1.600 \cdot 10$
Pounds	$2.248 \cdot 10^{-6}$	$2.248 \cdot 10^{-1}$	$2.205 \cdot 10^{-3}$	2.205	$6.250 \cdot 10^{-2}$	1

INVERSE FORCE

Multiply Number of BY To Obtain ↓						
	X Per Dyne	X Per Newton	X Per Gram	X Per Kilogram	X Per Ounce	X Per Pound
X Per Dyne	1	10^5	$1.020 \cdot 10^{-3}$	$1.020 \cdot 10^{-6}$	$3.597 \cdot 10^{-5}$	$2.248 \cdot 10^{-6}$
X Per Newton	10^{-5}	1	$1.020 \cdot 10^2$	$1.020 \cdot 10^{-1}$	3.597	$2.248 \cdot 10^{-1}$
X Per Gram	$9.807 \cdot 10^2$	$9.807 \cdot 10^{-3}$	1	10^{-3}	$3.527 \cdot 10^{-2}$	$2.205 \cdot 10^{-3}$
X Per Kilogram	$9.807 \cdot 10^5$	9.807	10^3	1	$3.527 \cdot 10$	2.205
X Per Ounce	$2.780 \cdot 10^4$	$2.780 \cdot 10^{-1}$	$2.835 \cdot 10$	$2.835 \cdot 10^{-2}$	1	$6.250 \cdot 10^{-2}$
X Per Pound	$4.448 \cdot 10^5$	4.448	$4.536 \cdot 10^2$	$4.536 \cdot 10^{-1}$	$1.600 \cdot 10$	1

TORQUE

Multiply Number of BY To Obtain ↓						
	Dyne Centimetres	Newton Metre	Gram Centimetres	Kilogram Metres	Ounce Inches	Pound Feet
Dyne Centimetres	1	10^7	$9.807 \cdot 10^2$	$9.807 \cdot 10^7$	$7.062 \cdot 10^4$	$1.356 \cdot 10^7$
Newton Metres	10^{-7}	1	$9.807 \cdot 10^{-5}$	9.807	$7.062 \cdot 10^{-3}$	1.356
Gram Centimetres	$1.020 \cdot 10^{-3}$	$1.020 \cdot 10^4$	1	10^5	$7.201 \cdot 10$	$1.383 \cdot 10^4$
Kilogram Metres	$1.020 \cdot 10^{-6}$	$1.020 \cdot 10^{-1}$	10^{-5}	1	$7.201 \cdot 10^{-4}$	$1.383 \cdot 10^{-1}$
Ounce Inches	$1.416 \cdot 10^{-5}$	$1.416 \cdot 10^2$	$1.389 \cdot 10^{-2}$	$1.389 \cdot 10^3$	1	$1.920 \cdot 10^{-2}$
Pound Feet	$7.376 \cdot 10^{-8}$	$7.376 \cdot 10^{-1}$	$7.233 \cdot 10^{-5}$	7.233	$5.208 \cdot 10^{-3}$	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม้มีการแก้ไข ทั้งต้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVERSE TORQUE

Multiply Number of BY To Obtain ↓	→					
	X Per Dyne Centimetre	X Per Newton Metre	X Per Gram Centimetre	X Per Kilogram Metre	X Per Ounce Inch	X Per Pound Foot
X Per Dyne Centimetre	1	10^7	$1.020 \cdot 10^3$	$1.020 \cdot 10^6$	$1.416 \cdot 10^5$	$7.376 \cdot 10^8$
X Per Newton Metre	10^7	1	$1.020 \cdot 10^4$	$1.020 \cdot 10^7$	$1.416 \cdot 10^2$	$7.376 \cdot 10^1$
X Per Gram Centimetre	$9.807 \cdot 10^2$	$9.807 \cdot 10^5$	1	10^5	$1.389 \cdot 10^2$	$7.233 \cdot 10^5$
X Per Kilogram Metre	$9.807 \cdot 10^7$	9.807	10^5	1	$1.389 \cdot 10^3$	7.233
X Per Ounce Inch	$7.062 \cdot 10^4$	$7.062 \cdot 10^3$	$7.201 \cdot 10$	$7.201 \cdot 10^4$	1	$5.208 \cdot 10^3$
X Per Pound Foot	$1.356 \cdot 10^7$	1.356	$1.383 \cdot 10^4$	$1.383 \cdot 10^7$	$1.920 \cdot 10^2$	1

PRESSURE

Multiply Number of BY To Obtain ↓	→						
	Dynes Per Square Centimetre	Newtons Per Square Metre	Kilograms Per Square Metre	Pounds Per Square Inch	Centimetres of Mercury @ 0°C	Feet of Fresh Water @ 4°C	Feet of Sea Water* @ 0°C
Dynes Per Square Centimetre	1	10	$9.807 \cdot 10$	$6.895 \cdot 10^4$	$1.333 \cdot 10^4$	$2.989 \cdot 10^4$	$3.073 \cdot 10^4$
Newtons Per Square Metre	10^{-1}	1	9.807	$6.895 \cdot 10^3$	$1.333 \cdot 10^3$	$2.989 \cdot 10^3$	$3.073 \cdot 10^3$
Kilograms Per Square Metre	$1.020 \cdot 10^{-2}$	$1.020 \cdot 10^{-1}$	1	$7.031 \cdot 10^2$	$1.360 \cdot 10^2$	$3.048 \cdot 10^2$	$3.133 \cdot 10^2$
Pounds Per Square Inch	$1.450 \cdot 10^{-5}$	$1.450 \cdot 10^{-4}$	$1.422 \cdot 10^{-3}$	1	$1.934 \cdot 10^{-1}$	$4.335 \cdot 10^{-1}$	$4.457 \cdot 10^{-1}$
Centimetres of Mercury @ 0°C	$7.501 \cdot 10^{-5}$	$7.501 \cdot 10^{-4}$	$7.356 \cdot 10^{-3}$	5.171	1	2.242	2.305
Feet of Fresh Water @ 4°C	$3.346 \cdot 10^{-5}$	$3.346 \cdot 10^{-4}$	$3.281 \cdot 10^{-3}$	2.307	$4.460 \cdot 10^{-1}$	1	1.028
Feet of Sea Water* @ 0°C	$3.254 \cdot 10^{-5}$	$3.254 \cdot 10^{-4}$	$3.191 \cdot 10^{-3}$	2.244	$4.339 \cdot 10^{-1}$	$9.727 \cdot 10^{-1}$	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVERSE PRESSURE

Multiply Number of BY To Obtain ↓							
	X Per Dyne Per Square Centimetre	X Per Newton Per Square Metre	X Per Kilogram Per Square Metre	X Per Pound Per Square Inch	X Per Centimetre Mercury @ 0°C	X Per Foot of Fresh Water @ 4°C	X Per Foot of Sea Water* @ 0°C
X Per Dyne Per Square Centimetre	1	10 ⁻¹	1.020·10 ⁻²	1.450·10 ⁻⁵	7.501·10 ⁻⁵	3.346·10 ⁻⁵	3.254·10 ⁻⁵
X Per Newton Per Square Metre	10	1	1.020·10 ⁻¹	1.450·10 ⁻⁴	7.501·10 ⁻⁴	3.346·10 ⁻⁴	3.254·10 ⁻⁴
X Per Kilogram Per Square Metre	9.807·10	9.807	1	1.422·10 ⁻³	7.356·10 ⁻³	3.281·10 ⁻³	3.191·10 ⁻³
X Per Pound Per Square Inch	6.895·10 ⁴	6.895·10 ³	7.031·10 ²	1	5.171	2.307	2.244
X Per Centimetre of Mercury @ 0°C	1.333·10 ⁴	1.333·10 ³	1.360·10 ²	1.934·10 ⁻¹	1	4.460·10 ⁻¹	4.339·10 ⁻¹
X Per Foot of Fresh Water @ 4°C	2.989·10 ⁴	2.989·10 ³	3.048·10 ²	4.335·10 ⁻¹	2.242	1	9.727·10 ⁻¹
X Per Foot of Sea Water* @ 0°C	3.073·10 ⁴	3.073·10 ³	3.133·10 ²	4.457·10 ⁻¹	2.305	1.028	1

DENSITY

Multiply Number of BY To Obtain ↓						
	Grams Per Cubic Centimetre	Kilograms Per Cubic Metre	Grams Per Cubic Inch	Ounces Per Cubic Inch	Pounds Per Cubic Inch	Pounds Per Cubic Inch
Grams Per Cubic Centimetre	1	10 ⁻³	6.102·10 ⁻²	1.730	2.768·10 ⁻¹	1.602·10 ⁻²
Kilograms Per Cubic Metre	10 ³	1	6.102·10	1.730·10 ³	2.768·10 ⁴	1.602·10
Grams Per Cubic Inch	1.639·10	1.639·10 ²	1	2.835·10	4.536·10 ²	2.625·10 ⁻¹
Ounces Per Cubic Inch	5.780·10 ⁻¹	5.780·10 ⁻⁴	3.527·10 ⁻²	1	1.600·10	9.259·10 ⁻³
Pounds Per Cubic Inch	3.613·10 ²	3.613·10 ⁵	2.205·10 ⁻³	6.250·10 ²	1	5.787·10 ⁻⁴
Pounds Per Cubic Foot	6.243·10	6.243·10 ²	3.810	1.080·10 ²	1.728·10 ³	1

COMPLIANCE

Multiply Number of BY To Obtain ↓			
	Centimetres Per Dyne	Metron (Metres Per Newton)	Inches Per Ounce
Centimetre Per Dyne	1	10 ³	9.136 x 10 ⁻⁵
Metron (Metres Per Newton)	10 ³	1	9.136 x 10 ⁻²
Inches Per Ounce	1.095 x 10 ⁻⁴	1.095 x 10 ⁻¹	1

LINEAR MECHANICAL IMPEDANCE

Multiply Number of BY To Obtain ↓			
	Dynes Per Centimetre Per Second	Newtons Per Metre Per Second	Ounces Per Inch Per Second
Dynes Per Centimetre Per Second	1	10 ³	1.095 x 10 ⁴
Newtons Per Metre Per Second	10 ⁻³	1	1.095 x 10
Ounces Per Inch Per Second	9.136 x 10 ⁻⁵	9.136 x 10 ⁻²	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่เปิดเผยใดๆ ทั้งนี้คือทั้งหมดที่ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารอย่างอิสระโดยไม่มีข้อผูกมัดใดๆ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LM124, LM224,
LM324, LM324A
LM2902**

**QUAD DIFFERENTIAL
INPUT
OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUIT

QUAD LOW POWER OPERATIONAL AMPLIFIERS

The LM124 Series are low-cost, quad operational amplifiers with true differential inputs. These have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. The quad amplifier can operate at supply voltages as low as 3.0 Volts or as high as 32 Volts with quiescent currents about one fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

- Short Circuited Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 to 32 Volts
- Low Input Bias Currents: 100 nA Max (LM324A)
- Four Amplifiers Per Package
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Industry Standard Pinouts



J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 632



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646
(LM224, LM324,
LM2902 Only)



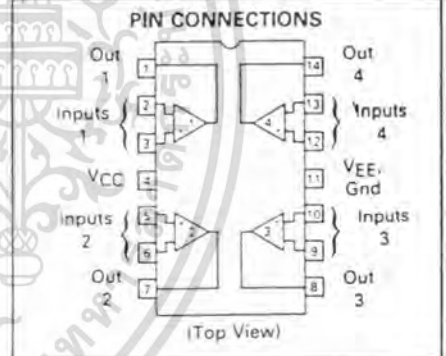
D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751A
(SO-14)

MAXIMUM RATINGS ($T_A = -25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	LM124 LM224 LM324A	LM2902	Unit
Power Supply Voltages				Vdc
Single Supply	V_{CC}	32	26	
Split Supplies	V_{CC}, V_{EE}	± 16	± 13	
Input Differential Voltage Range (1)	V_{IDR}	± 32	± 26	Vdc
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICR}	-0.3 to 32	-0.3 to 26	Vdc
Input Forward Current (2) ($V_I < -0.3\text{ V}$)	I_{IF}	50		mA
Output Short Circuit Duration	t_S	Continuous		
Junction Temperature	T_J	175		$^\circ\text{C}$
Ceramic Package		150		
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150		$^\circ\text{C}$
Ceramic Package		-55 to +125		
Plastic Packages				
Operating Ambient Temperature Range	T_A			$^\circ\text{C}$
LM124		-55 to +125	—	
LM224		-25 to +85	—	
LM324		0 to +70	—	
LM324A		0 to +70	—	
LM2902		—	-40 to -105	

NOTES:

- (1) Split Power Supplies.
- (2) This input current will only exist when the voltage is negative at any of the input leads. Normal output states will reestablish when the input voltage returns to a voltage greater than -0.3 V .



ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
LM124J	-55 to -125 $^\circ\text{C}$	Ceramic DIP
LM2902D	-40 to -105	SO-14
LM2902N		Plastic DIP
LM2902J	-40 to -85 $^\circ\text{C}$	Ceramic DIP
LM224D	-25 to -85 $^\circ\text{C}$	SO-14
LM224J		Ceramic DIP
LM224N		Plastic DIP
LM324AD	0 to +70 $^\circ\text{C}$	SO-14
LM324AN		Plastic DIP
LM324D		SO-14
LM324J		Ceramic DIP
LM324N		Plastic DIP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM124, LM224, LM324,A, LM2902

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 5.0 V, V_{EE} = Gnd, T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	LM124/LM224		LM324A		LM324		LM2902		Unit	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ		Max
Input Offset Voltage V _{CC} = 5.0 V to 3.0 V (26 V for LM2902), V _{ICR} = 0 V to V _{CC} - 1.7 V, V _O = 1.4 V, R _S = 0 Ω T _A = 25°C T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	V _{IO}	—	2.0	5.0	—	2.0	3.0	7.0	—	7.0	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	ΔV _{IO} /ΔT	—	7.0	—	—	7.0	30	—	—	7.0	μV/°C
Input Offset Current T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	I _{IO}	—	3.0	30	—	5.0	30	50	—	50	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	ΔI _{IO} /ΔT	—	10	—	—	10	300	—	—	10	pA/°C
Input Bias Current T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	I _{IB}	—	90	150	—	45	100	250	—	90	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 2) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), T _A = T _{High} to T _{Low}	V _{ICR}	0	0	28.3	0	—	28.3	0	—	24.3	V
Differential Input Voltage Range	V _{IDR}	—	—	V _{CC}	—	—	V _{CC}	—	—	V _{CC}	V
Large Signal Open-Loop Voltage Gain R _L = 20 kΩ, V _{CC} = 15 V, For Large V _O Swing, T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	AVOL	50	100	—	25	100	—	25	100	—	V/mV
Channel Separation 1.0 kHz, f = 20 kHz, Input Referenced	—	25	—	—	15	—	—	15	—	—	dB
Common-Mode Rejection Ratio R _S = 10 kΩ	CMRR	70	85	—	65	70	—	65	70	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	65	100	—	65	100	—	65	100	—	dB
Output Voltage Range R _L = 2.0 kΩ (R _L = 10 kΩ for LM2902)	V _{OR}	0	—	3.3	0	—	3.3	0	—	3.3	V
Output Voltage — High Limit (T _A = T _{High} to T _{Low}) (Note 1) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), R _L = 2.0 kΩ V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), R _L = 10 kΩ	V _{OH}	26	—	—	26	—	—	26	—	—	V
Output Voltage — Low Limit V _{CC} = 5.0 V, R _L = 10 kΩ, T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	V _{OL}	—	5.0	20	—	5.0	20	—	5.0	20	mV
Output Source Current (V _{ID} = 1.0 V, V _{CC} = 15 V) T _A = 25°C T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	I _O	20	40	—	20	40	—	20	40	—	mA
Output Sink Current (V _{ID} = -1.0 V, V _{CC} = 15 V T _A = 25°C T _A = T _{High} to T _{Low} (Note 1)	I _O	10	20	—	10	20	—	10	20	—	mA
Output Short Circuit to Ground (Note 3) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), V _O = 0 V, R _L = ∞ V _{CC} = 5.0 V, V _O = 0 V, R _L = ∞	I _{OS}	—	40	60	—	40	60	—	40	60	mA
Power Supply Current (I _A = T _{High} to T _{Low}) (Note 1) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), V _O = 0 V, R _L = ∞ V _{CC} = 5.0 V, V _O = 0 V, R _L = ∞	I _{CC}	—	—	3.0	—	1.4	3.0	—	—	3.0	mA

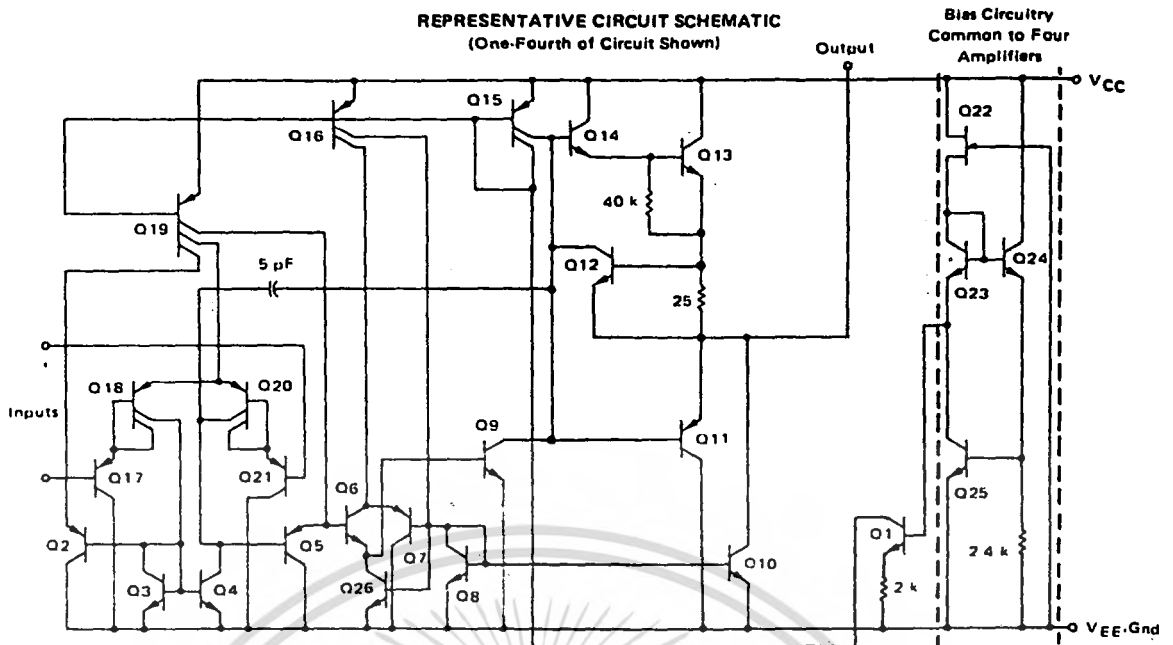
NOTES:

- 1) T_{Low} = -55°C for LM124, -40°C for LM2902, -25°C for LM224, = 0°C for LM324A
T_{High} = -125°C for LM124, -85°C for LM224, -70°C for LM324A, -105°C for LM2902
- 2) The input common-mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common-mode voltage range is V_{CC} - 1.7 V.
- 3) Short circuits from the output to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

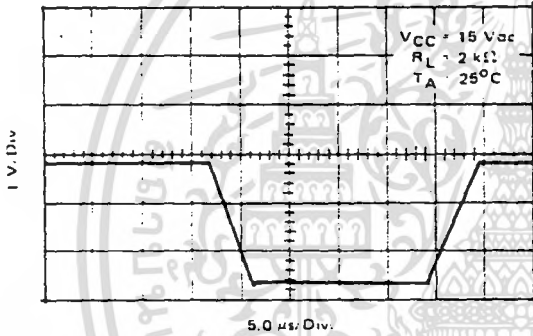


2

REPRESENTATIVE CIRCUIT SCHEMATIC
(One-Fourth of Circuit Shown)



LARGE SIGNAL VOLTAGE FOLLOWER RESPONSE

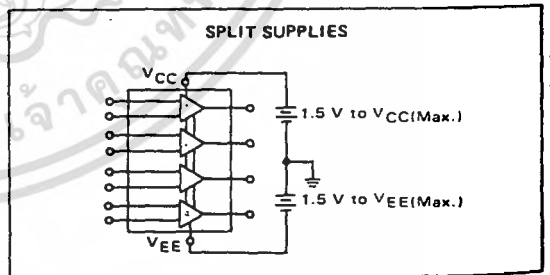
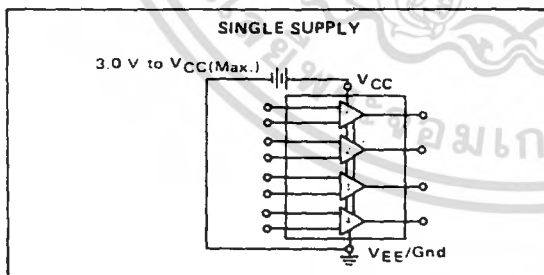


CIRCUIT DESCRIPTION

The LM124 Series is made using four internally compensated, two-stage operational amplifiers. The first stage

of each consists of differential input devices Q20 and Q18 with input buffer transistors Q21 and Q17 and the differential to single ended converter Q3 and Q4. The first stage performs not only the first stage gain function but also performs the level shifting and transconductance reduction functions. By reducing the transconductance a smaller compensation capacitor (only 5 pF) can be employed, thus saving chip area. The transconductance reduction is accomplished by splitting the collectors of Q20 and Q18. Another feature of this input stage is that the input common-mode range can include the negative supply or ground, in single supply operation, without saturating either the input devices or the differential to single-ended converter. The second stage consists of a standard current source load amplifier stage.

Each amplifier is biased from an internal voltage regulator which has a low temperature coefficient thus giving each amplifier good temperature characteristics as well as excellent power supply rejection.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM124, LM224, LM324,A, LM2902

TYPICAL PERFORMANCE CURVES

FIGURE 1 – INPUT VOLTAGE RANGE

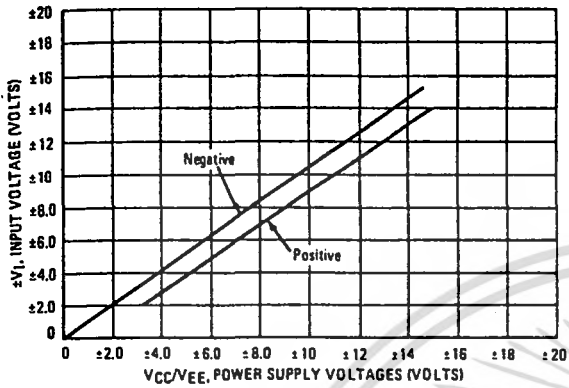


FIGURE 2 – OPEN LOOP FREQUENCY

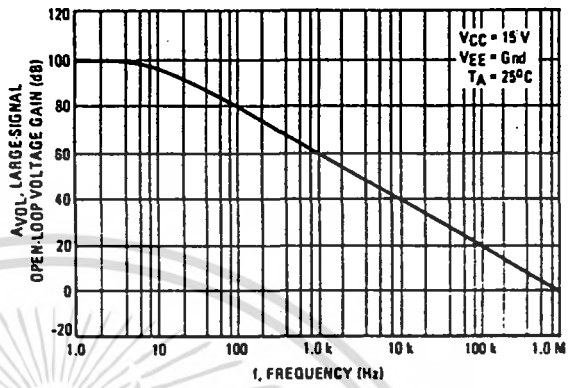


FIGURE 3 – LARGE-SIGNAL FREQUENCY RESPONSE

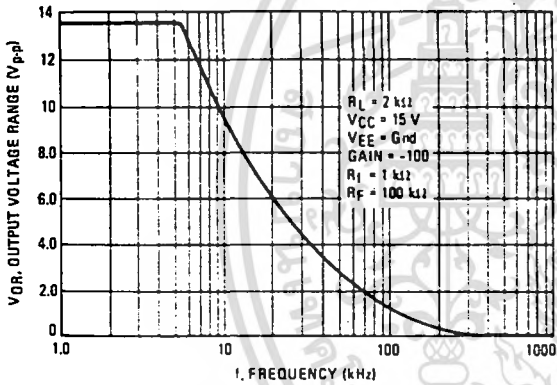


FIGURE 4 – SMALL-SIGNAL VOLTAGE FOLLOWER PULSE RESPONSE (Non-Inverting)

