



เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

Ultrasonic Cleaner



โดย

นายกนิต ชัยวัฒนา
นายสมเจตต์ ลีลุเวช
นายโกเศส อินทร์เหี้ยม

วัน เดือน ปี..... 30 ก.พ. 2541
เลขทะเบียน..... 0.3.8.2541.3
เลขเรียกหนังสือ..... 139252 ต.129ค

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

ปีการศึกษา 2539

เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

Ultrasonic Cleaner



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ประภาพร ไพรสุวรรณ
อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2539


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

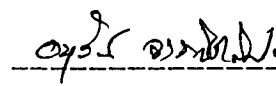
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค

คณะผู้จัดทำ

- 
1. นายคณิต ชัยวัฒนา
 2. นายสมเจตต์ ลีสุเดช
 3. นายโกเศศ อินทร์เหยี่ยว


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ประภาส ไพรสุวรรณ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 คลื่นอุลตราโซนิค	4
2.1 คลื่น	4
2.2 คลื่นเสียง	6
2.2.1 ลักษณะของคลื่นเสียง	6
2.2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเสียง	6
2.3 คลื่นอุลตราโซนิค	9
2.4 ความแรงและกำลังของคลื่นอุลตราโซนิค	12
บทที่ 3 อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์	14
3.1 คุณสมบัติทั่วไปของทรานสดิวเซอร์	16
3.2 คุณสมบัติทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์	16
3.3 เบียงโซทรานสดิวเซอร์	17
3.4 เบียงโซอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค	18
บทที่ 4 เพาเวอร์มอสเฟต	20
4.1 นิยามและความหมาย	20
4.2 โครงสร้าง	22
4.3 การทำงานของมอสเฟต	24
4.4 พารามิเตอร์เพาเวอร์มอสเฟต	24
4.5 แรงดันขีดเริ่ม	25
4.6 ความต้านทานขณะนำกระแส	26
4.7 ตัวเก็บประจุในมอสเฟต	28
4.8 ไดโอดระหว่างเดรนกับซอส	29
4.9 การขับเกทของมอสเฟต	30
4.10 ลักษณะสมบัติของการสวิตช์มอสเฟต	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้งานเพาเวอร์มอสเฟต	33
4.11.1 พิกัดปลอดภัยฟอร์เวิร์ดไบอัส	34
4.11.2 พิกัดปลอดภัยสวิตช์ของเพาเวอร์มอสเฟต	34
4.12 กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของเพาเวอร์มอสเฟต	36
4.13 ข้อได้เปรียบจากการใช้มอสเฟต	37
บทที่ 5 เรกติไฟรเออร์ และอินเวอร์เตอร์	39
5.1 เรกติไฟรเออร์	39
5.1.1 วงจรเรกติไฟรเออร์ชนิดหนึ่งเฟส ครึ่งลูกคลื่น	39
5.1.2 วงจรเรกติไฟเออร์ชนิดหนึ่งเฟส เต็มลูกคลื่น	40
5.2 อินเวอร์เตอร์	42
5.2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพหุผล	42
5.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์	43
5.2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์	45
บทที่ 6 วงจรควบคุมการขับเคลื่อนของมอสเฟต	47
6.1 ไอซีเบอร์ TL494 สำหรับโหมตควบคุมจากแรงดัน	47
6.1.1 การกำหนดเวลาคาบการทำงาน	47
6.1.2 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์	48
6.1.3 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D	49
6.1.4 การเลือกใช้ Q_1 และ Q_2 ที่เอาต์พุตของไอซี	50
6.2 วงจรขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟต	52
6.3 วงจรสแน็บเบอร์	52
6.3.1 วงจรสแน็บเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส	52
6.3.2 วงจรสแน็บเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน	54
บทที่ 7 การสร้าง การทดสอบและผลการทดลอง	57
7.1 การสร้าง	57
7.1.1 ส่วนของวงจรขับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์	57
7.1.2 ส่วนของวงจรควบคุมการทำงาน	58
7.1.3 ส่วนของวงจรฮีตเตอร์และลมร้อน	59
7.2 การทดสอบ	61
7.3 ผลการทดลอง	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
7.4 ตารางผลการทดลอง	67
7.4.1 ขยะวงจรจ่ายโหลด ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ปริมาณน้ำหรือน้ำยา 12 ลิตร	67
7.4.2 ขยะวงจรจ่ายโหลด ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ปริมาณน้ำหรือน้ำยา 12 ลิตร	68
บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์	71
ภาคผนวก	72
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	



เครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิค

นายคณิต ชัยวัฒนา
 นายสมเจตต์ สีสุเวช
 นายโกเศศ อินทร์เหี้ยว

ผ.ศ.ประภาส ไพรสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา
 อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึงการนำทฤษฎีคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความถี่เหนือเสียงมาประยุกต์ ในด้านการล้างอุปกรณ์ เช่น แวนตา , หัวปากกา ฯลฯ ในงานด้านนี้ คลื่นอัลตราโซนิคที่ใช้จะมีความถี่ประมาณ 28 kHz ความถี่ขณะนี้มากกว่าคลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยิน แต่ต่ำกว่าคลื่นวิทยุ

ซึ่งในการออกแบบและสร้างเครื่องอัลตราโซนิคที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะประกอบด้วยวงจรเกิดความถี่ที่มีความถี่ 28 kHz จากนั้นจะส่งผ่านไปยังวงจรขับเกทเพื่อขยายสัญญาณให้มีแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อไปขับเพาเวอร์มอสเฟตที่ต่อแบบฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยสัญญาณที่ได้นั้นจะมีความถี่ 28 kHz เพื่อนำไปส่งผ่านให้ทรานสดิวเซอร์เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานสั่นสะเทือนทางกล เพื่อสร้างคลื่นอัลตราโซนิคออกมา เพื่อให้มันยาเกิดการสั่นสะเทือนทางกลจนอนุภาคที่เกาะติดตามอุปกรณ์นั้นๆหลุดออกมา และยังมีตัวทำความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาดให้สูงขึ้น

เครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิคที่สร้างขึ้นมานี้ สามารถใช้เป็นตัวอย่าง และแนวทางในการพัฒนาให้มีขีดความสามารถมากขึ้น มีรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมไทยต่อไปในอนาคต

ULTRASONIC CLEANER

Kanit	Chaiwattana	
Somjet	Leeludej	
Koses	Inyiew	
Asst.Prof.Prapas	Paisuwan	Advisor
Anuwat	Jangwanitlert	Advisor

1997

ABSTRACT

This thesis is about bringing supersonic ultrasonic wave theory to apply in cleaning equipments ie. glasses , head-pen .The ultrasonic wave frequency is about 28 kHz which is more than of normal sound wave but lower than radio wave.

The design and construction of ultrasonic was electronic system composing oscillator circuit to generate and emit 28 kHz frequency signal to gate drive for amplifying the increased voltage and current that drive full bridge inverter-power mosfet. The frequency signal is 28 kHz to transducer. The transducer was converse electric energy to mechanical energy by vibration for produce ultrasonic wave which can shake the solution until the molecules catch the equipment are fall of, and this has heater for increasing the efficiency of cleaning.

This work is ultrasonic cleaner can serve as are example and guilline for futher research and developement of units with higher abilities and more case of use for the benifit of the filed of industrial in Thailand .

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	แสดงการติดตั้งอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์สำหรับการทำความสะอาด ไว้ที่ก้นถัง	1
รูปที่ 1.2	แสดงขบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค	2
รูปที่ 1.3	แสดงการส่งคลื่นอุลตราโซนิคจากอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ ที่ติดไว้ที่ก้นถัง	2
รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว	4
รูปที่ 2.2	แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง	5
รูปที่ 2.3	แสดงการบีบอัดของคลื่น	7
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง	7
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะของคลื่นเสียงที่ผ่านช่องแคบๆจนเสมือนเป็นแหล่งกำเนิด ตัวใหม่	8
รูปที่ 2.6	แสดงเมื่อคลื่นวงกลมกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรงคลื่นที่ สะท้อนกลับจะมีคลื่นเป็นวงกลมเช่นกัน	8
รูปที่ 2.7	แสดงการหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน คลื่นอุลตราโซนิค	9
รูปที่ 2.8	แสดงการจำแนกความถี่ต่างๆ ในช่วงคลื่นอุลตราโซนิค	9
รูปที่ 2.9	แสดงการเปรียบเทียบความยาวคลื่นที่ความถี่และความเร็วของคลื่น ที่มีค่าต่างกัน	10
รูปที่ 2.10	แสดง “Delay Line” ที่ใช้หน่วงสัญญาณที่เป็นผลจากการ เปลี่ยนแปลงไปมา ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นอุลตราโซนิค	11
รูปที่ 2.11	ค่าความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิคในตัวกลางที่เป็นก๊าซและของเหลว	11
รูปที่ 3.1	(ก) เซลที่ยังไม่ถูกแรงใด ๆ (ข) เซลถูกอัด (ค) เซลถูกยืด	15
รูปที่ 3.2	แสดงลักษณะโครงสร้างภายในทั่ว ๆ ไปของทรานสดิวเซอร์	18
รูปที่ 3.3	แสดงปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก โดยอธิบายในลักษณะ ที่ขึ้นสารทำจากแร่ควอตซ์	19
รูปที่ 4.1	วงจรเทียบเคียงหรืออุปกรณ์ประเภทการควบคุมแหล่งจ่ายด้วยแรงดัน	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2	ลักษณะโครงสร้างของมอสเฟตแบบดีฟิสิกซ์ทั้งแบบเอ็นและแบบพี และลักษณะโครงสร้างของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ทั้งแบบเอ็นและแบบพี	21-22
รูปที่ 4.3	โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต	23
รูปที่ 4.4	แสดงการทำงานของมอสเฟต	24
รูปที่ 4.5	คุณลักษณะการโอนย้ายของมอสเฟตเบอร์ MTP 5N40	25
รูปที่ 4.6	แรงดันขีดเริ่มแปรไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	26
รูปที่ 4.7	แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขณะนำกระแส	27
รูปที่ 4.8	ตัวเก็บประจุในมอสเฟต	28
รูปที่ 4.9	แสดงรูปหน้าตัดของมอสเฟตแบบ TMOS และสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ N-channel โดยรวมเดรนและซอสไดโอดไว้ในด้วยกัน	29
รูปที่ 4.10	คุณสมบัติทางฟอร์เวิร์ดของเดรน-ซอสไดโอด	30
รูปที่ 4.11	รูปของการสวิตช์มอสเฟต โดยแสดงรูปคลื่นของแรงดันเกตกับซอส, กระแสเดรน, แรงดันเดรนกับซอส, กระแสเกต ทั้งในช่วงการนำกระแส และช่วงการหยุดนำกระแส	33
รูปที่ 4.12	พิกัดที่ปลอดภัยฟอร์เวิร์ดไบอัส และ พิกัดที่ปลอดภัยของเพาเวอร์มอสเฟต	35
รูปที่ 4.13	แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส	37
รูปที่ 5.1	แสดงวงจรเรกติไฟร์เออร์ชนิดหนึ่งเฟส ครึ่งลูกคลื่น	39
รูปที่ 5.2	แสดงวงจรเรกติไฟร์เออร์แบบหม้อแปลงแท็ปกลาง	40
รูปที่ 5.3	แสดงวงจรวงจรเรกติไฟร์เออร์แบบบริดจ์	41
รูปที่ 5.4	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุกซูล	42
รูปที่ 5.5	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์	43
รูปที่ 5.6	แสดงการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์	44
รูปที่ 5.7	แสดงวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	46
รูปที่ 6.1	แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ TL494	47
รูปที่ 6.2	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $R_T C_T$ ในการกำหนดความถี่	48
รูปที่ 6.3	แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL494	49
รูปที่ 6.4	แสดงวงจรการต่อเดคทามย์	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะการเลือกใช้อาท์พุทของ TL494	50-51
รูปที่ 6.6 การต่อวงจรสร้างพัลส์ความถี่ 28 kHz ของ TL494	51
รูปที่ 6.7 แสดงการต่อวงจรขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟต	52
รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะการลดของกระแสและการเพิ่มของแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแส	54
รูปที่ 6.9 แสดงการต่อวงจรสับเบออร์ช่วงหยุดนำกระแสเพื่อหน่วงแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ ทรานซิสเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ	64
รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะการต่อวงจรสับเบออร์ป้องกันแรงดันเกินเพื่อจำกัดค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะหยุดนำกระแส	56
รูปที่ 7.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรขับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์	57
รูปที่ 7.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรควบคุมการทำงาน	58
รูปที่ 7.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรฮีตเตอร์และลมร้อน	59
รูปที่ 7.4 ลักษณะของโครงการที่เสร็จสมบูรณ์	60
รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในเครื่อง	60
รูปที่ 7.6 วงจรโวลทเทจเร็กกูเลเตอร์	61
รูปที่ 7.7 วงจรภาคเพาเวอร์ที่ใช้ในการขับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์	61
รูปที่ 7.8 วงจรกำเนิดความถี่และวงจรขับเคลื่อน	62
รูปที่ 7.9 สัญญาณเอาท์พุท 1 ซึ่งมีความถี่ขนาด 28 kHz จากวงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ไอซี TL 494 ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV	63
รูปที่ 7.10 สัญญาณเอาท์พุท 2 ซึ่งมีความถี่ขนาด 28 kHz จากวงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ไอซี TL 494 ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV	63
รูปที่ 7.11 สัญญาณเอาท์พุท 1 ที่ออกจากวงจรขับเคลื่อน ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV	64
รูปที่ 7.12 สัญญาณเอาท์พุท 2 ที่ออกจากวงจรขับเคลื่อน ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV	64
รูปที่ 7.13 สัญญาณที่ใช้ขับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ขณะไม่มีโหลด ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec , Probe x 10	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 7.14 สัญญาณที่ใช้ขับอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ขณะมีภาระโหลด ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec , Probe x 10	65
รูปที่ 7.15 แสดงการวัดสัญญาณเพื่อใช้หากระแสที่ใช้ขับ อุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ขณะมีภาระโหลด ที่ 2 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV , Probe x 10 , R = 10 Ω	66



สารบัญตาราง

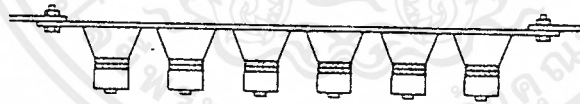
	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติบางอย่างของสารเซรามิค	17
ตารางที่ 7.1 แสดงค่าขณะที่วงจรถ่ายโหลด ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ปริมาณน้ำหรือน้ำยา 12 ลิตร	67
ตารางที่ 7.2 แสดงค่าขณะที่วงจรถ่ายโหลด ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ปริมาณน้ำหรือน้ำยา 24 ลิตร	68



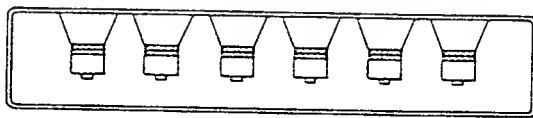
บทที่ 1

บทนำ

คลื่นอุลตราโซนิก (Ultrasonic Wave) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูมนุษย์จะได้ยิน ดังนั้นปกติแล้วคำว่าอุลตราโซนิกจึงหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอุลตราโซนิกมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง เรื่องนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอุลตราโซนิก (Ultrasonic) ทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง ดังเช่นในโครงการนี้ได้นำคลื่นอุลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดหลอดต่างๆ โดยจะจุ่มสิ่งที่ต้องการจะทำความสะอาดลงไปในถัง (Tank) ที่บรรจุน้ำทำความสะอาดและปล่อยคลื่นอุลตราโซนิกจากกันถังขึ้นไป ซึ่งคลื่นอุลตราโซนิกที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดจากตัวกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิก เรียกว่าอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) ที่ติดไว้ที่กันถัง ดังรูปที่ 1.1 จำนวนตัวกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิกนั้นจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับขนาดถัง



(a)



(b)

รูปที่ 1.1 แสดงการติดตั้งอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์สำหรับการทำความสะอาดไว้ที่กันถัง

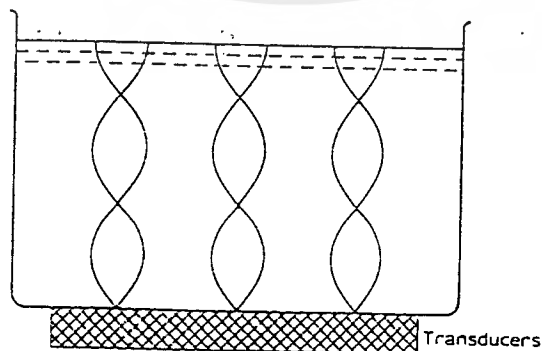
a) แบบสามารถถอดได้ b) แบบติดตั้งตายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำควมสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค อาศัยหลักการขบวนการคาร์วิเทชัน (Cavitation) ซึ่งจะเหมือนกับการใช้แรงทางกล (การขัด การถู) ในการทำความสะอาด โดยขบวนการนี้ทำให้น้ำยาที่ใช้ในการทำความสะอาดเกิดการกระเพื่อม ทำให้อนุภาคสิ่งสกปรกขนาดเล็กจะติดอยู่กับสิ่งที่เราต้องการจะทำความสะอาดหลุดออกมา ดังรูปที่ 1.2 น้ำยาที่เกิดการกระเพื่อมได้นั้นเกิดจากอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ติดอยู่ที่ก้นถัง



รูปที่ 1.2 แสดงขบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค



รูปที่ 1.3 แสดงการส่งคลื่นอุลตราโซนิคจากอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ติดไว้ที่ก้นถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

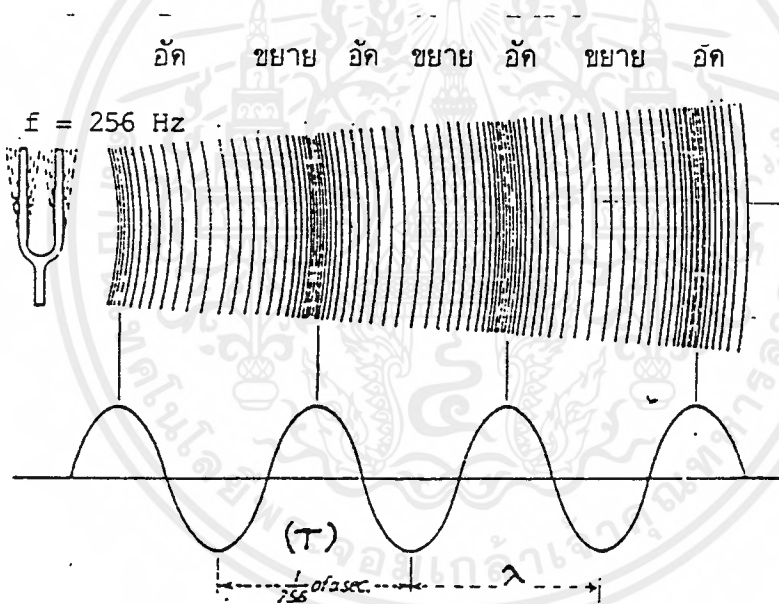
ซึ่งในกระบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกจะประกอบด้วย ส่วนในการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกและส่วนของการเป่าแห้ง อุณหภูมิจะมีส่วนช่วยในการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกได้ดีขึ้น ในกรณีที่วัตถุที่จะทำความสะอาดนั้นเป็นคราบมัน จึงจำเป็นต้องมีฮีทเตอร์ (Heater) ทำความร้อนที่ถึงด้วย และจะต้องทำการควบคุมอุณหภูมิความร้อนที่น้ำยาล้างให้เหมาะสม ในส่วนของการเป่าลมร้อนนั้นก็มีส่วนให้วัตถุที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกเสร็จแล้วนั้นแห้งเร็วขึ้น ซึ่งในโครงการนี้ได้สร้างเครื่องนี้ขึ้นมา โดยจะประกอบไปด้วย ส่วนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกซึ่งจะมีฮีทเตอร์ติดอยู่กับถังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำสะอาดให้สูงขึ้นและอีกส่วนหนึ่งคือส่วนของการเป่าแห้งโดยจะประกอบไปด้วยชุดขดลวดทำความร้อน และพัดลมเพื่อเป่าลมร้อนให้กับวัตถุที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกเสร็จแล้วให้แห้งได้เร็วขึ้น ส่วนน้ำยาที่ใช้ในการทำ ความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่เราต้องการจะทำความสะอาด เช่นในโครงการนี้สามารถทำความสะอาดแผ่นปริ้นซ์วงจร เป็นต้น

บทที่ 2 คลื่นอุลตราโซนิค

2.1 คลื่น (Wave)

คลื่นเกิดจากการแกว่งหรือสั่น (Oscillated) ของวัตถุ ซึ่งจะเกิดเป็นพลังงาน และถ่ายทอดออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังบริเวณโดยรอบ โดยคลื่นทั่วไปสามารถจำแนกตามความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการสั่นของอนุภาคตัวกลางกับทิศทางการเคลื่อนที่ได้ 2 ชนิดคือ

1. คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) คือ คลื่นที่อนุภาคของตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นเสียง เป็นต้น ซึ่งแสดงลักษณะของคลื่นตามยาวได้ดังรูปที่ 2.1

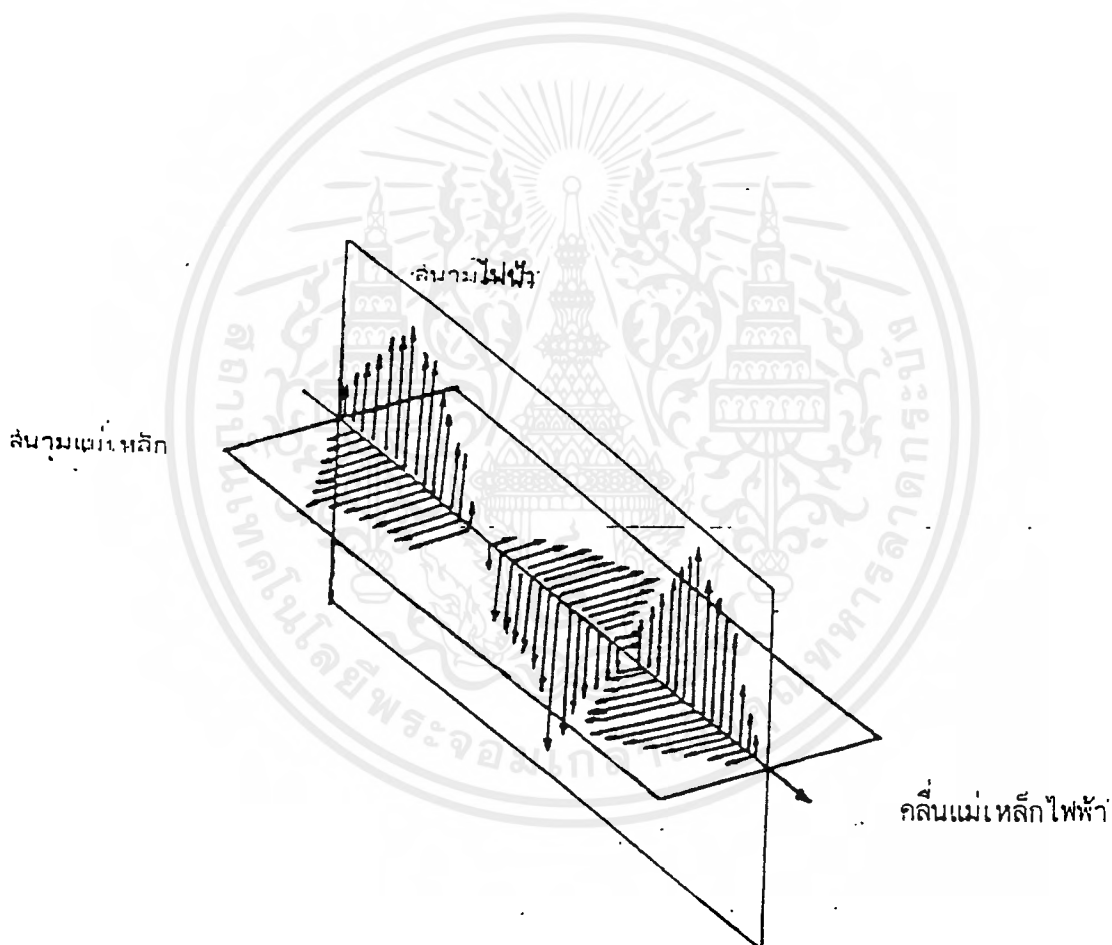


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว

จากรูปจะเห็นว่ามีส่วนที่เป็นคลื่นอัด (Compression) คลื่นช่วงที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันสูง และคลื่นขยาย (Rarefaction) คือ คลื่นช่วงที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันต่ำ เมื่อนำค่าของความดัน (P) ที่เปลี่ยนไปตามระยะทางมาเขียนกราฟ จะได้เป็นรูป Sine Wave โดยยอดคลื่นจะตรงกับส่วนอัด ท้องคลื่นจะตรงกับส่วนขยาย ระยะทางระหว่างส่วนอัดถึงส่วนอัด หรือส่วนขยายถึงส่วนขยาย คือ 1 ความยาวคลื่น และมีคาบเวลาเป็น T ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/f$ โดยจุดที่เป็นเส้นแกมม่านั้นมีค่าความดัน 1 บรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คลื่นตามขวาง (Transverse Wave) เป็นคลื่นที่อนุภาคตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า , คลื่นน้ำ เป็นต้น โดยรูปที่ 2.2 เป็นการแสดงถึงลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) และสนามไฟฟ้า (Electric Field) มีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นนั่นเอง



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คลื่นเสียง (Sound Wave)

คลื่นเสียงนั้นจัดอยู่ในรูปคลื่นตามยาว ซึ่งสามารถเดินทางผ่านวัตถุตัวกลางในลักษณะอัดและขยายทำให้เกิดเสียงขึ้นมา โดยแหล่งกำเนิดของคลื่นเสียงแบ่งได้ตามวัตถุประสงค์เสียงได้ 3 ประเภท คือ

1. เกิดจากการสั่นของสายหรือแท่ง ได้แก่ เครื่องสายต่างๆ , ส้อมเสียง ฯลฯ
2. เกิดจากการสั่นของแผ่นผิว ได้แก่ ไดอะแฟรมของลำโพง , ผนังกลอง ฯลฯ
3. เกิดจากการสั่นของลำอากาศ ได้แก่ เครื่องเป่าต่างๆ ฯลฯ

เนื่องจากคลื่นเสียงนั้นต้องอาศัยตัวกลางในการเดินทาง จึงทำให้คลื่นเสียงสามารถผ่านสุญญากาศได้

2.2.1 ลักษณะของคลื่นเสียง

“ ความถี่ ” ความถี่ของคลื่นเสียงในตัวกลางใดๆ คือ ความถี่ของการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงนั้นความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยินมีค่าอยู่ในช่วง 20 Hz - 20 kHz เรียกว่า “ Audible Frequency ” ความถี่ต่ำกว่าที่มนุษย์ได้ยินเรียกว่า “ Infrared Frequency ” และความถี่ที่สูงกว่าที่มนุษย์ได้ยินเรียกว่า “ Ultrasonic Frequency ”