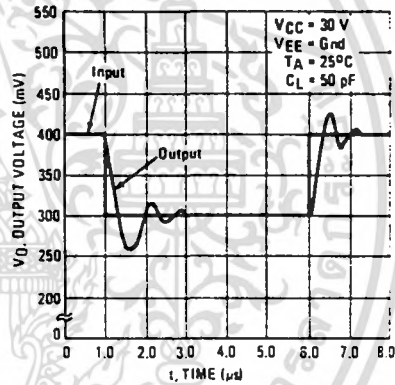


FIGURE 5 – POWER SUPPLY CURRENT versus POWER SUPPLY VOLTAGE

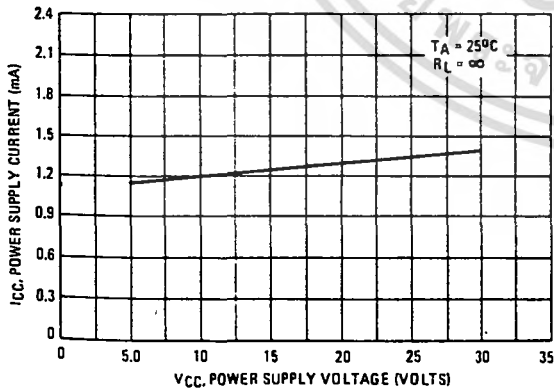
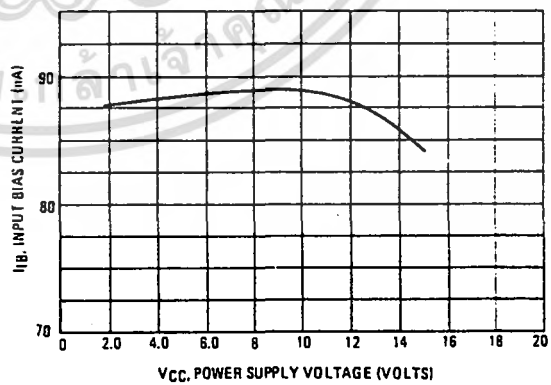


FIGURE 6 – INPUT BIAS CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ/การใช้เฉพาะเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจาก MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATIONS INFORMATION

FIGURE 7 - VOLTAGE REFERENCE

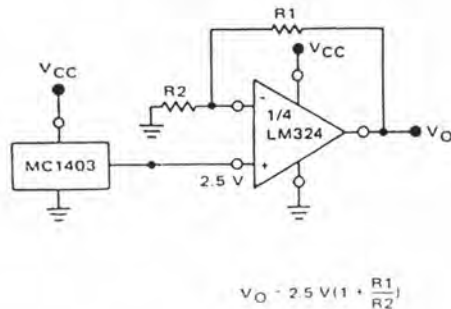


FIGURE 8 - WIEN BRIDGE OSCILLATOR

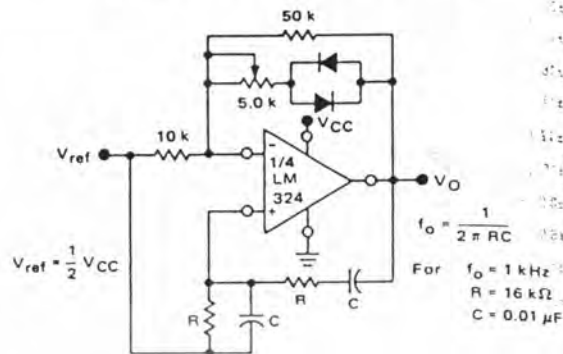


FIGURE 9 - HIGH IMPEDANCE DIFFERENTIAL AMPLIFIER

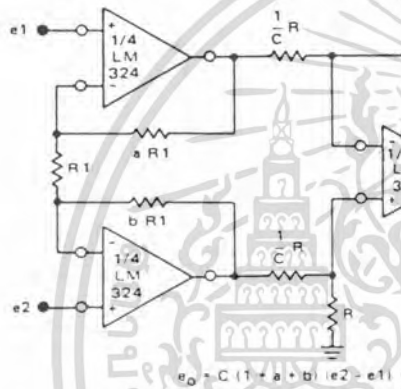


FIGURE 10 - COMPARATOR WITH HYSTERESIS

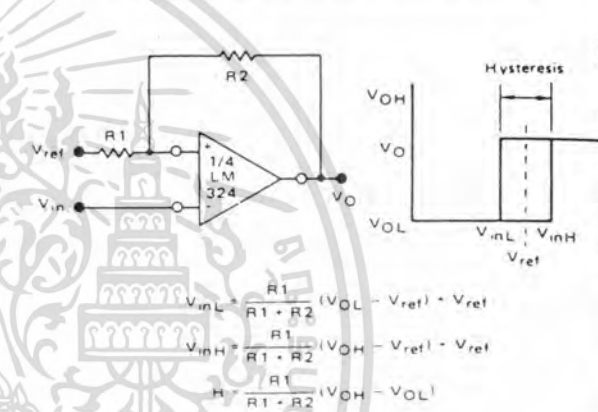
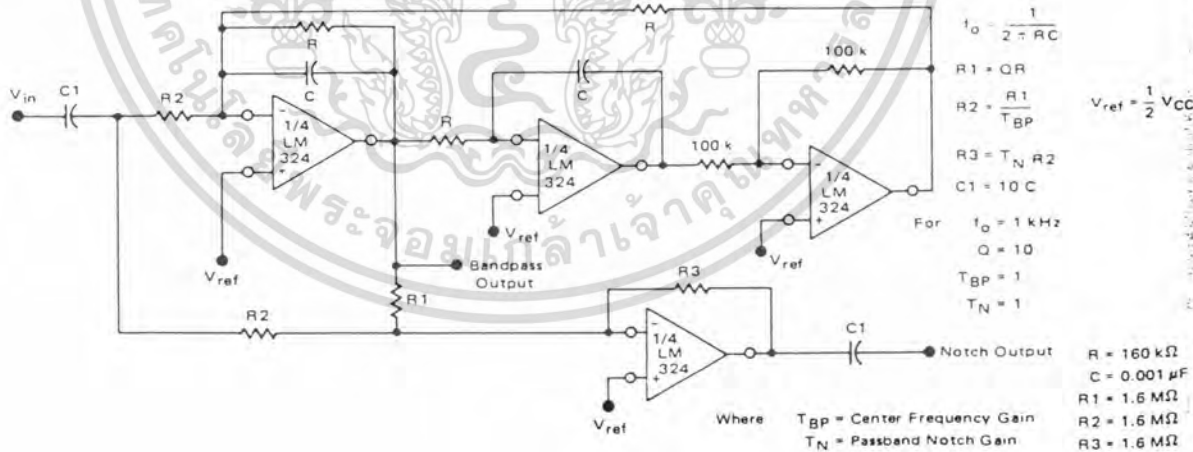


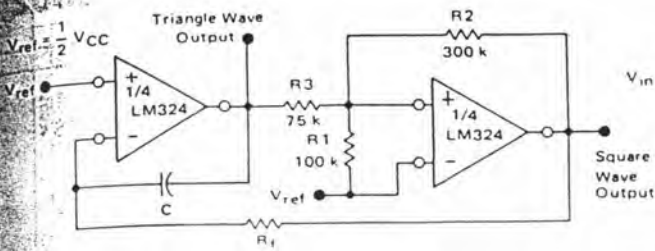
FIGURE 11 - BI-QUAD FILTER



LM124, LM224, LM324,A, LM2902

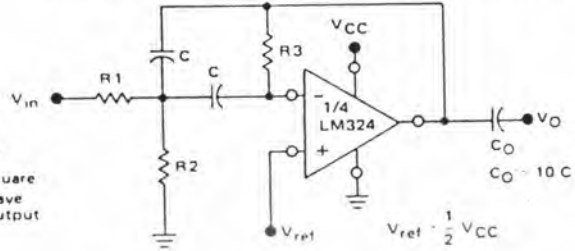
APPLICATIONS INFORMATION (continued)

FIGURE 12 - FUNCTION GENERATOR



$$f = \frac{R_1 \cdot RC}{4 CR_1 R_1} \quad \text{if } R_3 = \frac{R_2 R_1}{R_2 \cdot R_1}$$

FIGURE 13 - MULTIPLE FEEDBACK BANDPASS FILTER



Given f_0 - Center Frequency
 $A(f_0)$ - Gain at Center Frequency

Choose Value $f_0 \cdot C$
 Then

$$R_3 = \frac{Q}{f_0 \cdot C}$$

$$R_1 = \frac{R_3}{2 \cdot A(f_0)}$$

$$R_2 = \frac{R_1 R_3}{4Q^2 - R_1 \cdot R_3}$$

For less than 10% error from operational amplifier

$$Q \cdot f_0 \cdot BW < 0.1 \quad \text{Where } f_0 \text{ and } BW \text{ are expressed in Hz}$$

If source impedance varies, filter may be preceded with voltage follower buffer to stabilize filter parameters



**LF355, LF356,
LF357*, LF355B,
LF356B, LF357B***

**MONOLITHIC JFET
OPERATIONAL AMPLIFIERS**

**SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUITS**

**MONOLITHIC JFET INPUT
OPERATIONAL AMPLIFIERS**

These internally compensated operational amplifiers incorporate highly matched JFET devices on the same chip with standard bipolar transistors. The JFET devices enhance the input characteristics of these operational amplifiers by more than an order of magnitude over conventional amplifiers.

This series of op amps combines the low current characteristics typical of FET amplifiers with the low initial offset voltage and offset voltage stability of bipolar amplifiers. Also, nulling the offset voltage does not degrade the drift or common mode rejection.

- Low Input Bias Current – 30 pA
- Low Input Offset Current – 3.0 pA
- Low Input Offset Voltage – 1.0 mV
- Temperature Compensation of Input Offset Voltage – 3.0 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Low Input Noise Current – 0.01 $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- High Input Impedance – $10^{12}\Omega$
- High Common-Mode Rejection Ratio – 100 dB
- High DC Voltage Gain – 106 dB

SERIES FEATURES

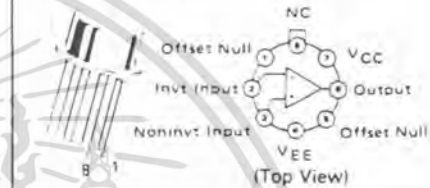
- LF355/355B — Low Power Supply Current
- LF356/356B — Wide Bandwidth
- LF357/357B — Wider Bandwidth Decompensated ($A_{V\text{min}} = 5$)

	LF355/355B	LF356/356B	LF357/357B
Fast Settling Time to 0.01%	4.0 μs	1.5 μs	1.5 μs
Fast Slew Rate	5.0 $\text{V}/\mu\text{s}$	12 $\text{V}/\mu\text{s}$	50 $\text{V}/\mu\text{s}$
Wide Gain Bandwidth	2.5 MHz	5.0 MHz	20 MHz
Low Input Noise Voltage	20 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	12 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	12 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

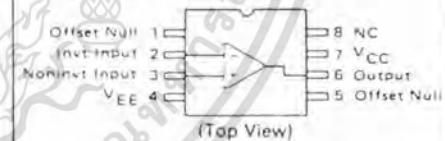
ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
LF355BH,H LF355BJ,J	0 to +70°C	Metal Can Ceramic DIP
LF356H LF356BJ,J		Metal Can Ceramic DIP
LF357BH,H LF357BJ,J		Metal Can Ceramic DIP

**H SUFFIX
METAL PACKAGE
CASE 601**



**J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 693**



APPLICATIONS

The LF series is suggested for all general purpose FET input amplifier requirements where precision and frequency response flexibility are of prime importance.

Specific applications include:

- Sample and Hold Circuits
- High Impedance Buffers
- Fast D/A and A/D Converters
- Precision High Speed Integrators
- Wideband, Low Noise, Low Drift Amplifiers

***NOTE:** The LF357/357B are designed for wider bandwidth applications. They are decompensated ($A_{V\text{min}} = 5$).

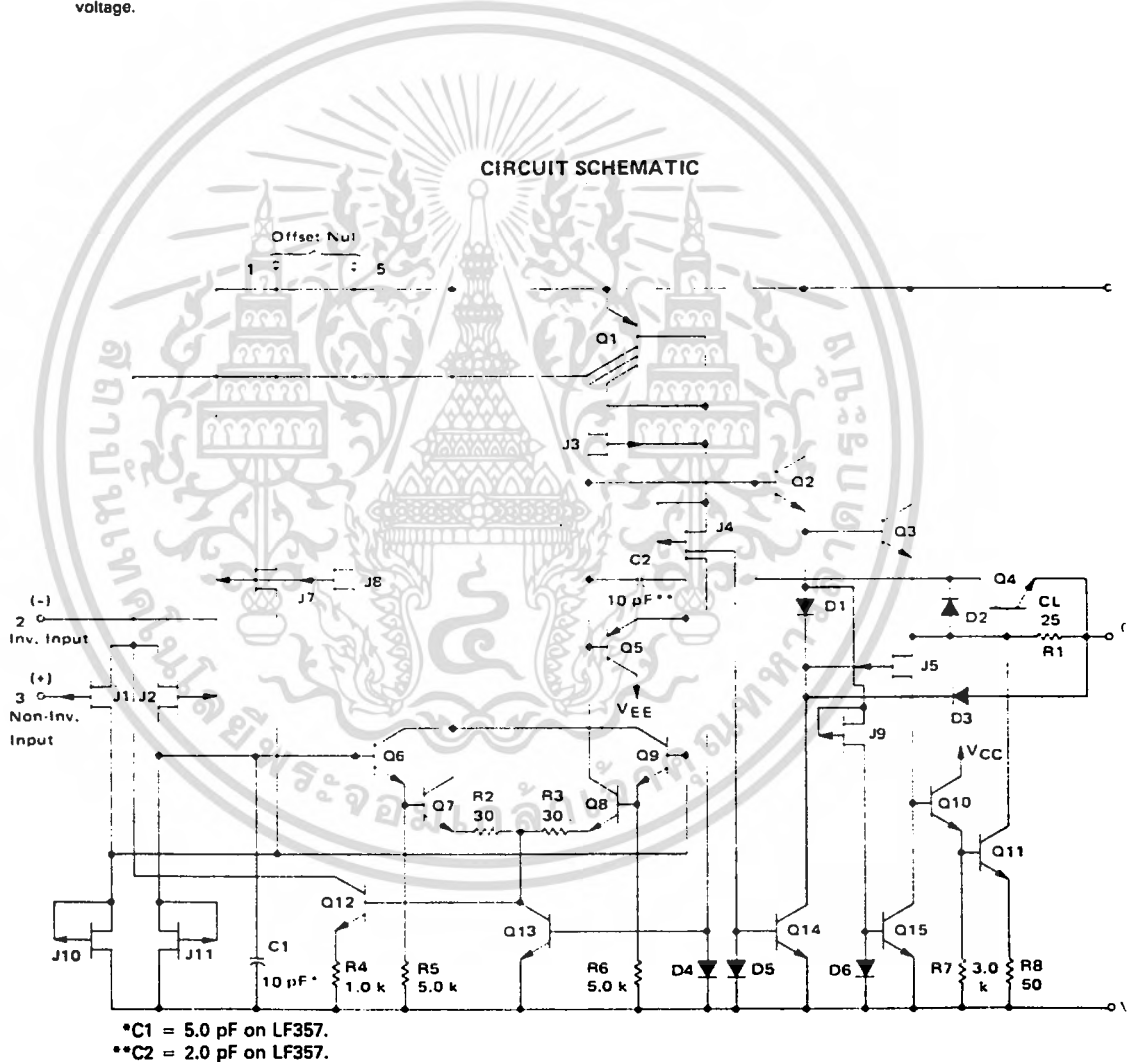
LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

2

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	LF355B/ 356B/357B	LF355/356/357	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	+ 22	- 18	V
	V _{EE}	- 22	- 18	
Differential Input Voltage	V _{ID}	± 40	± 30	V
Input Voltage Range (Note 1)	V _{IDR}	± 20	± 16	V
Output Short-Circuit Duration	T _S	Continuous		
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0 to + 70		°C
Operating Junction Temperature	T _J	150		°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	- 65 to + 150		°C

Note 1. Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 2-18
 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15$ to 20 V, $V_{EE} = -15$ to -20 V for LF355B/356B/357B; $V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V for LF355/356/357; $T_A = 0^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	LF355B/6B/7B			LF355/6/7			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage ($R_S = 50 \Omega$, $V_{CM} = 0$) ($T_A = 25^\circ\text{C}$) (Over Temperature)	V_{IO}	—	3.0	5.0	—	3.0	10	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage ($R_S = 50 \Omega$)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	—	5.0	—	—	5.0	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Change in Average TC with V_{IO} Adjust ($R_S = 50 \Omega$) (Note 2)	$\Delta\text{TC}/\Delta V_{IO}$	—	0.5	—	—	0.5	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ per mV
Input Offset Current ($V_{CM} = 0$) (Note 3) ($T_J = 25^\circ\text{C}$) ($T_J \leq 70^\circ\text{C}$)	I_{IO}	—	3.0	20	—	3.0	50	μA nA
Input Bias Current ($V_{CM} = 0$) (Note 3) ($T_J = 25^\circ\text{C}$) ($T_J \leq 70^\circ\text{C}$)	I_{IB}	—	30	100	—	30	200	μA nA
Input Resistance ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	r_i	—	10^{12}	—	—	10^{12}	—	Ω
Large Signal Voltage Gain ($V_O = \pm 10$ V, $R_L = 2.0$ k, $V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V) ($T_A = 25^\circ\text{C}$) ($0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$)	A_{VOL}	50 25	200 —	— —	25 15	200 —	— —	V/mV
Output Voltage Swing ($V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V, $R_L = 10$ k Ω) ($V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V, $R_L = 2$ k Ω)	V_O	± 12 ± 10	± 13 ± 12	— —	± 12 ± 10	± 13 ± 12	— —	V
Input Common-Mode Voltage Range ($V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V)	V_{ICR}	± 11	$+15.1$ -12.0	—	± 10	-15.1 -12.0	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	85	100	—	80	100	—	dB
Supply Voltage Rejection Ratio (Note 4)	PSRR	85	100	—	80	100	—	dB
Supply Current ($T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V) LF355B 355 LF356B 357B LF356 357	I_D	—	2.0 5.0	4.0 7.0	—	2.0 —	4.0 10	mA

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$)

Characteristic	Symbol	LF355B/355			LF356B/356			LF357B/357			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Slew Rate (Note 5) ($A_V = 1$) LF355/356 ($A_V = 5$) LF357	SR	—	5.0	—	7.5	12	—	—	30	50	$\text{V}/\mu\text{s}$
Gain-Bandwidth Product	GBW	—	2.5	—	5.0	—	—	20	—	—	MHz
Settling Time to 0.01% (Note 6)	t_s	—	4.0	—	1.5	—	—	1.5	—	—	μs
Equivalent Input Noise Voltage ($R_S = 100 \Omega$, $f = 100$ Hz) ($R_S = 100 \Omega$, $f = 1000$ Hz)	e_n	—	25 20	—	15 12	—	—	15 12	—	—	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Equivalent Input Noise Current ($f = 100$ Hz) ($f = 1000$ Hz)	i_n	—	0.01 0.01	—	0.01 0.01	—	—	0.01 0.01	—	—	$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
Input Capacitance	C_i	—	3.0	—	3.0	—	—	3.0	—	—	pF

NOTES

- Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply.
- The temperature coefficient of the adjusted input offset voltage changes only a small amount (0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ typically) for each mV of adjustment from its original unadjusted value. Common-mode rejection and open loop voltage gain are also unaffected by offset adjustment.
- The input bias currents approximately double for every 10°C rise in junction temperature, T_J . Due to limited test time, the input bias currents are correlated to junction temperature. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.
- Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously, in accordance with common practice.
- The Min. slew rate limits apply for the LF356B and the LF357B, but do not apply for the LF356 or LF357.
- Settling time is defined here, for a unity gain inverter connection using 2.0 k resistors for the LF355/6. It is the time required for the error voltage (the voltage at the inverting input pin on the amplifier) to settle to within 0.01% of its final value from the time a 10 V step input is applied to the inverter. For the LF357, $A_V = -5.0$, the feedback resistor from output to input is 2.0 k and the output step is 10 V (see settling time test circuit).

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

2

TYPICAL DC PERFORMANCE CHARACTERISTICS (Curves are for LF355, LF356, and LF357 series unless otherwise specified) INPUT BIAS CURRENT versus CASE TEMPERATURE

FIGURE 1 — (LF355 SERIES)

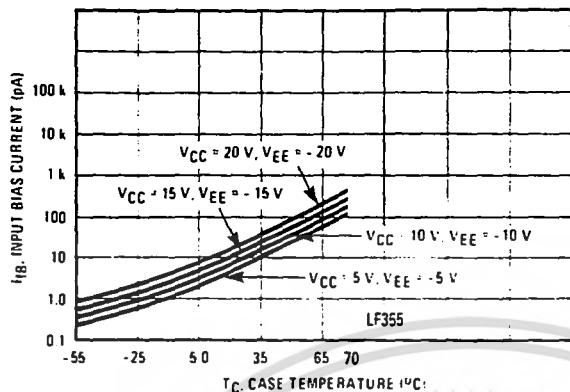


FIGURE 2 — (LF356 AND LF357 SERIES)

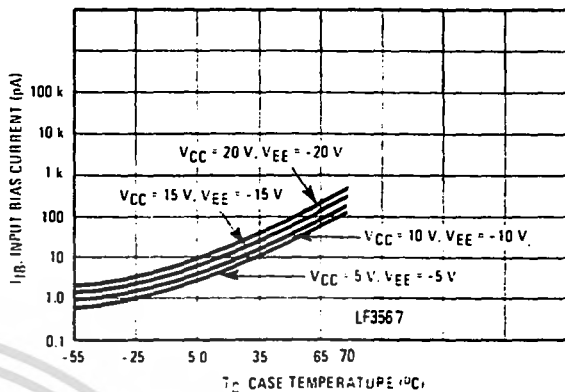


FIGURE 3 — INPUT BIAS CURRENT versus INPUT COMMON-MODE VOLTAGE

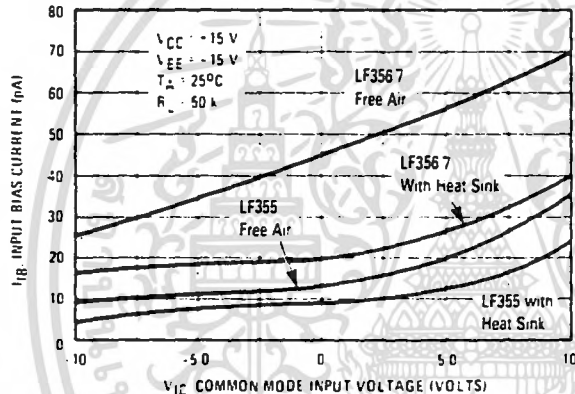
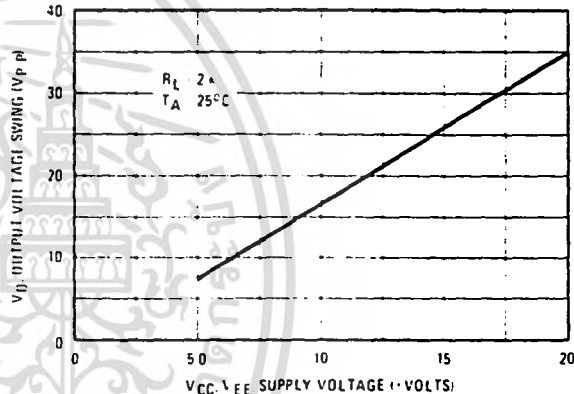


FIGURE 4 — OUTPUT VOLTAGE SWING versus SUPPLY VOLTAGE (LF355B/356B/357B)



SUPPLY CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE

FIGURE 5 — (LF355 SERIES)