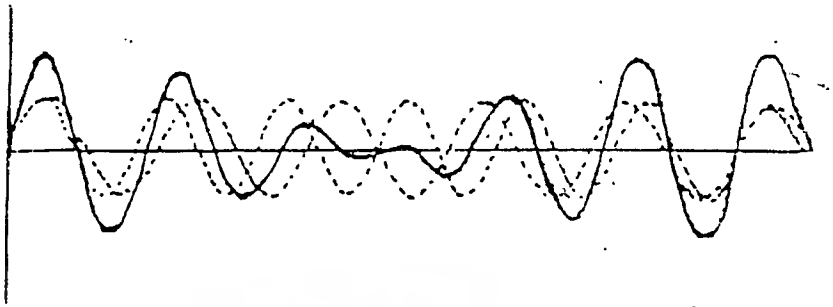
“ อัตราเร็วของเสียง ” อัตราเร็วของคลื่นเสียงนั้นย่อมแปรผันตามคุณสมบัติของตัวกลางที่เสียงเดินทางผ่าน ซึ่งตัวแปรที่จำกัดอัตราเร็วของเสียง คือ ความหนาแน่น (Density) , อุณหภูมิ (Temperature) และความยืดหยุ่น (Elasticity)

2.2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเสียง

คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเสียง แบ่งได้เป็น 4 แบบ

1. การแทรกสอดของเสียง (Interference) เกิดจากการรวมกันของคลื่น 2 คลื่นขึ้นไป ขณะเมื่อพบกันในตัวกลาง (Medium) เดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดผลได้หลายลักษณะ เช่น

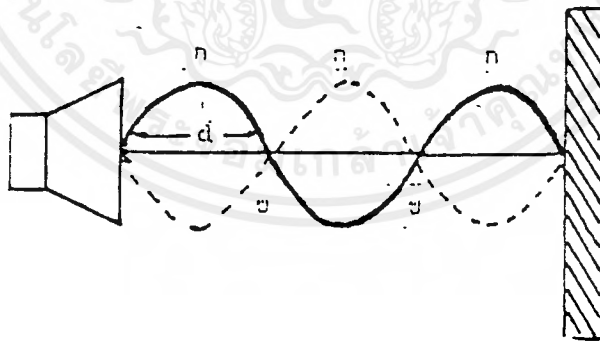
การบีบอัด (Beat) ของคลื่นเสียง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่างกัน หรือต่างเฟสกันเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเดียวกันแล้วรวมเป็นคลื่นใหม่ซึ่งทำให้แอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.3 แสดงการบีสต์ของคลื่น

จากรูปเป็นการแสดงการบีสต์ของคลื่นเสียง 2 คลื่น ซึ่งได้คลื่นที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนไป ซึ่งประโยชน์ของการบีสต์ของคลื่น จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบความถี่ของคลื่น ให้แสดงผลออกมาในลักษณะของแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน

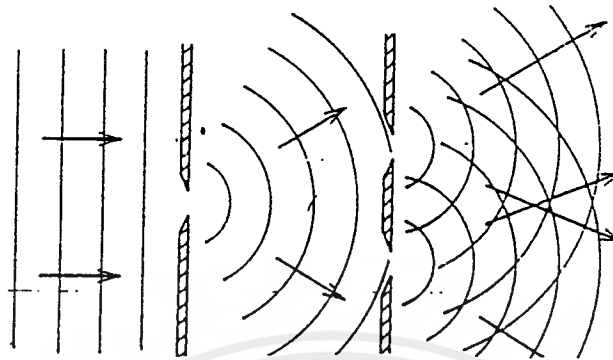
การเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Waves) เกิดจากแทรกสอดของคลื่นชุดที่มีแอมพลิจูดเท่ากันและความถี่เดียวกัน แต่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้าม หรือมีเฟสตรงข้ามกันซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง

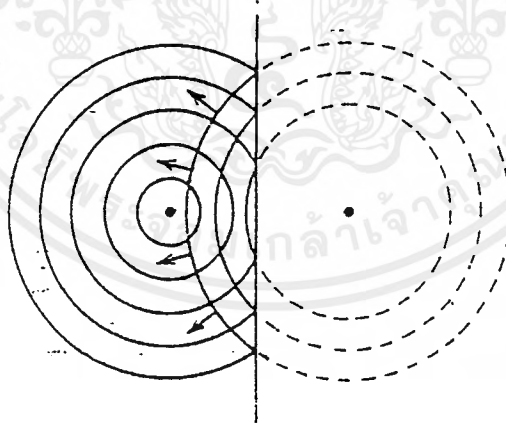
2. การเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง (Diffraction) คลื่นเสียงจะเลี้ยวเบนอ้อมสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นมุมหรือช่องแคบ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เราพบอยู่ในชีวิตประจำวันอยู่ตลอดเวลา เช่น ในกรณีที่เราได้ยินเสียงดนตรีที่เล่นอยู่คนละถนนของมุมตึก หรือการได้ยินเสียงที่ลอดผ่านช่องเล็ก ๆ จากอีกห้องหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของคลื่นเสียงที่ผ่านช่องแคบๆจนเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดตัวใหม่

3. การสะท้อนของคลื่นเสียง (Reflection) คลื่นเสียงสามารถสะท้อนได้เมื่อตกกระทบตัวกลาง โดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และจะทำให้เกิดเสียงก้อง (Echo) ซึ่งเสียงก้องที่สะท้อนกลับมาในเวลาที่มากกว่า 50 ms จะทำให้ได้ยินเสียงนั้นเป็นครั้งที่ 2

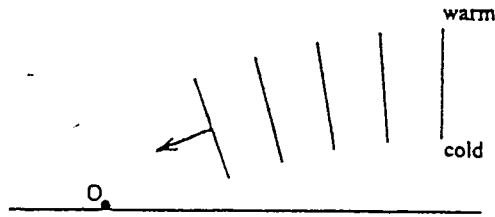


รูปที่ 2.6 แสดงเมื่อคลื่นวงกลมกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรง

คลื่นที่สะท้อนกลับมามีคลื่นเป็นวงกลมเช่นกัน

4. การหักเหของคลื่นเสียง (Refraction) คลื่นเสียงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดการหักเหของคลื่น ซึ่งทำให้ความเร็วของคลื่นเสียงเปลี่ยนไป โดยที่ความถี่ยังคงที่อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

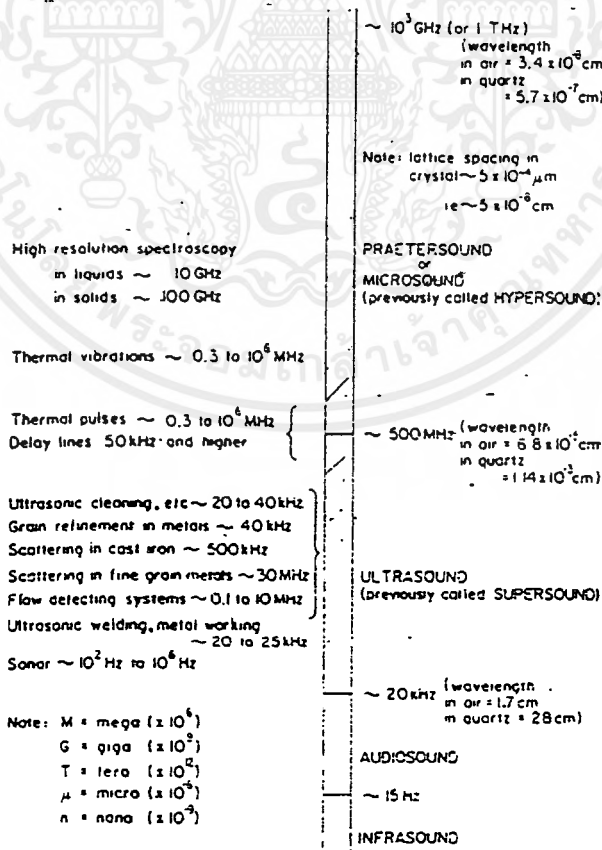


รูปที่ 2.7 แสดงการหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันคลื่นอุลตราโซนิค

2.8 คลื่นอุลตราโซนิค

คลื่นอุลตราโซนิค คือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะสามารถ

ได้ยินซึ่งมีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz - 10⁴ GHz โดยคลื่นที่มีความถี่มากกว่า 10⁴ GHz และมีค่าแอมพลิจูดสูง ๆ จะเรียกว่า “ไฮเปอร์ซาวนด์” (Hypersound) โดยคุณสมบัติของคลื่นอุลตราโซนิคจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับคลื่นเสียงที่กล่าวมาแล้ว โดยในรูปที่ 2.8 แสดงถึงช่วงความถี่ต่างๆ ของคลื่นอุลตราโซนิคที่ถูกนำไปใช้งานในด้านต่างๆ



รูปที่ 2.8 แสดงการจำแนกความถี่ต่างๆ ในช่วงคลื่นอุลตราโซนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นอุลตราโซนิกส่วนใหญ่จะกำเนิดขึ้นจากการออสซิลเลชัน (Oscillation) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิก ซึ่งมีความถี่ต่าง ๆ ซึ่งความยาวคลื่นของคลื่นอุลตราโซนิก ในแต่ละความถี่จะแตกต่างกันไป ด้วย โดยความยาวคลื่นจะสัมพันธ์กับค่าความเร็ว (c) และค่าความถี่ (f) ของคลื่นอุลตราโซนิก ซึ่งการเปรียบเทียบความยาวคลื่นที่ความถี่และความเร็วของคลื่นที่มีค่าต่างกันซึ่งแสดงในรูปที่ 2.9

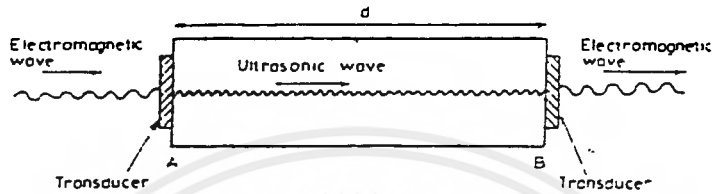
Some examples of ultrasonic wavelengths.

Frequency	Wavelength (λ)		
	(for $c = 1000 \text{ m s}^{-1}$)	(for $c = 3000 \text{ m s}^{-1}$)	(for electromagnetic radiation)
20 kHz = $2 \times 10^4 \text{ Hz}$	5 cm	15 cm	$1.5 \times 10^4 \text{ m}$
100 kHz = 10^5 Hz	1 cm	3 cm	$3 \times 10^3 \text{ m}$
1 MHz = 10^6 Hz	1 mm	3 mm	300 m
50 MHz = $5 \times 10^7 \text{ Hz}$	20 μm	60 μm	6 m
1 GHz = 10^9 Hz	1 μm	3 μm	30 cm

รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบความยาวคลื่นที่ความถี่และความเร็วของคลื่นที่มีค่าต่างกัน

จากรูป แสดงค่าที่ $c = 1000 \text{ m/s}$ และ 3000 m/s ซึ่งอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว และเปรียบเทียบกับค่าการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่เดียวกัน จะเห็นว่า มีค่าแตกต่างกันมาก โดยความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิก จะมีค่าต่ำกว่าความเร็วในการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาก (ในสูญญากาศ มีค่าความเร็วประมาณ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$) จากหลักการนี้เป็นประโยชน์มากในตัวอย่างของระบบโทรทัศน์และระบบดิจิตอลคอมพิวเตอร์ ที่ใช้หน่วง (Delay) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ไปเป็นคลื่นอุลตราโซนิก โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หลักการคือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน 1 ms สามารถเดินทางได้ระยะทาง $3 \times 10^8 \times 10^{-3} = 300 \text{ km}$ ซึ่งมีค่ามาก เราจึงสามารถหน่วงสัญญาณนี้ได้โดยเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นอุลตราโซนิก โดยใช้อุปกรณ์ "Delay Line" ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งประกอบด้วยตัวส่งและตัวรับคลื่นอุลตราโซนิก โดยคลื่นจะเคลื่อนที่ใน Delay Line ในระยะทาง d ซึ่งในระยะ d นี้ อาจจะเป็นตัวกลางที่เป็นก๊าซ, ของเหลว, หรือของแข็งก็ได้ ซึ่งจะมีค่าความเร็วที่แตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดง “Delay Line” ที่ใช้หน่วงสัญญาณที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลง
ไปมา ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นอุลตราโซนิก

Velocities and acoustic impedances for some materials.