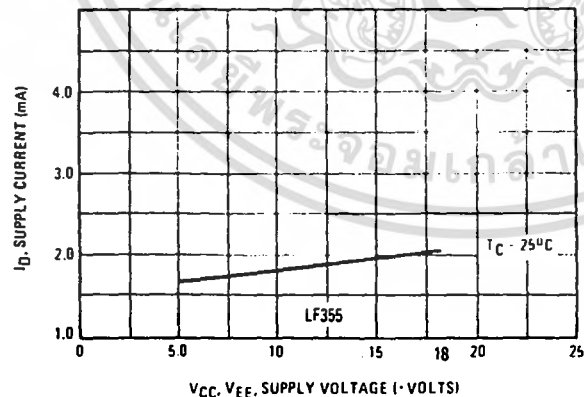
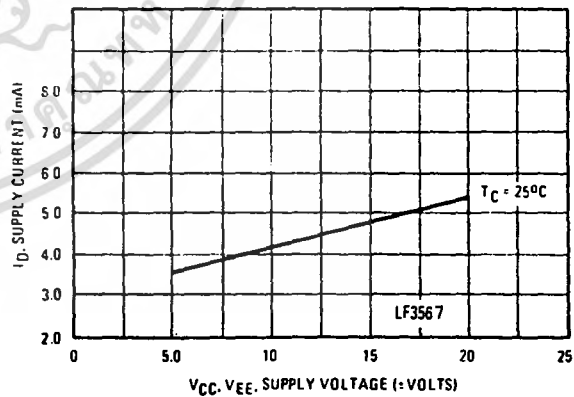


FIGURE 6 — (LF356 AND LF357 SERIES)



TYPICAL DC PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)



FIGURE 7 — NEGATIVE CURRENT LIMIT

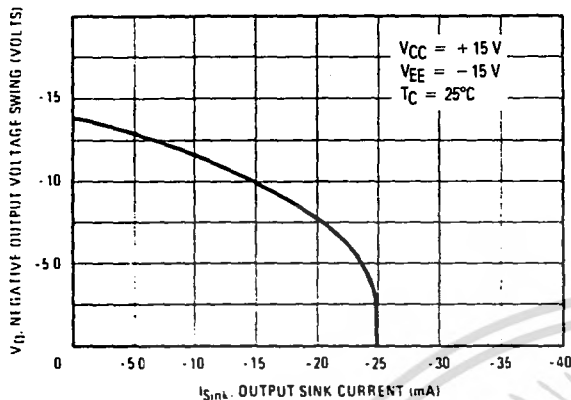


FIGURE 8 — POSITIVE CURRENT LIMIT

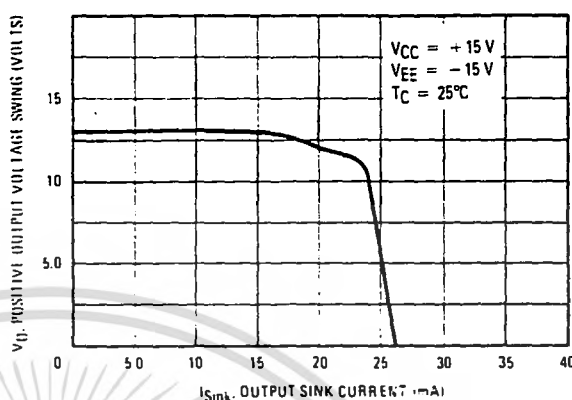


FIGURE 9 — POSITIVE COMMON-MODE INPUT VOLTAGE LIMIT

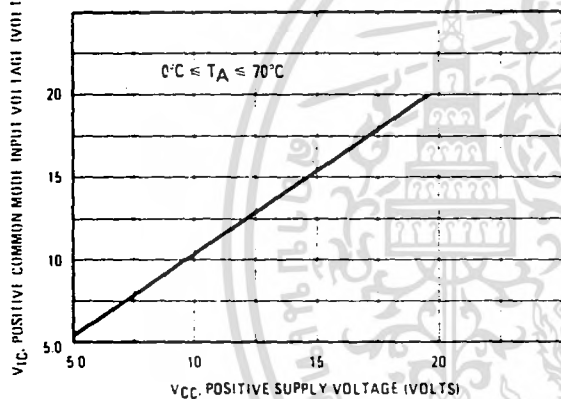


FIGURE 10 — NEGATIVE COMMON-MODE INPUT VOLTAGE LIMIT

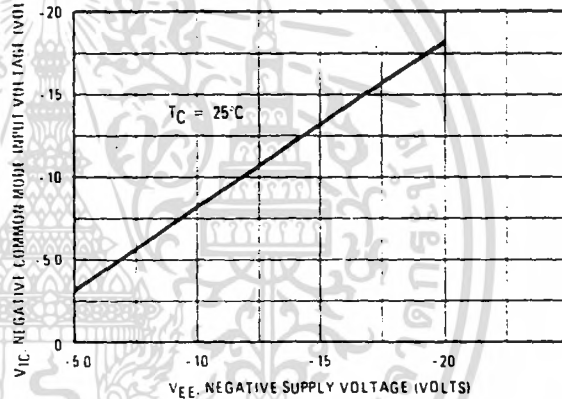


FIGURE 11 — OPEN LOOP VOLTAGE GAIN

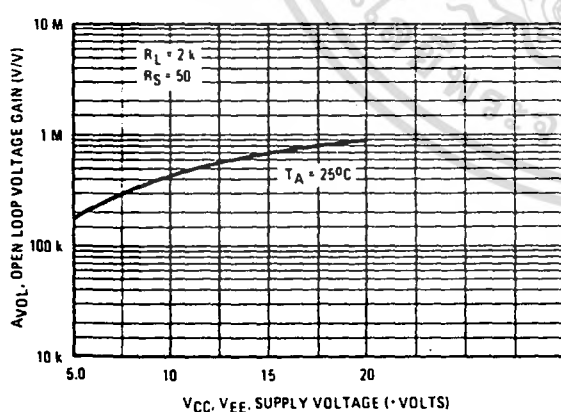
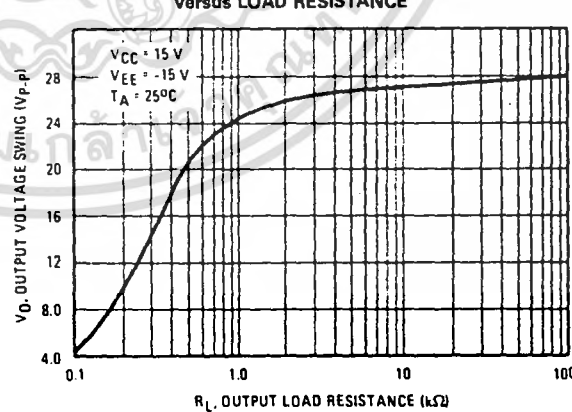


FIGURE 12 — OUTPUT VOLTAGE SWING versus LOAD RESISTANCE



LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

TYPICAL AC PERFORMANCE CHARACTERISTICS

GAIN BANDWIDTH PRODUCT

FIGURE 13 — (LF355 SERIES)

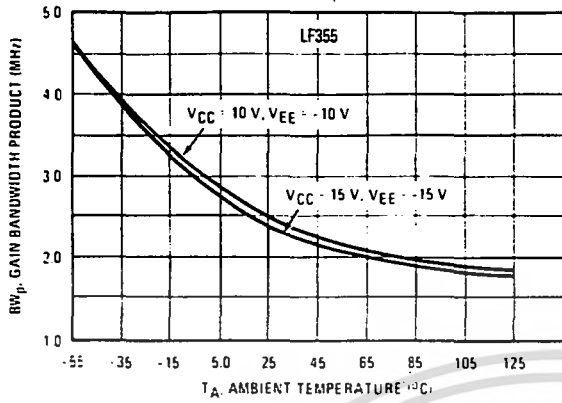
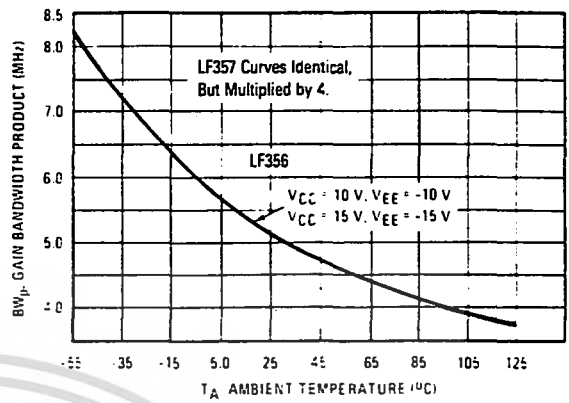


FIGURE 14 — (LF356/357 SERIES)



INVERTER SETTLING TIME

FIGURE 15 — (LF355 SERIES)

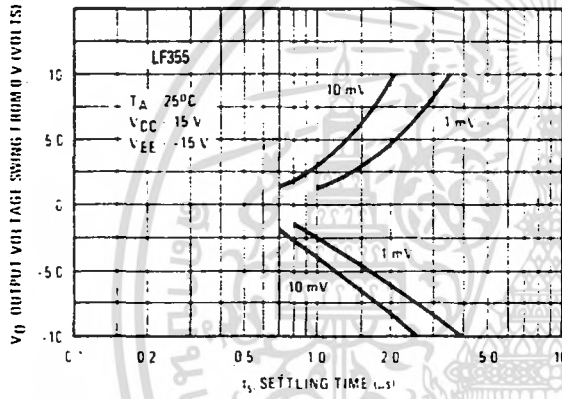


FIGURE 16 — (LF356 AND LF357 SERIES)

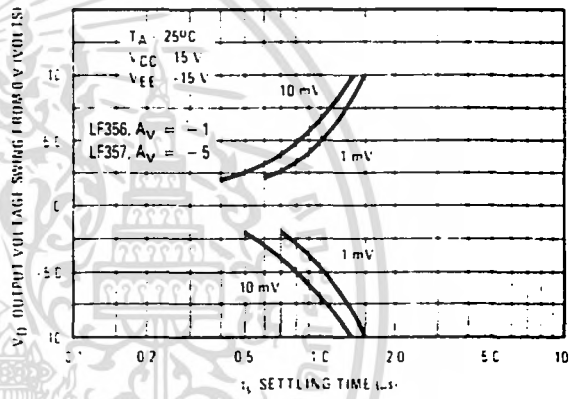


FIGURE 17 — NORMALIZED SLEW RATE

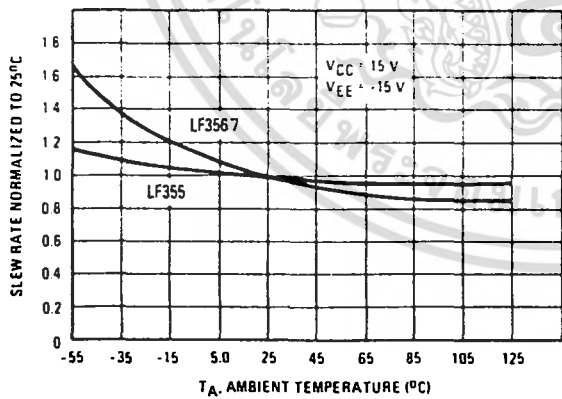
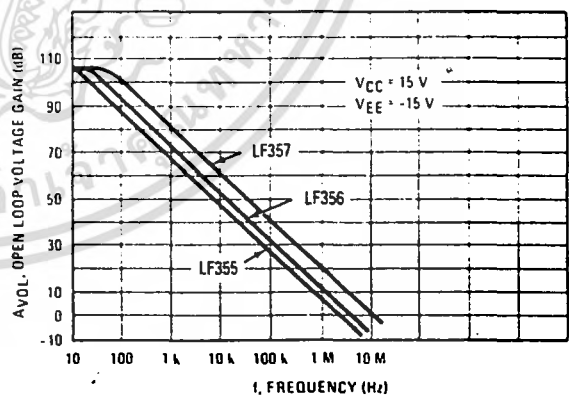


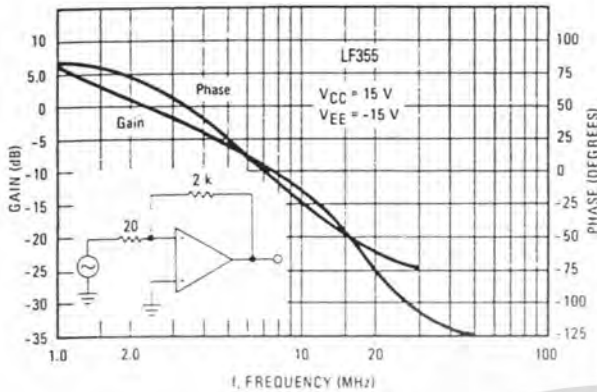
FIGURE 18 — OPEN LOOP FREQUENCY RESPONSE



TYPICAL AC PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

BODE PLOT

FIGURE 19 — (LF355 SERIES)



OUTPUT IMPEDANCE

FIGURE 22 — (LF355 SERIES)