<i>Gases and liquids</i>		
	Speed m s^{-1}	Acoustic impedance $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Air	331-46	431
Carbon dioxide	259	512
Helium	971.9	173
Hydrogen	1286	116
Neon	434	391
Nitrogen	337	421
Distilled water	1482.3	1.48×10^6
Acetic acid	1173	1.23×10^6
Acetone	1190	9.37×10^5
Carbon tetrachloride	940	1.94×10^6
Ethanol	1162	9.17×10^5
Glycerol	1860	2.34×10^6
Mercury	1454	1.97×10^7

รูปที่ 2.11 ค่าความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิกในตัวกลางที่เป็นก๊าซและของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ความแรงและกำลังของคลื่นอุลตราโซนิก

เมื่อทรานสดิวเซอร์ของอุลตราโซนิกปล่อยคลื่นอุลตราโซนิกออกไป จะทำให้อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นสะเทือน อนุภาคนั้นๆจึงมีพลังงานที่เนื่องมาจากการสั่นสะเทือน อัตราการไหลของพลังงานจึงเรียกได้ว่า เป็นความแรง (Intensity) ของลำอุลตราโซนิกอาจกล่าวให้ชัดเจนลงไปว่าความแรงของลำอุลตราโซนิกที่จุด ๆ หนึ่งเป็นอัตราการไหลของพลังงานผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวางอยู่ตั้งฉากกับลำอุลตราโซนิกที่จุดนั้น เมื่อความแรงของอุลตราโซนิกเพิ่มมากขึ้นจะมีการเพิ่มใน Pressure amplitude , Particle - displacement amplitude และ Particle - velocity amplitude

กำลังของอุลตราโซนิก เป็นอัตราการไหลของพลังงานที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของลำอุลตราโซนิก จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Ultrasonic power (W)} = \text{Ultrasonic intensity (W/cm}^2\text{)} * \text{cross - sections (2-1)}$$

ในการใช้งานคลื่นอุลตราโซนิกนั้น เนื่องจากเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้เราสามารถส่งคลื่นไปยังจุดเป้าหมายที่ต้องการ ได้อย่างเจาะจง ยิ่งถ้าคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลง โดยถ้าความยาวของคลื่นมากกว่าช่องเปิดของทรานสดิวเซอร์ เช่น คลื่นความถี่ 300 Hz ในอากาศจะมีความยาวคลื่นประมาณ 1 เมตรเศษ ซึ่งยาวกว่าช่องเปิดของตัวทรานสดิวเซอร์ ทำให้คลื่นเสียงที่ออกจากตัวกำเนิดเสียงนี้เกิดการหักเหและเลี้ยวเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียง ทำให้เกิดการกระจายของคลื่นเสียง (Scatter) ไม่มีทิศทางที่แน่นอน แต่ถ้าใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงขึ้นมาในย่านอุลตราโซนิก เช่นที่ความถี่ 40 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียง 8 mm เท่านั้น ซึ่งจะเล็กกว่าช่องเปิดของตัวกำเนิดเสียงมากคลื่นเสียงที่ได้จะไม่เลี้ยวเบนที่ขอบ จึงพุ่งเป็นลำแคบๆ (Beam) ซึ่งมีทิศทางที่แน่นอน

คลื่นอุลตราโซนิกนั้นเมื่อต้องเดินทางในอากาศแล้วนั้น ความถี่ที่ใช้งานมักจะถูกจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 kHz เพราะถ้าความถี่สูงขึ้นกว่านี้ อากาศจะเกิดคูกคลื่นคลื่นเสียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระดับความแรงของคลื่นอุลตราโซนิกที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานในด้านการแพทย์นั้นจะใช้รัศมีทำการสั้นๆ จึงใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz - 10MHz ส่วนความถี่ที่เป็น GHz จะมีใช้งานในตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางนั้นไม่ใช่ในอากาศแต่เป็นตัวกลางชนิดอื่น เช่น น้ำ เป็นต้น

จากการมีทิศทางของคลื่นอุลตราโซนิกทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic Remote Control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic Cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความหนาของวัตถุ โดยส่งเอกซเรย์เป็นเอกสารที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกายใช้ทดสอบการรั่วของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นการใช้งาน เช่นถ้าคลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้ว ความถี่ที่ใช้ก็มักจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 kHz เพราะที่ความถี่สูงกว่านี้อากาศจะดูดคลื่นเสียงเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

คือ อุปกรณ์ซึ่งสามารถแปลงพลังงานกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิก กระจายไปในวัตถุตัวกลาง หรือจากพลังงานของคลื่นอุลตราโซนิกแปลงไปเป็นพลังงานกลซึ่งสามารถทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้จากตัวทรานสดิวเซอร์นั้น

ทรานสดิวเซอร์ที่ให้กำเนิดคลื่นอุลตราโซนิกมี 2 ชนิด ใหญ่ ๆ คือ

1. แมคคานิกเกิลทรานสดิวเซอร์
(Mechanical Transducers)
2. อิเล็กโตรแมคคานิกเกิลทรานสดิวเซอร์
(Electroomechanical Transducers)

อิเล็กโตรแมคคานิกเกิลทรานสดิวเซอร์ จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียงที่ใช้กัน
อยู่มี 4 ชนิด คือ

1. แบบมูฟวี่งคอลลี่ (Moving Coil)
2. แบบอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic)
3. แบบเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)
4. แบบเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

1. แบบมูฟวี่งคอลลี่ นั้นคล้าย ๆ กับมูฟวี่งคอลลี่ของลำโพงมีประโยชน์มาก ในการเป็นตัวสั่น (Vibrator) ของทดสอบความเร่งของอุปกรณ์แบบมูฟวี่งคอลลี่ ชนิดริบบอน (Ribbon) ทำด้วยอะลูมิเนียมบาง ๆ วางไว้ระหว่างขั้วของสองของแม่เหล็ก มันทำตัวเสมือนเป็นขดลวดของมูฟวี่งคอลลี่ ใช้ทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิก ในการศึกษาคุณสมบัติในการเคลื่อนที่ของคลื่นอุลตราโซนิกของก๊าซ

2. แบบอิเล็กโตรสแตติก ใช้หลักการที่ว่า ในระหว่างแผ่นขนานของ Parallel Plate Capacitor เมื่อเราให้ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทั้งสองจะทำให้เกิดแรงขึ้น หลักใหญ่ของมัน จะใช้ทำเป็นลำโพงเสียงที่มีคุณภาพสูง แต่ก็ใช้ทำให้เกิดการสั่นแบบอุลตราโซนิกในของแข็ง แบบที่ 1 และ 2 นั้นไม่ค่อยใช้กันเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิก ส่วนแบบที่ 3 และ 4 ใช้กันมาก และเป็นที่แพร่หลาย ดังนั้นจะกล่าวละเอียดเฉพาะแบบที่ 3 และ 4 เท่านั้น

3.4 แบบเปียโซอิเล็กทริก และแบบเฟอร์โรอิเล็กทริก ในผลึกที่ประกอบด้วยโพลาไรซ์ โมเลกุล (Polar Molecule) ซึ่งขาดจุดศูนย์กลางของความสมมาตร (Center of symmetry) ถ้าตัดเอาเพลท (Plate) อันเนื่องมาจากผลึกนี้ แล้วทำให้เกิดการบิดงอ (Deform) ด้วยเครื่องมือกล จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างผิวหน้าทั้งสองของเพลท ปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่าไครเร็กเปียโซอิเล็กทริก เอฟเฟ็กต์ (Direct Piezoelectric Effect) ศักย์ระหว่างผิวหน้าทั้งสองของเพลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเป็นประโยชน์ในการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

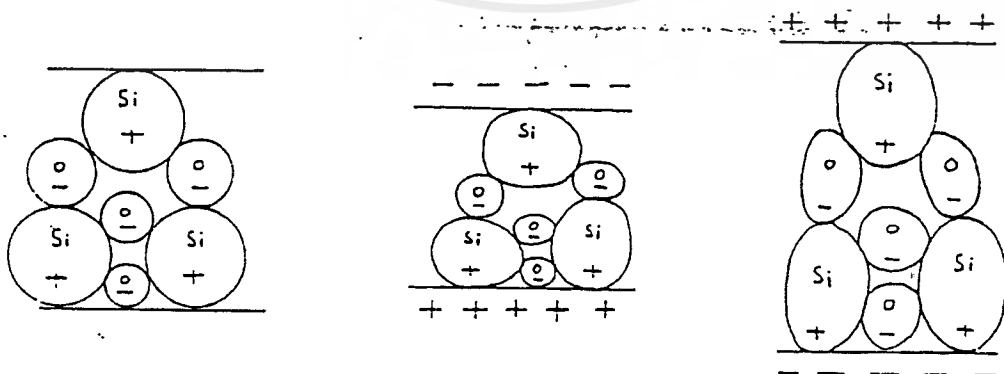
เพลทนี่จะเกิดบิดเบี้ยวไปได้ออง เรียกปรากฏการณนี่ว่า อินเวอร์เปียโซอิเล็คทริก เอฟเฟ็ค (Inverse Piezoelectric Effect) ตัวอย่าง เช่น พลิกควอซ ดังรูปที่ 3.1 แสดงหนึ่งหน่วยเซลซึ่งอยู่ระหว่างเพลน (Plane) ที่ขนานกัน

รูปที่ 3.1 (ก) จะอยู่ในสภาวะปกติ จุดศูนย์ถ่วงของประจุบวกของซิลิคอนกับประจุลบของออกซิเจนอยู่ที่เดียวกัน และจำนวนประจุไฟฟ้าทั้งสองเท่ากันจะไม่เกิด โดโพลโมเมนต์ขึ้น ดังนั้นผลเนื่องจากการกระจายของประจุคกร้อม ระนาบ ทั้งสองที่ขนานกันจึงเป็นศูนย์

รูปที่ 3.1 (ข) ถ้าเราทำให้มันเปลี่ยนรูปร่างไปจากเดิม โดยการจัดให้หดหรือดึงให้ดังตามรูปที่ 3.1 (ค) จุดศูนย์ถ่วงของประจุทั้งสองจะไม่อยู่ที่เดียวกัน ทำให้เกิดการกระจายของประจุขึ้น ระหว่าง ระนาบทั้งสอง

การทำให้มันเปลี่ยนรูปร่างด้วยการอัดหรือหดตามรูปนั้น จะเป็นการแยกจุดศูนย์ถ่วงผลจะทำให้เกิดประจุปรากฏบนระนาบทั้งสอง ในรูปแบบนี้เรียกว่า โดเร็กเปียโซอิเล็คทริก เอฟเฟ็ค

สำหรับแบบอินเวอร์เปียโซอิเล็คทริกเอฟเฟ็ค จะเกิดโดยให้สนามไฟฟ้าแก่ระหว่างเพลนทั้งสอง ทำให้จุดศูนย์ถ่วงของทั้งสองประจุเคลื่อนออกจากกันในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้เซลบิดเบี้ยวไป ถ้ามีแผ่นควอซ ซึ่งตัดมาจากพลิกควอซ ในทิศทางที่จะทำให้เกิดสันสะเทือนขนานกับสนามไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อเราให้สนามไฟฟ้าสลับ เพลทนี่จะขยายและหดตัว ด้วยความถี่เดียวกับสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเหมือนกับลูกสูบ ดังนั้นมันจะเป็นตัวกำเนิดคลื่นเสียงได้



รูปที่ 3.1 (ก) เซลที่ยังไม่ถูกแรงใด ๆ รูปที่ 3.1 (ข) เซลถูกอัด รูปที่ 3.1 (ค) เซลถูกยืด
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันมีสารไม่กี่ชนิดที่จะให้ปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก สารไดอิเล็กทริกทุกชนิดเป็นสารอิเล็กโทรสแตติก แต่ปกติแล้วผล (Effect) นี้จะน้อยมาก แต่สารที่ให้ผลอย่างมากได้แก่ สารไททานเทท (titanates) , ซีคอนเทท (Zirconates) และในกรณีเช่นนี้เราเรียกว่า มัน เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ปกติสารเหล่านี้จะอยู่ในรูปของส่วนผสมเซอร์รามิก ซึ่งประกอบไปด้วยโดเมน (Domain) ที่มีขั้วอิสระรวมตัวกันมาก ๆ ถ้าเรานำสารแบบนี้มาสักหนึ่งชนิด เอาไปเผาให้สูงกว่าอุณหภูมิเคอริก (Curic Temperature) ของมันแล้วทำให้เย็นภายใต้สนามไฟฟ้าสูง ๆ ทิศทางของขั้วของ โดเมนต่าง ๆ จะวางตัวไปแนวเดียวกับสนามและจะยังคงอยู่ต่อไปเช่นนั้น แม้ว่าจะเอาสนามไฟฟ้าออกไปนั้นแสดงว่ามันแสดงคุณสมบัติ เช่น เฟอร์แมนท์อิเล็กทริก บางที่มันจะเป็นสารเปียโซอิเล็กทริก ถ้าหากว่ามันประพฤติตัวไปตามสมการของสารเปียโซอิเล็กทริก ตามธรรมชาติแล้ว เราจะใช้สมการเหล่านี้อธิบายคุณสมบัติของสารเปียโซอิเล็กทริกแท้ ๆ

3.1 คุณสมบัติทั่วไปของทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมจะมีความสัมพันธ์พิเศษคือมีเปียโซอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค และที่ใช้กันมากคือ ผลึกแร่ควอทซ์ (Quartz) , แบเรียมติทานเทท (Barium titanate) และลีดเซอร์โคเนท (Lead zirconate titanate) สารเหล่านี้เมื่อนำมาทำเป็นทรานสดิวเซอร์ ยังแสดงคุณสมบัติเป็นคาปาซิเตอร์ทางไฟฟ้าอีกด้วย ค่าคาปาซิแตนซ์เป็นไมโครฟารัดจะได้สัดส่วนกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant , K) ของวัสดุคูณด้วยพื้นที่ และหารด้วยความหนา โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์มีความคล้ายคาปาซิเตอร์ที่ว่า อิเล็กโตรดที่อยู่ 2 ข้างถูกแยกโดยช่องที่มีสารเซรามิก ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติบางประการของสารเซรามิกได้รับความร้อน จะทำให้ไดโพล (dipole) เคลื่อนไหวได้โดยเสรีและที่จุดนี้เมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้าเข้าไป ก็จะมีการจัดเรียงตัวและมีคุณสมบัติเปียโซอิเล็กทริก ถ้าภายหลังเซรามิกที่มีคุณสมบัติ นี้ถูกเผาให้ร้อนถึงอุณหภูมิสูงกว่าอีก คุณสมบัติ เปียโซอิเล็กทริก จะหมดไป ดังนั้นความร้อนจะสามารถทำลายทรานสดิวเซอร์ได้ โดยเฉพาะถ้าอุณหภูมิสูงเกินเคอริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่แสดงว่าทรานสดิวเซอร์ต้องการพลังงานไฟฟ้าเท่าใด จึงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ ทั้ง แบเรียมติทานเทท และ ลีดเซอร์โคเนท มีประสิทธิภาพมากกว่า ผลึกแร่ควอทซ์ 5-6 เท่า เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำมากและมีค่าคงที่ (Coupling constant) ต่ำมากจึงไม่ค่อยได้นำ ควอทซ์มาใช้ในเครื่องอุตสาหกรรมในปัจจุบัน