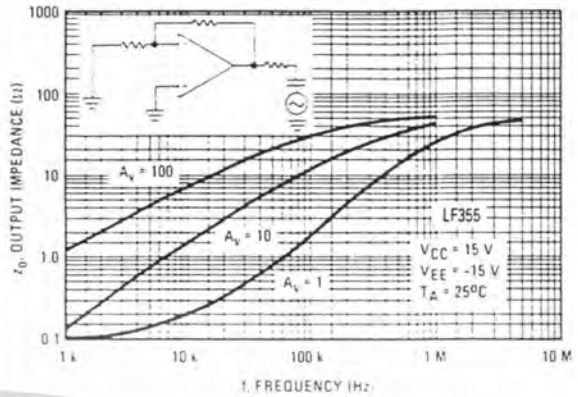


FIGURE 20 — (LF356 SERIES)

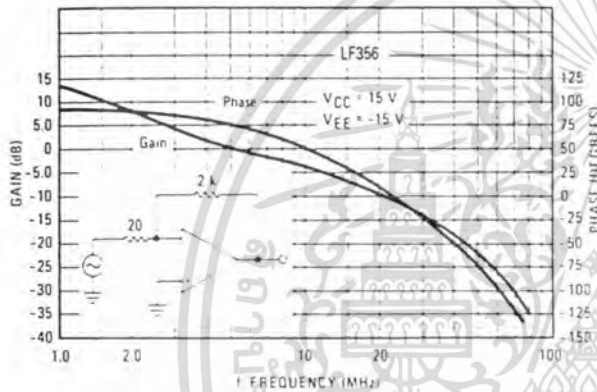


FIGURE 23 — (LF356 SERIES)

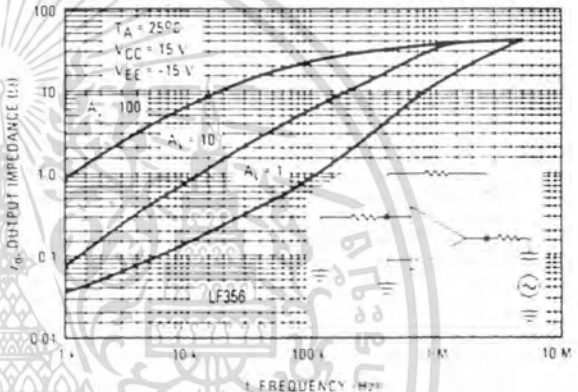


FIGURE 21 — (LF357 SERIES)

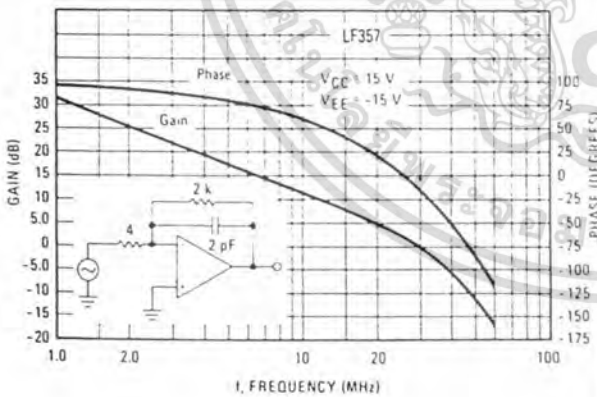
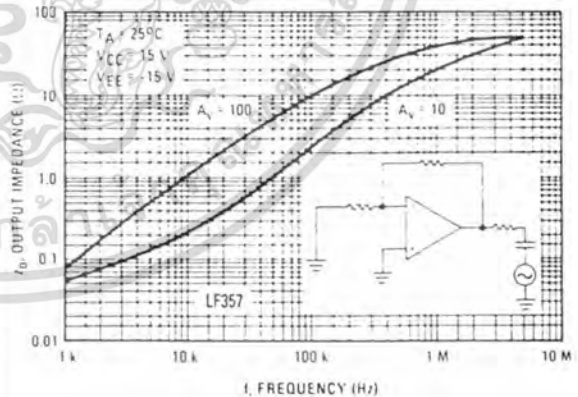


FIGURE 24 — (LF357 SERIES)



LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

TYPICAL AC PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

FIGURE 25 — COMMON-MODE REJECTION RATIO

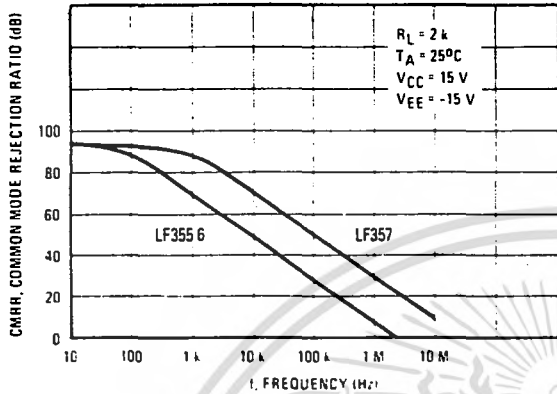
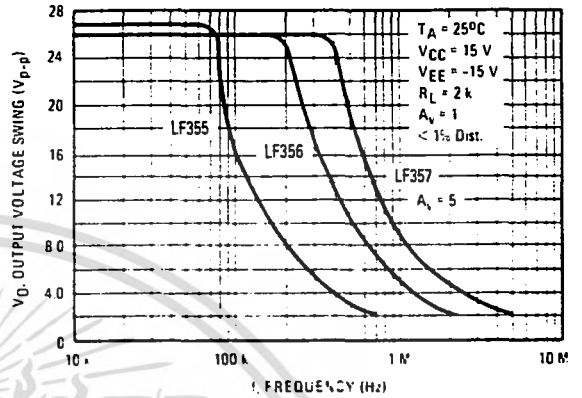


FIGURE 26 — UNDISTORTED OUTPUT VOLTAGE SWING



POWER SUPPLY VOLTAGE REJECTION RATIO

FIGURE 27 — (LF355 SERIES)

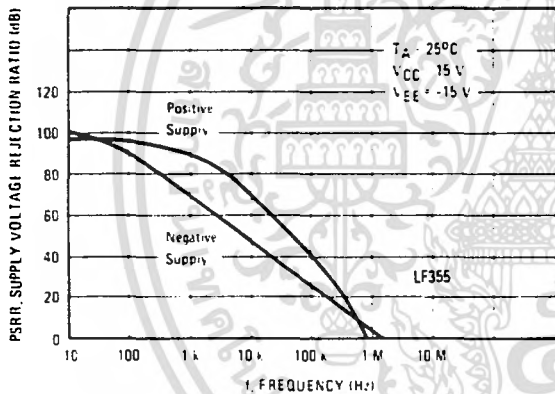
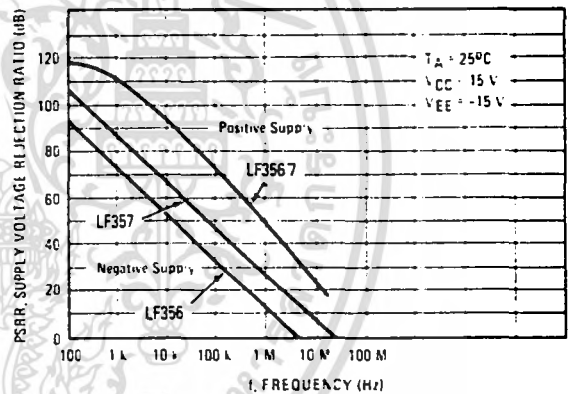


FIGURE 28 — (LF356 AND LF357 SERIES)



EQUIVALENT NOISE VOLTAGE

FIGURE 29 — (LF355/356/357 SERIES)

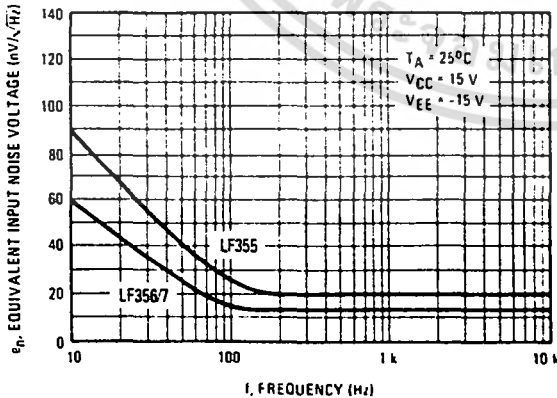
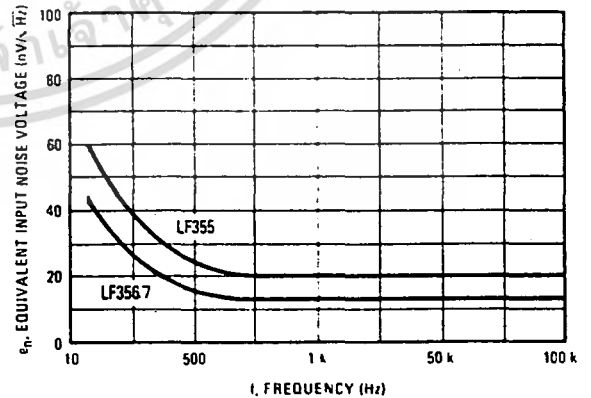


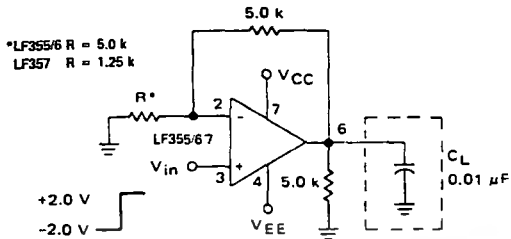
FIGURE 30 (EXPANDED SCALE)



LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

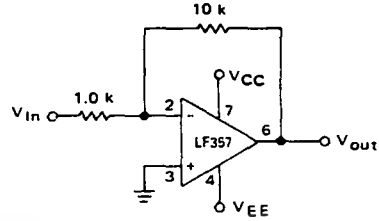
TYPICAL CIRCUIT CONNECTIONS

FIGURE 31 — DRIVING CAPACITIVE LOADS



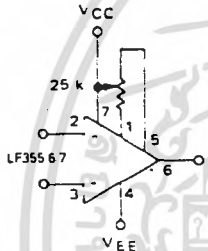
Due to a unique output stage design these amplifiers have the ability to drive large capacitive loads and still maintain stability.
 $C_L(\text{max}) \geq 0.01 \mu\text{F}$.
 Overshoot $\leq 20\%$.
 Settling time (t_s) $\geq 5.0 \mu\text{s}$

FIGURE 32 — LARGE POWER BANDWIDTH AMPLIFIER



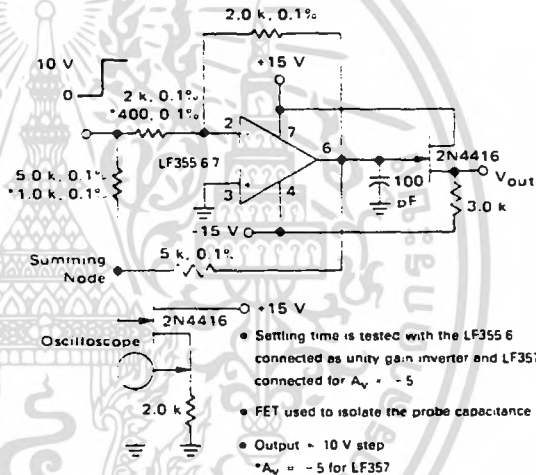
For distortion $< 1\%$ and a 20 V_{p-p} V_{Out} swing, power bandwidth is: 500 kHz.

FIGURE 33 — INPUT OFFSET VOLTAGE ADJUSTMENT



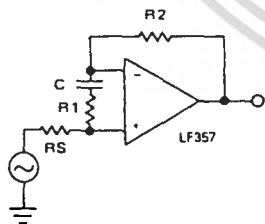
- V_{IO} is adjusted with a 25 k potentiometer
- The potentiometer wiper is connected to V_{CC}
- For potentiometers with temperature coefficient of 100 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ or less the additional drift with adjust is $\approx 0.5 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}/\text{mV}$ of adjustment.
- Typical overall drift: $5.0 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ($0.5 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}/\text{mV}$ of adjustment.)