3.2 คุณสมบัติทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์

ความถี่ของทรานสดิวเซอร์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเชิงกลและลักษณะรูปร่าง ตัวอย่างเช่นเซรามิกแท่งเหลี่ยมแบนจะมีความถี่เรโซแนนซ์ ได้ 3 อย่าง คือมีการยึดหดตามความหนาและตามรัศมี อย่างไรก็ตามก็ดี เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปก็สามารถทำให้ทรานสดิวเซอร์ยึดหดในแนวไหนก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้วไฟฟ้าที่ใช้บริษัทที่ทำทรานสดิวเซอร์จะกำหนดความถี่คงที่ สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละแบบของการยึดหด

$$\text{sonant frequency} = \frac{\text{constan t}}{\text{thickness(inch)}} \quad (3-1)$$

MATERIAL	CURIE TEMPERATURE	Q	DIELECTRIC CONSTANT(K)	COUPLING COEFFICIENT(KT)
Quartz	550 C	Very high	4.5	0.09
Barium titanate	100 C	400-700	1,700	0.38
Lead zirconate titanate	300 C	90-500	1,450	0.51

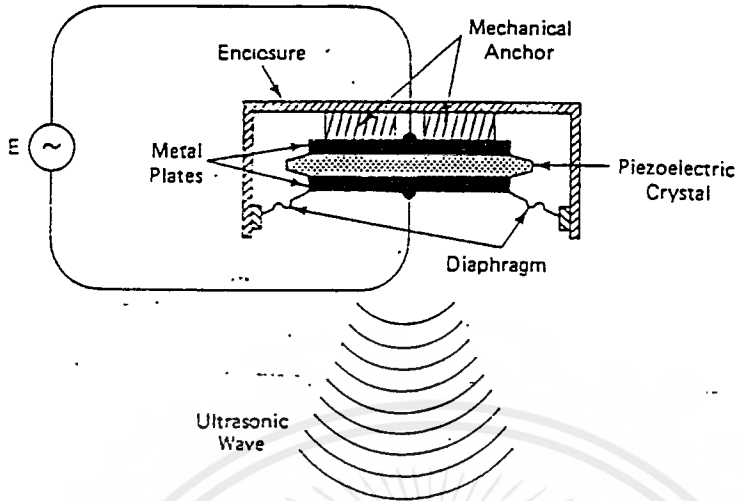
ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติบางอย่างของสารเซรามิก

3.3 เปียโซทรานสดิวเซอร์

โครงสร้างภายในจะประกอบด้วย “ชิ้นสารเปียโซอิเล็กทริก” (Piezoelectric element) ซึ่งสามารถทำได้จากสารหลายชนิด เช่น ผลึกแร่ควอตซ์ (quartz) , แบเรียมติทานา (barium titanate) , เกลือร์อ็อกเซด (rochelle salt) ฯลฯ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือชิ้นสารเปียโซอิเล็กทริกที่ทำมาจากแบเรียม ติทานา ซึ่งได้จากการผสมสารติทานเนียมกับแบเรียมคาบอเนท ที่อุณหภูมิประมาณ 1300-1400 °C และผลึกออกมาในรูปแบบของชิ้นสาร “เซรามิก” ซึ่งจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยส่วนใหญ่

จากชิ้นเซรามิกนี้จะถูกประกบด้วยแผ่นเพลท 2 แผ่น ซึ่งส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นเงิน เพื่อต่อเป็นขาของอิเล็กทรอนิกส์ต่อไปนั่นเอง ด้านข้างหนึ่งของแผ่นเพลทจะถูกยึดเพื่อให้ไม่เกิดการสั่น ส่วนอีกด้านจะยึดกับแผ่นโคอะเฟรมซึ่งสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้โดยแผ่นโคอะเฟรมนี้จะถูกสร้างให้มีลักษณะคล้ายเลนส์ เพื่อรวมคลื่นให้มีความเร็วสูงขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างต่อไป

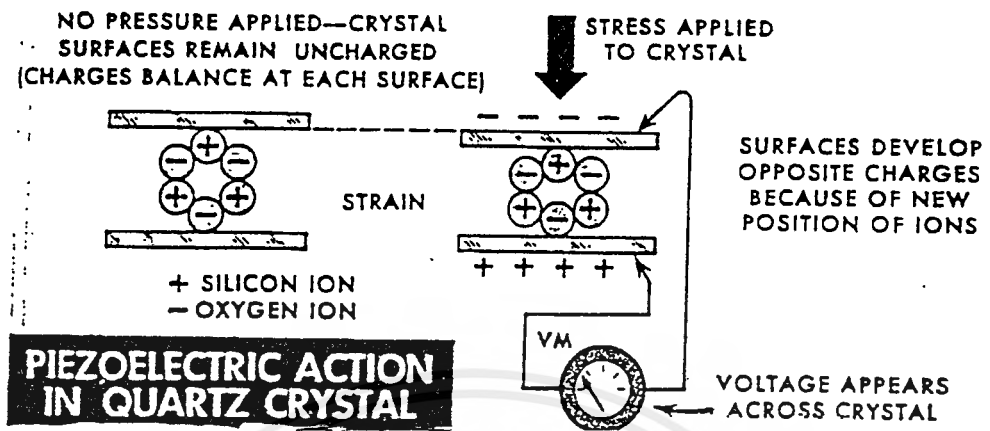
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในทั่ว ๆ ไปของทรานสดิวเซอร์

3.4 เปียโซอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค

ปรากฏการณ์แบบเปียโซอิเล็กทริก สามารถอธิบายได้คือ เมื่อสภาวะปกติยังไม่มี ความดัน หรือคลื่นมาตกกระทบกับชิ้นสารเซรามิก ประจุไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายในชิ้นสารจะเกิดการ สมดุล ทำให้แผ่นเพลทเงินที่ประกบอยู่มีศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากัน ซึ่งผลรวมของประจุไฟฟ้าบนแผ่น เพลทมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อมีความดันหรือคลื่นเสียงมาตกกระทบชิ้นสารเซรามิก จะทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นสาร คือ มีการโค้งงอไปตามลักษณะคลื่นที่ตกกระทบ ซึ่งใน กรณีนี้จะทำให้เกิดการจัดเรียงประจุไฟฟ้า คือ เกิดมีประจุตรงข้ามขึ้นบนแผ่นเพลทที่ประกบชิ้น สารเซรามิกอยู่ ซึ่งผลของประจุไฟฟ้าตรงข้ามนี้ทำให้เกิดเป็นแรงดันตกคร่อมแผ่นเพลททั้งสอง ขนาดของแรงดันตกคร่อมนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของความดันหรือคลื่นที่มาตกกระทบชิ้นสาร เซรามิกที่โค้งงอไปมา



รูปที่ 3.3 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก โดยอธิบายในลักษณะที่ชิ้นสารทำจากแร่ควอตซ์
 ทรานสดีิวเซอร์แบบเพียโซอิเล็กทริก สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่าง
 พลังงานกลกับพลังงานไฟฟ้า ในกรณีการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลคือตัวส่งคลื่น
 อุลตราโซนิคซึ่งการทำงานคือเมื่อเราป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งอาจมีความถี่ในช่วง 20-
 100 kHz แรงดันที่ป้อนนี้จะทำให้ชิ้นสารเซรามิกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยที่ด้านหนึ่ง
 ของชิ้นสารเซรามิกจะถูกกดกับแผ่นไดอะแฟรม เมื่อชิ้นสารเซรามิกเกิดการบิดตัวไปมาจะทำให้
 แผ่นไดอะแฟรมนี้อัดกับอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นความถี่เดียวกับสัญญาณที่ป้อนเข้ามา ซึ่ง
 คลื่นที่ผลิตได้จะมีกำลังเอาต์พุตสูงสุดเมื่อความถี่ที่ป้อนเข้ามามีค่าตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเป็น
 ความถี่ทางกลตามธรรมชาติของชิ้นสารเซรามิกชิ้นนั้น จะทำให้ความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากนี้จะมี
 ค่าลดลงกว่าความถี่เรโซแนนซ์มาก

ในทางกลับกันการเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้านี้ คือ ตัวรับคลื่น
 อุลตราโซนิค เราสามารถที่จะมองได้ว่าเป็นแหล่งจ่ายหนึ่ง ๆ เพราะมันไม่ต้องการแหล่งจ่ายอื่น ๆ
 มาป้อนก็สามารถสร้างแรงดันออกมาได้เพียงแต่มีขนาดแรงดันไม่สูงมากนัก โดยการทำงานของตัว
 รับคลื่นนี้เมื่อคลื่นซึ่งมีความดันมาตกกระทบบนแผ่นไดอะแฟรมซึ่งค่าความถี่ของคลื่นทำให้ชิ้น
 สารเซรามิกถูกบีบไปมา ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกบนชิ้นสารทำให้สามารถ
 สร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เดียวกับคลื่นที่มาตกกระทบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

เพาเวอร์มอสเฟต

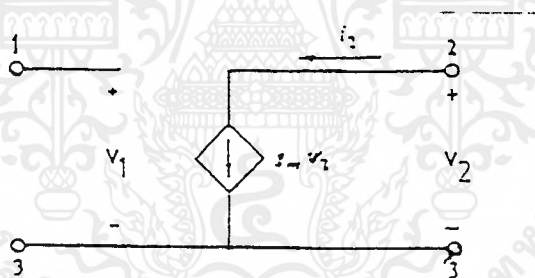
(MOSFET Power Transistor)

4.1 นิยามและความหมาย

มอสเฟต (MOSFET) ย่อมาจาก Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor การทำงานของมอสเฟตโดยการใช้สนามไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ประเภทการควบคุมแหล่งจ่ายด้วยแรงดัน (Voltage controlled source) ซึ่งสามารถเขียนวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 4.1 และมีความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$I_2 = g_m * v_1 \quad (4-1)$$

โดยที่ g_m คือ ค่าความจุถ่ายโอน (Transconductor) หรือ Mutual conductance



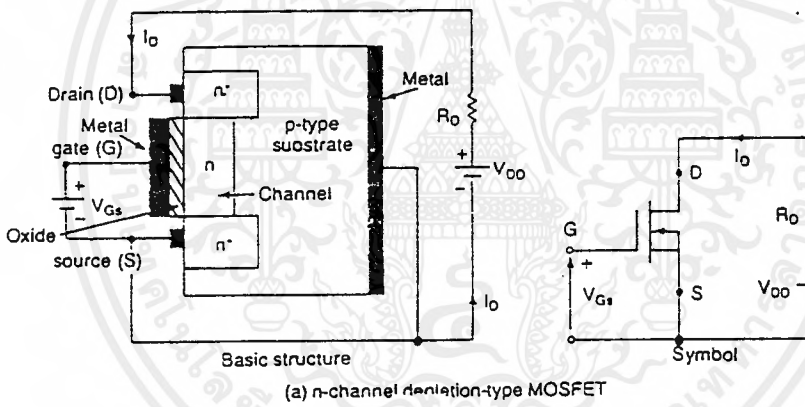
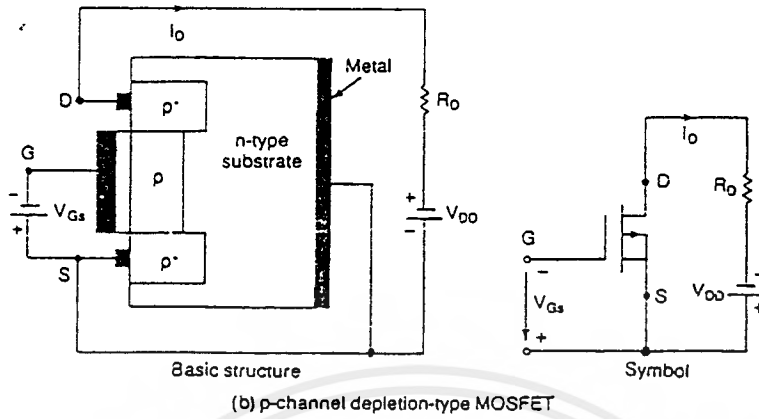
รูปที่ 4.1 วงจรเทียบเคียง หรือ อุปกรณ์ประเภทการควบคุมแหล่งจ่ายด้วยแรงดัน

มอสเฟตแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ มอสเฟตแบบดีพลีชัน (Depletion MOSFET) และ มอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement MOSFET) แต่ละชนิดแบ่งได้เป็น พีเอ็มอส (PMOS) และ เอ็นมอส (NMOS) ซึ่งจะกล่าวถึงส่วนประกอบของมอสเฟตดังในรูปที่ 4.2 พิจารณาตามรูปที่ 4.2 จะมีสารเอ็นอยู่ 2 บริเวณที่มาต่อเป็นขาเกต (Gate) วาง อยู่ในแท่ง p-substrate ที่ต่อออกเป็นขาดเรน (Drain) และ ซอส (Source) ส่วนช่องว่างระหว่างสารเอ็นเราเรียกว่า แชนแนล (Channel) และ แชนแนล จะถูกเคลือบด้วยแผ่นบางๆ ของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide layer) และ เกท จะสร้างโดยชั้นโลหะวางบนชั้นของออกไซด์ (Oxide) ดังนั้นลักษณะภายนอกของมอสเฟต จึงมี 3 ขาคือ เกท,เดรน และ ซอส และ

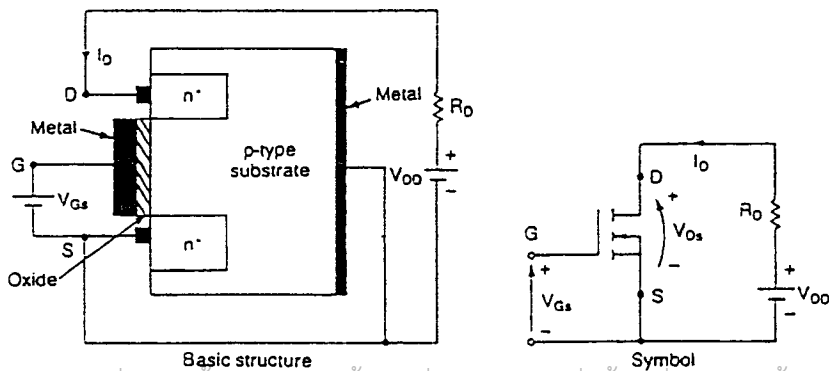
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

เขียนสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 4.3

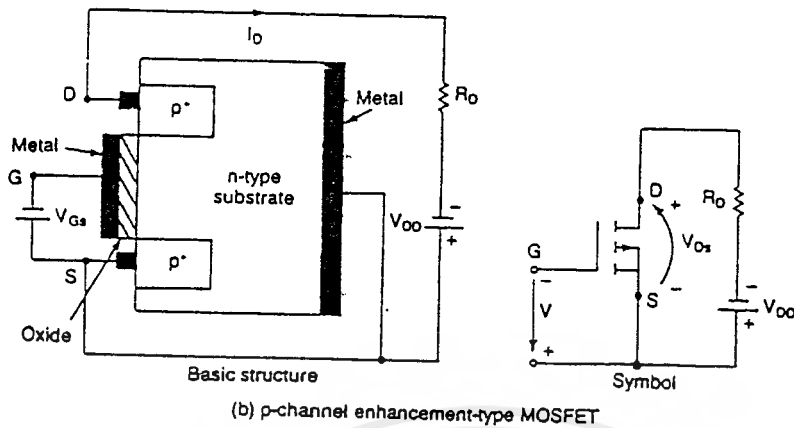
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (a) n-channel enhancement-type MOSFET นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) ลักษณะโครงสร้างของมอสเฟตแบบดีพลีชันทั้งแบบเอ็นและแบบพี

(ข) ลักษณะโครงสร้างของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ทั้งแบบเอ็นและแบบพี

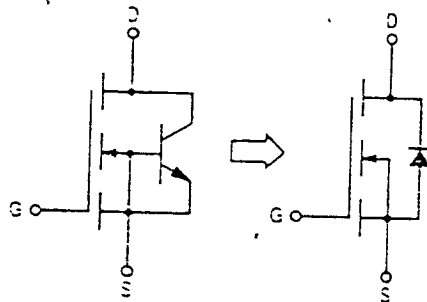
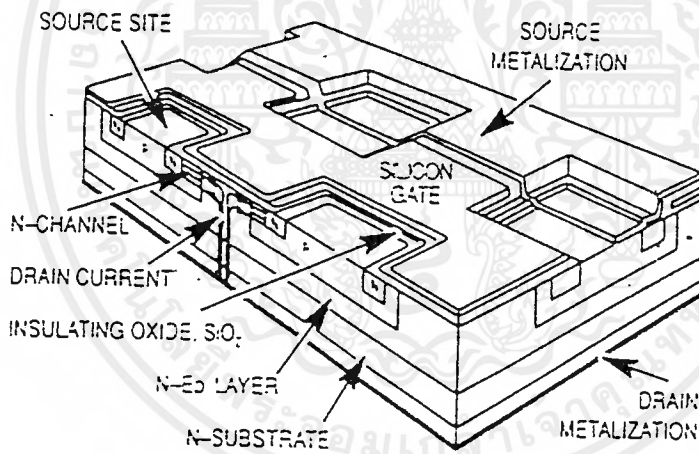
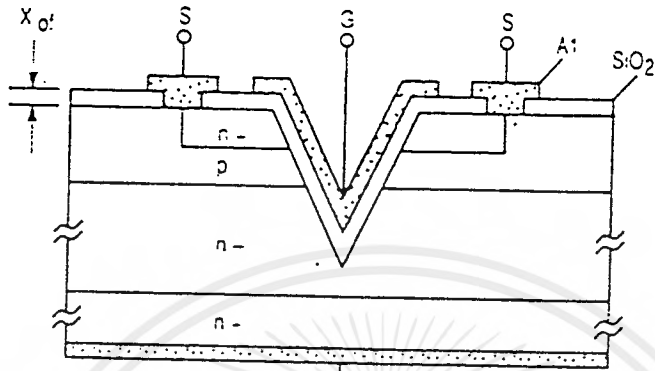
4.2 โครงสร้าง

เพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะเป็น แบบเอ็นแชนแนลที่ทำงานในโหมด เอนฮานซ์เมนต์ ซึ่งมีโครงสร้างและสัญลักษณ์ในรูปที่ 4.3 (ก) และ 4.3.(ข) เพาเวอร์มอสเฟต แต่ละตัวจะประกอบไปด้วยมอสเฟตขนาดเล็กนับพันตัว ซึ่งอยู่บนชิปเดียวกันต่อขนานกัน โดยที่กระแสในทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กแต่ละตัวมีทิศทางไหลในแนวตั้งของเพาเวอร์มอสเฟต

จะมี N⁻ type epitaxial layer บางๆที่ขึ้นอยู่กับงานในการทำมอสเฟตแต่ละตัวจะมีการกระจายของ P และ N⁺ region ลงบน N⁻ type epitaxial layer จากนั้นจะเป็นการทำเทกกับ epitaxial layer ภายได้เทก

สำหรับครนของมอสเฟตนั้นทำได้โดยการฉาบอะลูมิเนียมที่ N⁺ และ N⁻ ส่วนซอสจะทำได้โดยการฉาบอะลูมิเนียมลงบนชั้นของ P และ N⁺ ได้จากการแพร่กระจาย(Diffuse) จากลักษณะการทำซอสดังกล่าวทำให้เกิดเป็นไดโอดต่อกับซอสและคาโอดคือชั้น N⁺ และ N⁻ ต่อกับครนดังแสดงในรูปสัญลักษณ์ของมอสเฟต ในรูปที่ 4.3 (ข) ในสภาวะปกติถ้าเราให้แรงดันของครนเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอสแล้วมอสเฟตจะไม่สามารถนำกระแสได้เนื่องจากชั้น N⁻ และ P จะถูกไบอัสกลับแต่ถ้าเราใส่แรงดันบวกระหว่างเทกกับซอสแล้ว แรงดันบวกจะทำให้ อิเล็กตรอนมาออกันที่ชั้นP ภายได้เทกเกิดเป็นเอ็นแชนแนล เชื่อมระหว่างชั้น N⁺ และ N⁻ เกิดเป็นกระแสที่ไหลจากครนไปยังซอส เนื่องจากการนำกระแสของมอสเฟตชนิดนี้เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนผ่านเอ็นแชนแนล ที่ทำงานในมอสเฟตโหมดเอนฮานซ์เมนต์ ตัวเล็กๆแต่ละตัว

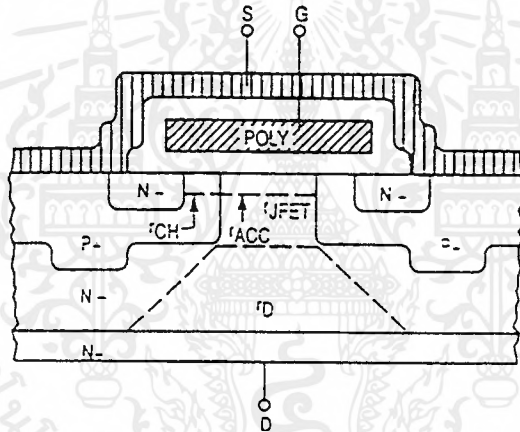
ตัวสามารถทำงานได้อย่างอิสระแต่มีสเฟต เหล่านี้จะถูกต่อขนานกัน โคนการฉาบอะลูมิเนียมที่
ขอส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.3 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทำงานของมอสเฟต

เมื่อป้อนแรงดันให้มีศักดาและขนาดที่เหมาะสม Polysilicon gate จะเหนี่ยวนำชั้น ครกกันข้ามของ Diffuse channel region ซึ่งแสดงโดย r_{CH} ในรูปที่ 4.4 จะทำให้กระแสไหล จากเดรนไปยังซอสสำหรับแรงดันค่าน้อยๆ ที่ป้อนให้เดรนและซอส กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นอย่าง ลินียร์เมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น กระแสเดรนจะอิ่มตัวเป็นสัดส่วนกำลังสองของแรงดันเกตกับซอส (V_{GS})

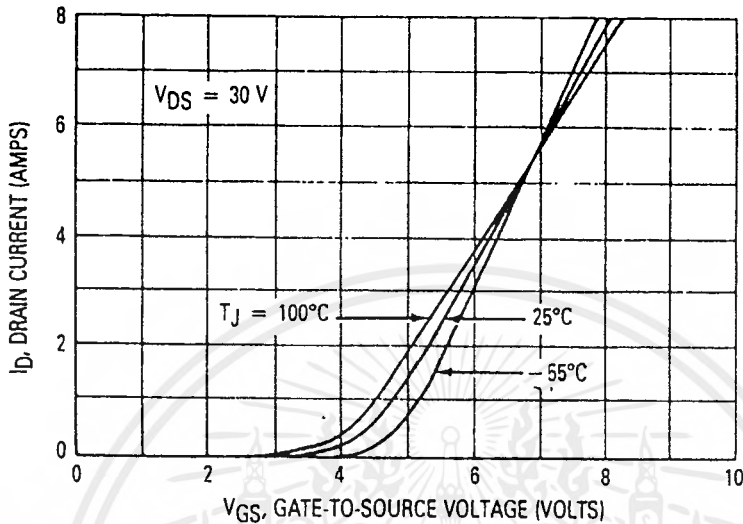


รูปที่ 4.4 แสดงการทำงานของมอสเฟต

4.4 พารามิเตอร์เพาเวอร์มอสเฟต

ค่าความจุ โอนย้าย เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอสเฟตเมื่อทำงานในสภาวะ แอคทีฟ (Active) โดยนิยามว่าเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันของกระแสเกต ($g_m = \frac{dID}{dVGS}$) ค่าความนำ โอนย้ายจะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะ

การทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



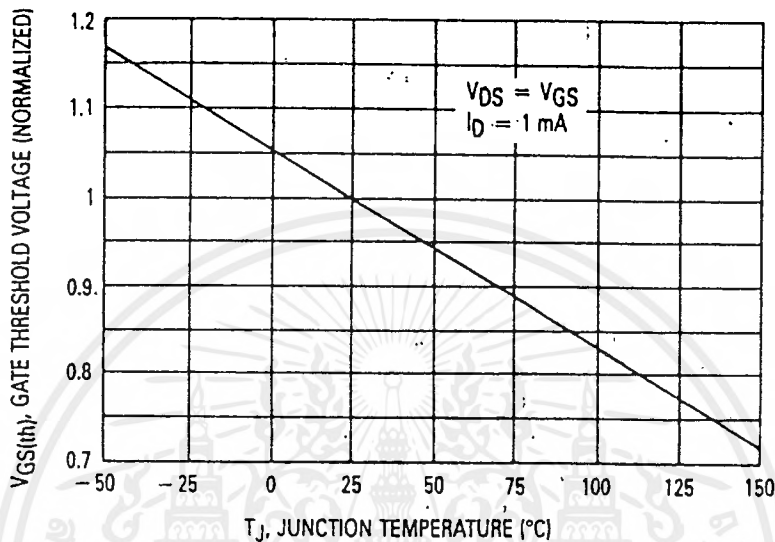
รูปที่ 4.5 คุณลักษณะการโอนย้ายของมอสเฟตเบอร์ MTP 5N40

สำหรับการทำงานเป็นสวิตช์ซึ่งจะทำงานระหว่างสภาวะเปิด (on) และปิด (off) ค่าความนำคอนจะไม่ถูกนำมาใช้เนื่องจากมอสเฟตนำกระแสเต็มที่จะทำงานอยู่ในช่วงโอห์มมิก (Ohmic region) เมื่อแรงดันเกตมีค่าสูงในช่วงการทำงานนี้ การเพิ่มแรงดันเกตจะมีผลน้อยมากต่อกระแสเดรน ดังนั้น g_{fs} จึงมีค่าใกล้เคียงศูนย์

4.5 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage, $V_{GS(th)}$)

แรงดันขีดเริ่ม คือแรงดันเกตต่ำสุดที่ทำให้กระแสเดรนเริ่มไหล โดยทั่วไปจะกำหนดค่าของแรงดันขีดเริ่ม ที่ 1A ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบสามารถควบคุมค่าของแรงดันขีดเริ่ม มีค่าต่ำจะทำให้ความเร็วในการสวิตช์สูงขึ้นเพราะว่ากระแสน้อยๆเพื่อประจุ (charge) ให้ตัวเก็บประจุแผ่นด้านอินพุต แต่ถ้าแรงดันขีดเริ่ม มีค่าต่ำเกินไปทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) สามารถจุดมอสเฟตได้เช่นเดียวกับแรงดันทรานเซียนท์ (Transient Voltage) สามารถส่งผ่าน (Couple) ไปยังเกตได้ซึ่งสามารถทำให้มอสเฟตนำกระแสได้เองแรงดันขีดเริ่มต้น จะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของรอยต่อ (Junction temperature) จากรูปที่ 4.6 จะพบว่ามอสเฟตมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ (Negative temperature coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