FIGURE 34 — SETTLING TIME TEST CIRCUIT



- Settling time is tested with the LF355/6 connected as unity gain inverter and LF357 connected for $A_v = -5$
- FET used to isolate the probe capacitance
- Output = 10 V step
- $A_v = -5$ for LF357

FIGURE 35 — NONINVERTING UNITY GAIN OPERATION FOR LF357



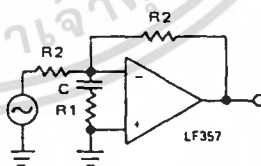
$$R1C \geq \frac{1}{(2\pi)(5 \text{ MHz})}$$

$$R1 = \frac{R2 \cdot R_S}{4}$$

$$A_v(\text{DC}) = 1$$

$$f_{-3\text{dB}} \approx 5 \text{ MHz}$$

FIGURE 36 — INVERTING UNITY GAIN FOR LF357



$$R1C \geq \frac{1}{(2\pi)(5 \text{ MHz})}$$

$$R1 = \frac{R2}{4}$$

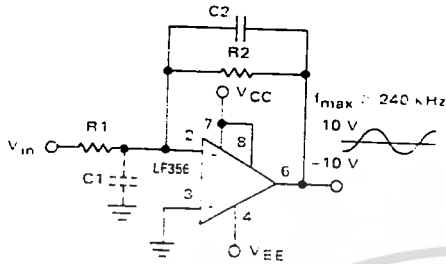
$$A_v(\text{DC}) = -1$$

$$f_{-3\text{dB}} \approx 5 \text{ MHz}$$

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

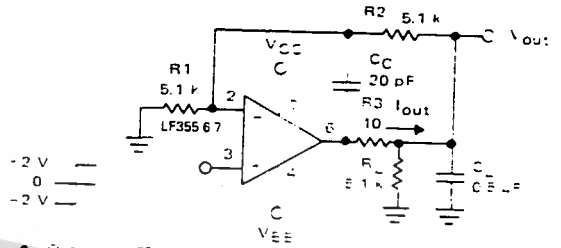
TYPICAL APPLICATIONS

FIGURE 37 — WIDE BW, LOW NOISE, LOW DRIFT AMPLIFIER



- Power BW: $f_{max} = \frac{S_v}{2A_V P} = 240 \text{ kHz}$
- Parasitic input capacitance ($C_i = 3 \text{ pF}$ for LF355, LF356, and LF357) plus any additional layout capacitance interacts with feedback elements and creates undesirable high frequency pole. To compensate add C_2 such that $R_2 C_2 = R_1 C_i$.

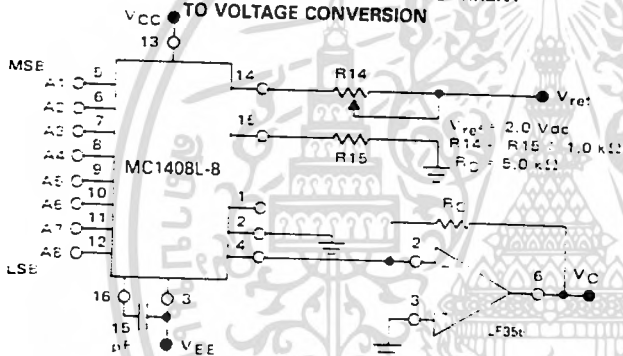
FIGURE 38 — ISOLATING LARGE CAPACITIVE LOADS



- Overshoot: 6%
- $t_r = 10 \mu\text{s}$
- When driving large C_L , the output sink rate is determined by C_L and output max.

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 0.95 \text{ with } C_L \text{ shown}$$

FIGURE 39 — 8-BIT D/A WITH OUTPUT CURRENT TO VOLTAGE CONVERSION



Theoretical V_C

$$V_C = \frac{V_{ref}}{R_{14}} \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \frac{A_3}{8} + \frac{A_4}{16} + \frac{A_5}{32} + \frac{A_6}{64} + \frac{A_7}{128} + \frac{A_8}{256} \right)$$

Adjust V_{ref} , R_{14} or R_{15} so that V_C with all digital inputs at high level is equal to 9.961 volts.

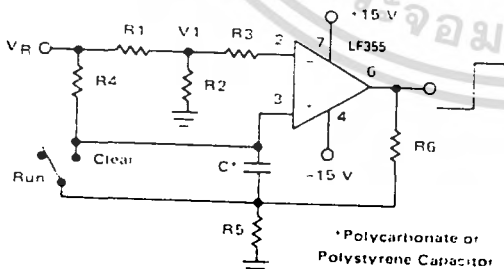
$$V_C = \frac{2V}{1k} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{64} + \frac{1}{128} + \frac{1}{256} \right) = \frac{2V}{10V} \left(\frac{255}{256} \right) = 9.961 \text{ V}$$

FIGURE 40 — PRECISION CURRENT MONITOR



- $V_{in} = R_1 I_{in}$
- R_1, R_2, R_3, C_1 as in Figure 37
- Use LF355 for $I_{in} > 10 \mu\text{A}$
- Common Mode Range is $V_{in} - 1 \text{ V}$ to $V_{in} + 1 \text{ V}$
- Low Supply Current

FIGURE 41 — LONG INTERVAL RC TIMER

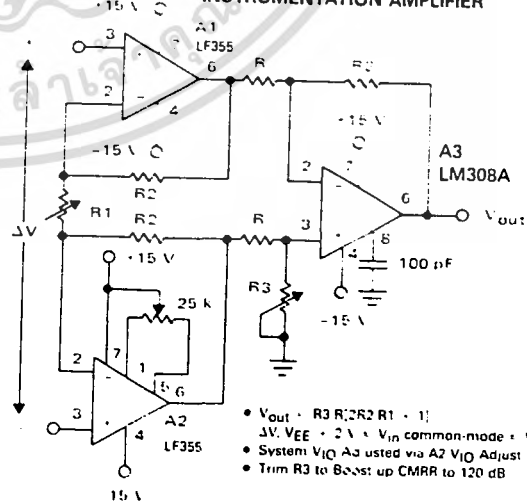


$$\text{Time } (t) = R_4 C \ln \left(\frac{V_R}{V_R - V_i} \right), R_3 = R_4, R_5 = 0.1 R_6$$

If $R_1 = R_2, t = 0.693 R_4 C$

- Design Example: 100 Second Timer
- $V_R = 10 \text{ V}$ $C = 1 \mu\text{F}$ $R_3 = R_4 = 144 \text{ M}$
 $R_6 = 20 \text{ k}$ $R_5 = 2 \text{ k}$ $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}$

FIGURE 42 — HIGH IMPEDANCE, LOW DRIFT INSTRUMENTATION AMPLIFIER



- $V_{out} = R_3 R_2 R_1 + 1$
- $V_{in}, V_{EE} = 2 \text{ V}$, V_{in} common-mode = V_{CC}
- System V_{IQ} Adjust via A2 V_{IQ} Adjust
- Trim R_3 to Boost up CMRR to 120 dB

MC14020B

14-BIT BINARY COUNTER

The MC14020B 14-stage binary counter is constructed with MOS P-channel and N-channel enhancement mode devices in a single monolithic structure. This part is designed with an input wave shaping circuit and 14 stages of ripple-carry binary counter. The device advances the count on the negative-going edge of the clock pulse. Applications include time delay circuits, counter controls, and frequency-dividing circuits.

- Fully Static Operation
- Diode Protection on All Inputs
- Supply Voltage Range = 3.0 Vdc to 18 Vdc
- Capable of Driving Two Low-power TTL Loads or One Low-power Schottky TTL Load Over the Rated Temperature Range
- Buffered Outputs Available from stages 1 and 4 thru 14
- Common Reset Line
- Pin-for-Pin Replacement for CD4020B



L SUFFIX
CERAMIC
CASE 620



P SUFFIX
PLASTIC
CASE 648



D SUFFIX
SOIC
CASE 751B

ORDERING INFORMATION

- MC14XXXBCP Plastic
- MC14XXXBCL Ceramic
- MC14XXXBD SOIC

T_A = -55° to 125°C for all packages.

MAXIMUM RATINGS* (Voltages Referenced to V_{SS})

Symbol	Parameter	Value	Unit
V _{DD}	DC Supply Voltage	-0.5 to +18.0	V
V _{in} , V _{out}	Input or Output Voltage (DC or Transient)	+0.5 to V _{DD} -0.5	V
I _{in} , I _{out}	Input or Output Current (DC or Transient), per Pin	±10	mA
P _D	Power Dissipation, per Package†	500	mW
T _{stg}	Storage Temperature	-65 to +150	°C
T _L	Lead Temperature (8-Second Soldering)	260	°C

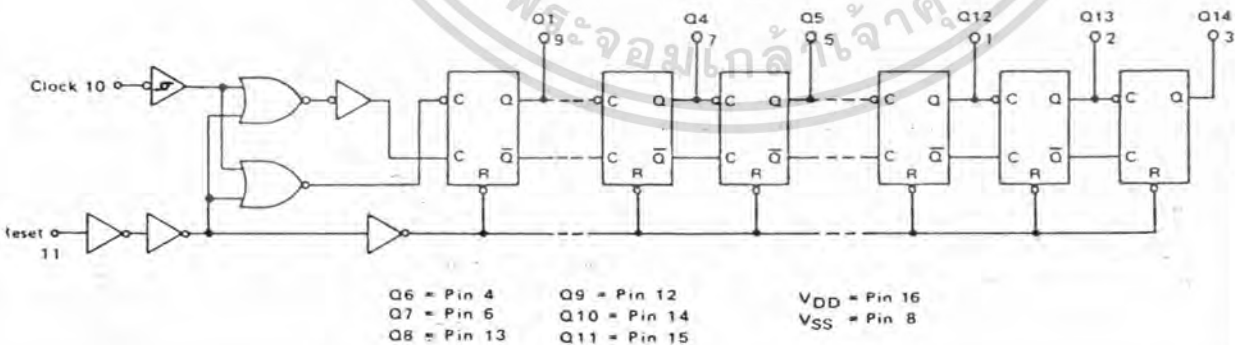
*Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur.
†Temperature Derating: All Packages: -7.0 mW/°C from 65°C to 125°C

TRUTH TABLE

CLOCK	RESET	OUTPUT STATE
	0	No Change
	0	Advance to next state
X	1	All Outputs are low

X = Don't Care

LOGIC DIAGRAM



MC14020B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Voltages Referenced to V_{SS})

Characteristic	Symbol	V _{DD} Vdc	-55°C		25°C			125°C		Unit	
			Min	Max	Min	Typ #	Max	Min	Max		
Output Voltage V _{in} = V _{DD} or 0	V _{OL}	5.0	—	0.05	—	0	0.05	—	0.05	Vdc	
		10	—	0.05	—	0	0.05	—	0.05		
15		—	0.05	—	0	0.05	—	0.05			
V _{in} = 0 or V _{DD}	V _{OH}	5.0	4.95	—	4.95	5.0	—	4.95	—	Vdc	
		10	9.95	—	9.95	10	—	9.95	—		
		15	14.95	—	14.95	15	—	14.95	—		
Input Voltage (V _O = 4.5 or 0.5 Vdc) (V _O = 9.0 or 1.0 Vdc) (V _O = 13.5 or 1.5 Vdc)	V _{IL}	5.0	—	1.5	—	2.25	1.5	—	1.5	Vdc	
		10	—	3.0	—	4.50	3.0	—	3.0		
15		—	4.0	—	6.75	4.0	—	4.0			
(V _O = 0.5 or 4.5 Vdc) (V _O = 1.0 or 9.0 Vdc) (V _O = 1.5 or 13.5 Vdc)	V _{IH}	5.0	3.5	—	3.5	2.75	—	3.5	—	Vdc	
		10	7.0	—	7.0	5.50	—	7.0	—		
		15	11	—	11	8.25	—	11	—		
Output Drive Current (V _{OH} = 2.5 Vdc) (V _{OH} = 4.6 Vdc) (V _{OH} = 9.5 Vdc) (V _{OH} = 13.5 Vdc)	Source	5.0	-3.0	—	-2.4	-4.2	—	-1.7	—	mAdc	
		5.0	-0.64	—	-0.51	-0.88	—	-0.36	—		
10		-1.6	—	-1.3	-2.25	—	-0.9	—			
15		-4.2	—	-3.4	-8.8	—	-2.4	—			
(V _{OL} = 0.4 Vdc) (V _{OL} = 0.5 Vdc) (V _{OL} = 1.5 Vdc)	Sink	5.0	0.64	—	0.51	0.88	—	0.36	—	mAdc	
		10	1.6	—	1.3	2.25	—	0.9	—		
		15	4.2	—	3.4	8.8	—	2.4	—		
Input Current	I _{in}	15	—	±0.1	—	±0.00001	±0.1	—	±1.0	μAdc	
Input Capacitance (V _{in} = 0)	C _{in}	—	—	—	—	5.0	7.5	—	—	pF	
Quiescent Current (Per Package)	I _{DD}	5.0	—	5.0	—	0.005	5.0	—	150	μAdc	
		10	—	10	—	0.010	10	—	300		
		15	—	20	—	0.015	20	—	600		
Total Supply Current**† (Dynamic plus Quiescent, Per Package) (C _L = 50 pF on all outputs, all buffers switching)	I _T	5.0	I _T = (0.42 μA/kHz) f + I _{DD}								μAdc
		10	I _T = (0.85 μA/kHz) f + I _{DD}								
		15	I _T = (1.43 μA/kHz) f + I _{DD}								

#Data labelled "Typ" is not to be used for design purposes but is intended as an indication of the IC's potential performance.

**The formulas given are for the typical characteristics only at 25°C.

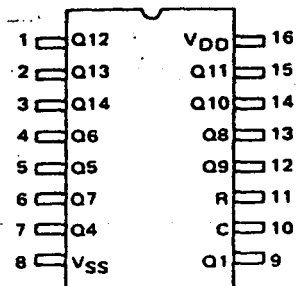
†To calculate total supply current at loads other than 50 pF:

$$I_T(C_L) = I_T(50 \text{ pF}) + (C_L - 50) V/k$$

where: I_T is in μA (per package), C_L in pF, V = (V_{DD} - V_{SS}) in volts, f in kHz is input frequency, and k = 0.001.

This device contains protection circuitry to guard against damage due to high static voltages or electric fields. However, precautions must be taken to avoid applications of any voltage higher than maximum rated voltages to this high-impedance circuit. For proper operation, V_{in} and V_{out} should be constrained to the range V_{SS} ≤ (V_{in} or V_{out}) ≤ V_{DD}. Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either V_{SS} or V_{DD}). Unused outputs must be left open.

PIN ASSIGNMENT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 6-64
 ไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC14020B

SWITCHING CHARACTERISTICS (C_L = 50 pF, T_A = 25°C)

Characteristic	Symbol	V _{DD} V _{dc}	Min	Typ #	Max	Unit
Output Rise and Fall Time	t _{TLH} , t _{THL}	5.0	—	100	200	ns
LH, t _{THL} = (1.5 ns/pF) C _L + 25 ns		10	—	50	100	
LH, t _{THL} = (0.75 ns/pF) C _L + 12.5 ns		15	—	40	80	
Propagation Delay Time	t _{PLH} , t _{PHL}	5.0	—	260	520	ns
clock to Q1		10	—	115	230	
t _{PHL} , t _{PLH} = (1.7 ns/pF) C _L + 175 ns		15	—	80	160	
clock to Q14		5.0	—	1820	3800	ns
t _{PHL} , t _{PLH} = (1.7 ns/pF) C _L + 1735 ns		10	—	805	1725	
t _{PHL} , t _{PLH} = (0.66 ns/pF) C _L + 772 ns		15	—	560	1200	
Propagation Delay Time	t _{PHL}	5.0	—	370	740	ns
reset to Q _n		10	—	155	310	
t _{PHL} = (1.7 ns/pF) C _L + 285 ns		15	—	115	230	
t _{PHL} = (0.66 ns/pF) C _L + 122 ns						
t _{PHL} = (0.5 ns/pF) C _L + 90 ns						
clock Pulse Width	t _{WH}	5.0	500	140	—	ns
		10	165	55	—	
		15	125	38	—	
clock Pulse Frequency	f _{cl}	5.0	—	2.0	1.0	MHz
		10	—	6.0	3.0	
		15	—	8.0	4.0	
clock Rise and Fall Time	t _{TLH} , t _{THL}	5.0	No Limit			—
		10				
		15				
reset Pulse Width	t _{WL}	5.0	3000	320	—	ns
		10	550	120	—	
		15	420	80	—	
reset Removal Time	t _{rem}	5.0	130	65	—	ns
		10	50	25	—	
		15	30	15	—	

Formulas given are for the typical characteristics only at 25°C.
Data labelled "Typ" is not to be used for design purposes but is intended as an indication of the IC's potential performance.

FIGURE 1 - POWER DISSIPATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM

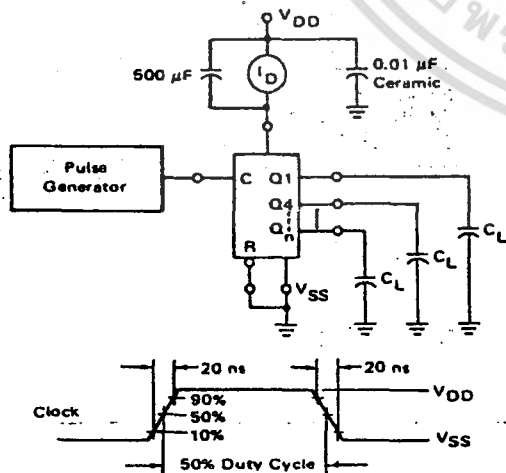
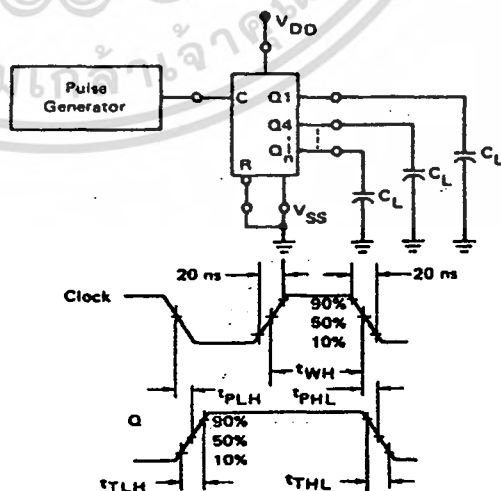
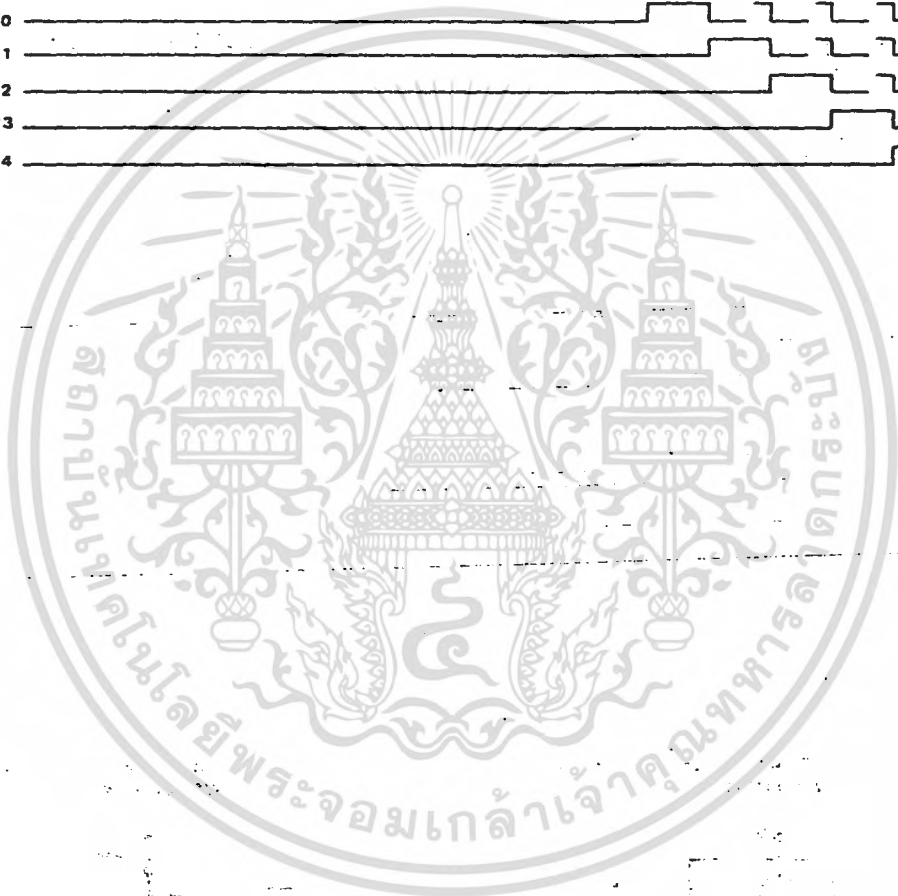
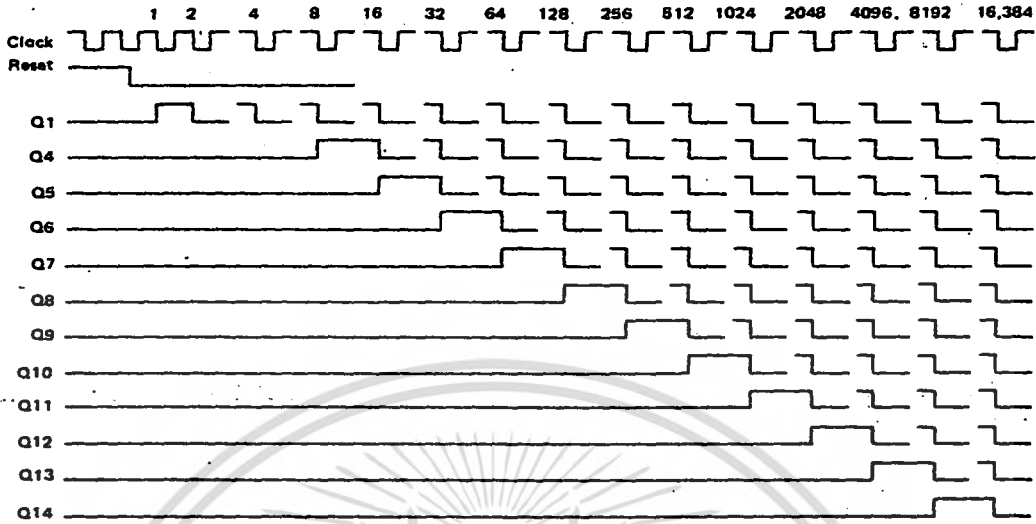


FIGURE 2 - SWITCHING TIME TEST CIRCUIT AND WAVEFORMS



MC14020B

FIGURE 3 - TIMING DIAGRAM



6

เอกสารอ้างอิง

- ^[1] Kenji Uchino "Ceramic Actuators: Principles and Applications" MRS Bull. Vol.18 No.4
International Center for Actuators and Transducers Materials Research
Laboratory, The Pennsylvania State University, 1990
- ^[2] T. Tani and D. A. Payne "Ferroelectric Thin Layers by Solution Chemistry" The 4th
ASEAN Science and Technology Week "Science and Technology: The Future
of ASEAN" pp. 14-1 -14-16 , National Research Council of Thailand
(NRCT), and Thailand's National Science and Technology Development
Agency (NSTDA); Ministry of Science, Technology and Environment,
THAILAND , 1995
- ^[3] M M Berkens and Th Kwaaitaal "Spontaneous polarisation and transition temperature of a 0
ferroelectric measured by a simple and accurate method" J. Phys. E.: Sci
Instrum. 16(1983) :516-521
- ^[4] V. Hugo Schmidt "Ferroelectricity Experiment for Advanced Laboratory" American Journal
of Physics 37(4) .(1969) :351-353
- ^[5] C. Kittel Introduction to Solid State Physics the 4th ed. Wiley ,1969
- ^[6] Morgan Matroc Limited "Transducer Products Division" Piezoelectric Ceramics Data Book
for Desighers :1-27
- ^[7] วิโรจน์ อิศวรงค์ , ชัชวาลย์ เต็มฤทธิวงศ์ และ กรชูลี ใช้สฤติย์ การใช้งานออปแอมป์และ
ลิเนียร์ไอซี บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2536

ประวัติผู้จัดทำโครงการพิเศษ

น.ส. พรศรี ตั้งพัฒนากิจเจริญ กำเนิดเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2518 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนราชวินิต มัธยม จากนั้นเข้ารับการศึกษาคือในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2538

น.ส. สุทธิกา ลวางกูร ถือกำเนิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2518 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง จากนั้นเข้ารับการศึกษาคือในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้