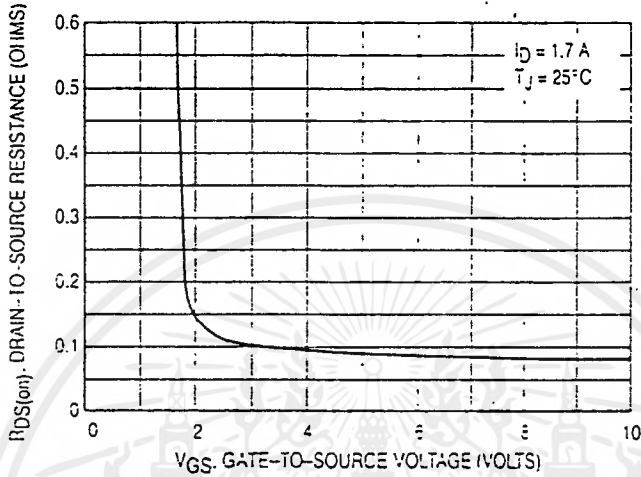
รูปที่ 4.6 แรงดันขีดเริ่มแปรไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

4.6 ความต้านทานขณะนำกระแส (On-resistance, $r_{DS(on)}$)

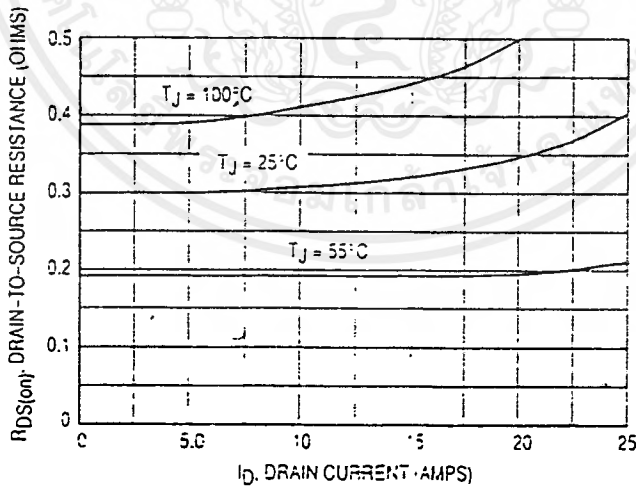
ค่าความต้านทานขณะนำกระแสของเพาเวอร์ MOSFET มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดจำนวนกระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ MOSFET โดยไม่ทำให้เกิดการแพร่กระจายกำลัง (Power dissipation) ที่มากเกินไปเมื่อมีการสวิตช์จากสถานะไม่นำกระแส ไปสู่สถานะนำกระแส ค่าของความต้านทานขณะนำกระแสจะลดลงจากค่าที่สูงมาก ไปสู่ค่าที่ต่ำมากในการลดค่าของความต้านทานขณะนำกระแสให้มีค่าต่ำสุดนั้นจะต้องให้ค่าของแรงดันเกตมีค่าต่ำพอ เพื่อให้กระแสเดรนมากพอที่จะทำให้ MOSFET ทำงานในช่วงโอห์มมิก

จากรูปที่ 4.7 (ก) แสดงให้เห็นการเพิ่มแรงดันเกตกับซอส ให้มีค่ามากกว่า 12 โวลต์จะไม่มีผลทำให้ ค่าความต้านทานขณะนำกระแส มีค่าต่ำลงและการเพิ่มแรงดันเกตกับซอส ให้สูงขึ้นทำให้เกิดแรงดันสไปค์ (Spike) มีค่ามากกว่าแรงดันสูงระหว่างเกตกับซอสมีค่า 20 โวลต์ ได้การเพิ่มแรงดันเกตกับซอส ให้สูงเกินไปจะเพิ่มเวลาในช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn off time) เนื่องจากมีประจุสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุด้านอินพุตมากเกินไปและจากรูปที่ 4.7 (ข) จะพบว่าเมื่อกระแสเดรนสูงขึ้นค่าของความต้านทานขณะนำกระแส จะสูงขึ้นอีกด้วยซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญชี้ให้เห็นว่าพารามิเตอร์ตัวอื่นก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเช่นเดียวกันอันเป็นผลกระทบมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขั้วนำกระแส



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขั้วนำกระแส ไปตาม

(ก) แรงดันเกตกับขอส และ กระแสเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ตัวเก็บประจุในมอสเฟต (MOSFET Capacitance)

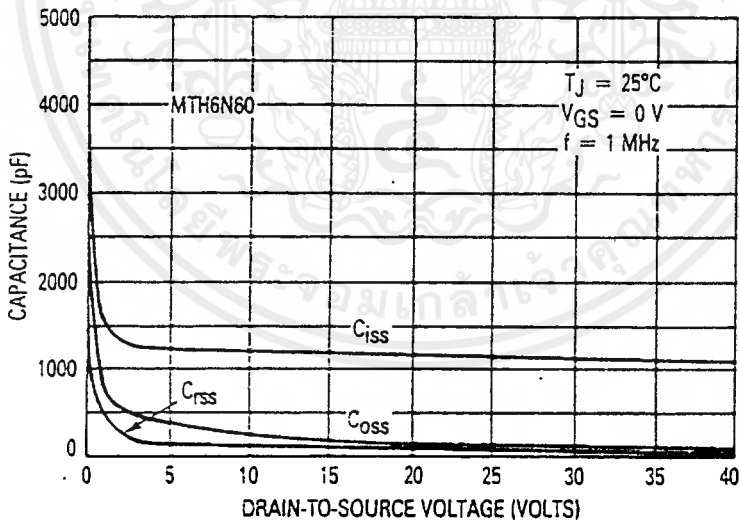
จากโครงสร้างของมอสเฟตจะทำให้เกิดตัวเก็บประจุระหว่างขั้วโลหะของเกรน และซอสกับเกตซึ่งเป็น Polision จะทำให้ตัวเก็บประจุระหว่างเกตกับเกรน C_{gd} และเกตกับซอส C_{gs} และหัวต่อ P-N ระหว่างเกรนกับซอสจะทำให้เกิดตัวเก็บประจุด้านขาเข้า (Common source input capacitance, C_{iss}) และตัวเก็บประจุโอนย้ายกลับ โดยที่

$$C_{iss} = C_{gd} + C_{gs} \quad (4-2)$$

$$C_{oss} = C_{gs} + C_{ds} \quad (4-3)$$

$$C_{rss} = C_{gd} \quad (4-4)$$

ตัวเก็บประจุเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงระหว่างเกรนกับซอส แรงดันระหว่างเกรนกับซอส (V_{DS}) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่แรงดันระหว่างเกรนกับซอสมีค่าต่ำๆ ดังแสดงใน รูปที่ 4.8 แต่ตัวเก็บประจุเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงออกม่น้อยมาก



รูปที่ 4.8 ตัวเก็บประจุในมอสเฟต

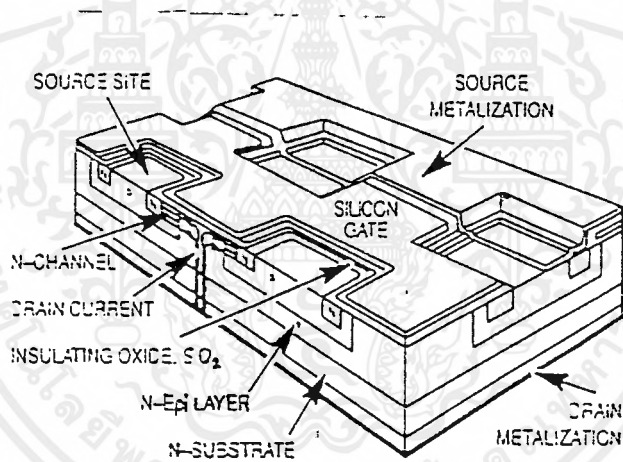
ในการใช้งานมอสเฟตค่า C_{iss} จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งที่ตัวเก็บประจุจะถูกอัดประจุ และคายประจุ โดยวงจรขับ (Drive circuit) ซึ่งมีผลต่อการสวิตช์ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจรขับจะมีผลอย่างมากต่อความเร็วในการสวิตช์ อนุญาตให้การเปลี่ยนแปลงจะมีการคำนวณที่แม่นยำยิ่งขึ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบเล็กน้อยต่อค่าเก็บประจุต่างๆ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลเล็กน้อยต่อเวลาในการสวิตช์ของมอสเฟตด้วย

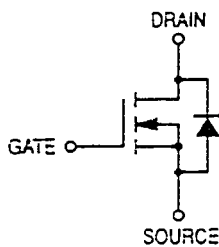
4.8 ใดโอดระหว่างเดรนกับซอส

ในตัวเพาเวอร์มอสเฟตทุกตัวจะมีใดโอดแอบแฝงอยู่ระหว่างเดรนกับซอส ในรูปที่ 4.9 (ก) แสดงรูปหน้าตัดของ TMOS ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารอยต่อ P-N เกิดขึ้นจากชั้น P และชั้น N-epitaxial และเหตุที่พื้นที่หน้าตัดตรงรอยมีขนาดกว้าง ดังนั้นค่าอัตรากระแส (Current Rating) ของใดโอดจึงมีค่าเท่ากับของมอสเฟตไม่ว่าจะเป็นแบบต่อเนื่อง หรือเป็นพัลส์

ในรูปที่ 4.9 (ข) จะพบว่าใดโอดถูกไบอัสตรง (Forward bias) ถ้าซอสมีศักดาเป็นบวกเมื่อเทียบกับเดรน เนื่องจากใดโอดเป็นชั้นส่วนที่สำคัญจึงได้มีการกำหนดค่า Forward on voltage , Forward turn-on time และ Reverse recovery time ไว้ดังในรูปที่ 4.10



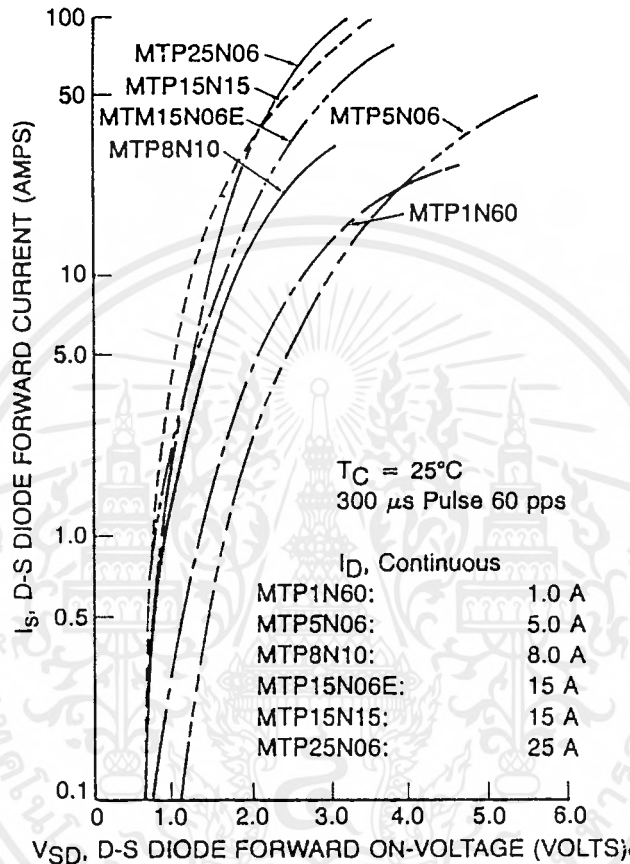
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 ก) แสดงรูปหน้าตัดของมอสเฟตแบบ TMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสอนในชั้นเรียนเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
 ข) สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ N-channel โดยรวมเดรนและซอสใดโอดไว้ในด้วยกัน
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและสิ่งต่างๆ ของหนังสือของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 คุณสมบัติทางฟอร์เวิร์ดของไดโอด

4.9 การขั้วเกตของมอสเฟต

ลักษณะสมบัติทางด้านขาเข้าของมอสเฟตนั้นจะมีความแตกต่างกับคุณลักษณะสมบัติด้านขาเข้าของบีเจที (BJT) กล่าวคือกระแสออกของบีเจที นั้นจะควบคุมด้วยกระแสเบส ส่วนกระแสออกของมอสเฟตนั้นจะถูกควบคุมด้วยแรงดันของเกต นอกจากนั้นแล้วความต้านทานขาเข้าของมอสเฟตจะมีค่าสูงมาก คืออยู่ในช่วงจิกะโอห์ม (Gigaohms) ซึ่งทำให้กระแสมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับบีเจทีขนาดเดียวกัน ดังนั้นการควบคุมมอสเฟตจึงใช้กำลังต่ำกว่าบีเจทีมากๆ คุณสมบัติอันนี้นับว่าเป็นข้อได้เปรียบของมอสเฟต เมื่อเทียบกับบีเจที อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณที่เร็วได้ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะอยู่ตัวนั้นกระแสที่ใช้ในการขับเคลื่อนของมอสเฟตจะมีค่าน้อยมาก คืออยู่ในช่วงนาโนแอมป์ (Nanoampere) เนื่องจากความต้านทานขาเข้าของมอสเฟตมีค่าสูงขึ้นถึงจิกะโอห์ม ซึ่งทำให้ดูเหมือนกับว่าเราสามารถขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟตได้ โดยวงจรขับที่สามารถจ่ายกระแสออกได้เป็นนาโนแอมป์ แต่ในความจริงแล้วการนำกระแสหรือการหยุดนำกระแส เพาเวอร์มอสเฟตนั้นเราจะต้องชาร์จหรือดิชาร์จ ตัวเก็บประจุด้านขาเข้าของเพาเวอร์มอสเฟตคือ Ciss หรือ Crss จากแรงดันระดับหนึ่งไปสู่แรงดันอีกระดับหนึ่ง ซึ่งความเร็วในการนำกระแสด้านขาเข้าของมอสเฟต ถ้าเราจะต้องให้การสวิตช์มอสเฟต เป็นไปอย่างรวดเร็ว เราจะต้องใช้วงจรขับที่มีความต้านทานขาออกต่ำที่สามารถจ่าย หรือรับกระแสในคอนสวิตช์ได้สูง ทั้งนี้ความเร็วในการสวิตช์ของมอสเฟตจะลดลงตามความต้านทานขาออกของวงจรขับ

เนื่องจากเกตของมอสเฟตจะถูกแยกออกจากช่องนำกระแสด้วยชั้นบางๆ ของซิลิกอน ซึ่งถ้าแรงดันระหว่างเกตกับซอสซึ่งมีค่าสูงเกินไปอาจทำให้ฉนวนนั้นทะลุและทำให้มอสเฟตเสียหายได้ ดังนั้นผู้ผลิตมักจะบอกแรงดันเกตกับซอสสูงสุดของมอสเฟตมาให้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีค่า 20 โวลต์ และในวงจรขับเกตโดยทั่วไปจะมีการจำกัดแรงดันเกตกับซอสโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) ขนาด 20 โวลต์ สองตัวมาต่ออนุกรมกันโดยต่อเอาโนดหรือคาโทดเข้าด้วยกันและต่อคร่อมเกตกับซอสเพื่อจำกัดเกตกับซอสไม่ให้เกิน 20 โวลต์ นอกจากนี้แล้วบางครั้งจะมีการต่อคร่อมความต้านทานเชื่อมระหว่างเกตกับซอสเพื่อป้องกันการนำกระแสของมอสเฟต โดยไม่เจตนาทั้งนี้เราเปิดวงจรเอาไว้ตัวเก็บประจุด้านขาเข้าของมอสเฟตอาจจะถูกชาร์จโดยกระแสรั่วไหล (Leakage current) ทำให้แรงดันระหว่างเกตกับซอสมีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งทำให้มอสเฟตนำกระแสได้ความต้านทานระหว่างเกตกับซอสจะเป็นทางผ่านของกระแสรั่วไหล และรักษาไม่ให้แรงดันระหว่างเกตกับซอสสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม

4.10 ลักษณะสมบัติของการสวิตช์มอสเฟต

เนื่องจากพาหะข้างมาก (Majority carrier) จึงทำให้ไม่มี Storage time ในคอนสวิตช์นำกระแส ดังนั้นความเร็วในการสวิตช์ของมอสเฟตจึงสูงกว่าความเร็วในการสวิตช์ของบีเจทีมาก แต่อย่างไรก็ดีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกตกับซอส และแรงดันเดรนกับซอส ยังต้องใช้เวลาในการชาร์จหรือดิชาร์จตัวเก็บประจุที่ได้ดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้นเวลาในการสวิตช์ของมอสเฟตขึ้นอยู่กับกระแสที่ใช้นั้นเองในรูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นของกระแสเกต แรงดันเกตกับซอส กระแสเดรน และแรงดันเดรนกับซอส ในระหว่างการนำกระแสและหยุดนำกระแสของมอสเฟต ซึ่งเราสามารถแบ่งช่วงเวลาออกได้ตามสภาพการประจุของตัวเก็บประจุด้านขาเข้าได้ดังนี้

ในระหว่างการนำกระแส เราสามารถแบ่งช่วงเวลาออกได้เป็น 4 ช่วงดังนี้ คือ

TI คือช่วงเวลาที่ Ciss ถูกชาร์จจนกระทั่งมีแรงดันเท่ากับแรงดันขีดเริ่มมอสเฟต
 ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะยังอยู่ในสภาพปิดกั้นกระแส T1 นี้จะมีค่าเท่ากับ ช่วงหน่วงเวลาการนำกระแส (Turn on delay time ,td(on)) คือนับเวลาจากที่แรงดันเกตกับซอส มีค่าประมาณ 10%ของค่าสูงสุดถึงเวลาที่แรงดันเดรนกับซอสลดลงถึงเวลาที่แรงดันเดรนกับซอส ลดลง 10% จากแรงดันในสถานะหยุดนำกระแส

T2 คือช่วงเวลาที่มอสเฟตเริ่มนำกระแสและแรงดันเดรนกับซอสลดลงอย่างรวดเร็ว Ciss มีค่าน้อยในช่วงนี้แรงดันเกตมีค่าค่อนข้างคงที่ T2 นี้มีค่าประมาณเท่ากับเวลาไต่ขึ้น (rise time , tr)

T3 คือเวลาที่แรงดันเดรนกับซอส และความต้านทานขณะนำกระแส ลดลงอย่างช้าๆ กระแสเดรน จะมีค่าใกล้เคียงเท่ากับค่าสูงสุด และกำลังสูญเสียยังคงมีค่ามากเนื่องจากแรงดันเดรนกับซอส ยังมีค่ามากกว่า แรงดันเดรนกับซอสขณะนำกระแส มากในช่วงเวลานี้ Ciss จะมีค่าสูงและถูกชาร์จให้มีแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

T4 คือช่วงที่มอสเฟตนำกระแสเกือบจะเต็มที่ แต่ Ciss ยังคงถูกชาร์จจนกระทั่งแรงดันเดรนกับซอส มีค่าเท่ากับ แรงดันเดรนกับซอสต่ำสุด และกระแสจะลดลงจนมีค่าเล็กน้อยมากในระหว่างการหยุดนำกระแส เราสามารถแบ่งช่วงเวลาออกได้เป็น 4 ช่วงคือ

T5 มอสเฟตยังคงนำกระแสเต็มที่ประจวบส่วนเกินใน Cgd ถูกดิซชาร์จเรียบร้อยแล้ว

T6 แรงดันเดรนกับซอสเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ กระแสเดรนลดลงเล็กน้อย Ciss จะมีค่าสูงและถูกดิซชาร์จให้มีแรงดันลดลงอย่างช้าๆ

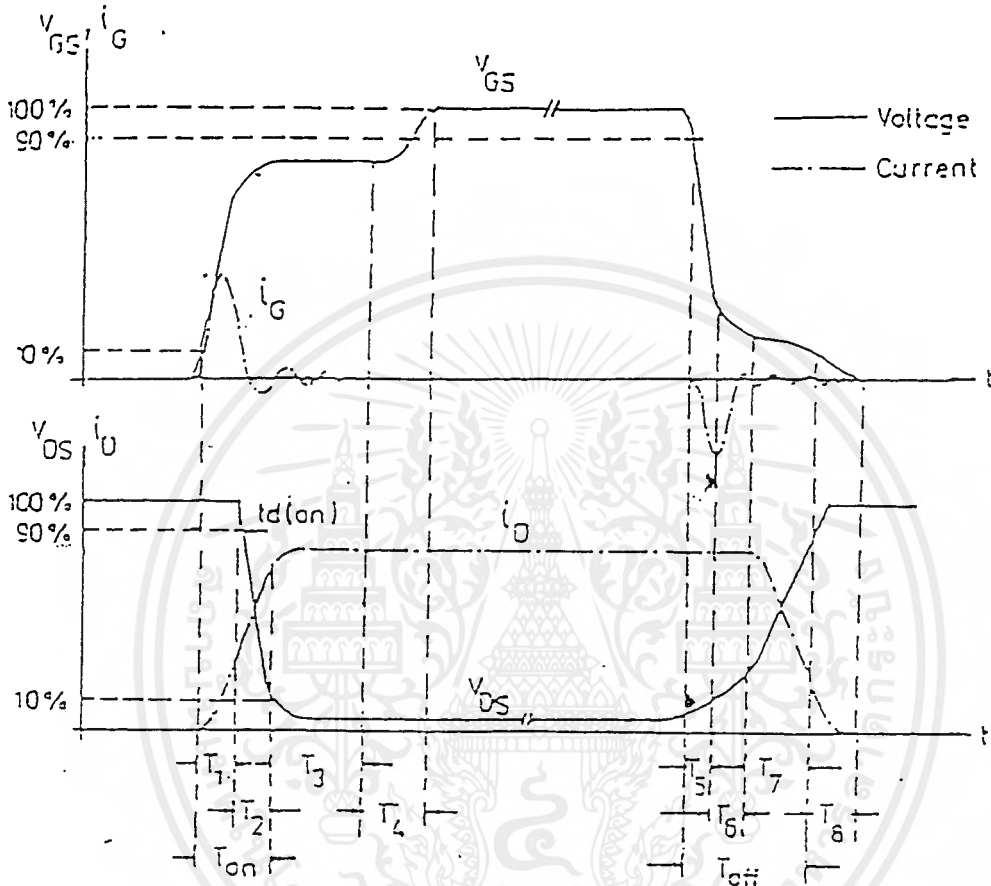
T7 แรงดันเดรนกับซอสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมอสเฟตเริ่มเปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะหยุดนำกระแส เมื่อ แรงดันเกตกับซอส,กระแสเดรน, Ciss จะมีค่าลดลง

T8 มอสเฟตหยุดนำกระแสแต่ Ciss ยังคงถูกดิซชาร์จต่อไปจนกระทั่งแรงดันเป็นศูนย์

ช่วงหน่วงเวลาหยุดนำกระแส(Turn off delay time,td(off)) จะมีค่าปรากฏใน

T5 - T6 และช่วงเวลายุคนำกระแสจะมีค่าประมาณเท่ากับ T7 ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสวิตช์มอสเฟตนั้นเราให้คำจำกัดความของ เวล่านำกระแส และเวลาหยุดนำกระแส เช่นเดียวกันกับในกรณีของบีเจที



รูปที่ 4.11 รูปของการสวิตช์มอสเฟตโดยแสดงรูปคลื่นของแรงดันเกตกับซอส, กระแสเดรน, แรงดันเดรนกับซอส,กระแสเกต ทั้งในระหว่าง ช่วงการนำกระแส และช่วงการหยุดนำกระแส

4.11 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้งานเพาเวอร์มอสเฟต

สำหรับเพาเวอร์มอสเฟต การเกิดเซกชันคาร์เรียเบรคดาวน์เช่น ในไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะไม่เกิดขึ้น เพราะค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอสขณะนำกระแสของมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าน้อยลง ต่างจากกรณีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งจะเกิดเซกชันคาร์เรียเบรคดาวน์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกระแสมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเกิดการพังเสียหายได้อย่างรวดเร็ว เพาเวอร์มอสเฟตจึงมีพิสัยความปลอดภัยในกราฟ SOA กว้างกว่าเมื่อเทียบกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์และเนื่องจากเพาเวอร์มอสเฟตไม่เกิดเซกชันคาร์เรียเบรคดาวน์ อัตราทานกำลังสูญเสียสูงสุดของมันจะถูกจำกัดด้วยค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อภายในตัวมันเท่า

นั้น

4.11.1 พิกัดปลอดภัยฟอร์เวิร์ดไบอัส (Forward Bias Safe Operating Arca) FBSOA

ข้อจำกัดกำลังที่พิกัดปลอดภัย FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟตนั้น อาจแบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะดังนี้ คือ

1. ข้อจำกัดแรงดันตกคร่อมเดรนและซอสสูงสุดที่สามารถทนได้ (Maximum Drain-Source Voltage)
2. ค่ากระแสเดรนสูงสุดที่สามารถไหลผ่านได้ และไม่ทำให้โครงสร้างภายในเสียหาย (Thermal Limit)
3. ข้อจำกัดเนื่องจากค่าความต้านทานขณะนำกระแส
4. ข้อจำกัดการระบายความร้อนของตัวถัง (Package Limit)

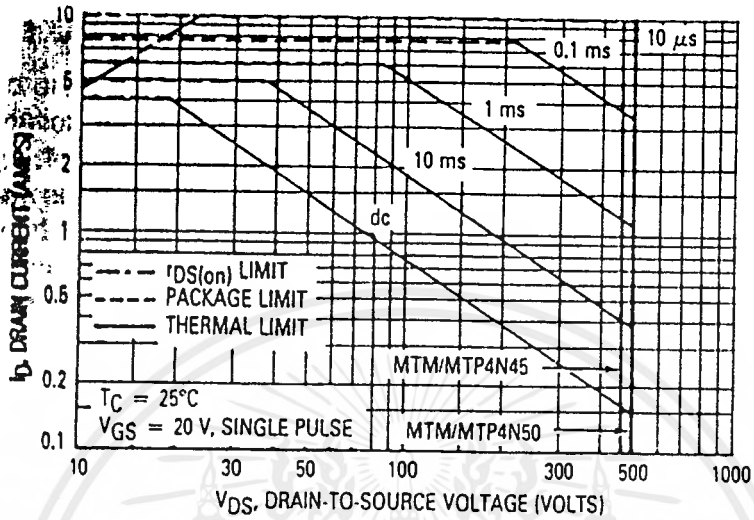
ตัวอย่างกราฟ FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟต แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 (ก) และเช่นเดียวกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ การระวังไม่ให้เกิดเงื่อนไขที่ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานภายนอกพิกัดของกราฟ FBSOA เป็นสิ่งสำคัญ และผู้ออกแบบจะต้องให้ความสนใจก่อนการเลือกเพาเวอร์มอสเฟตมาใช้งานทุกครั้ง รวมถึงป้องกันการเกิดเงื่อนไขที่จะทำให้เพาเวอร์มอสเฟตเกิดพังเสียหายได้ขณะทำงานของวงจรที่ออกแบบด้วย

4.11.2 พิกัดปลอดภัยสวิตช์จิงของเพาเวอร์มอสเฟต (Switching Safe Operating Arca) SSOA

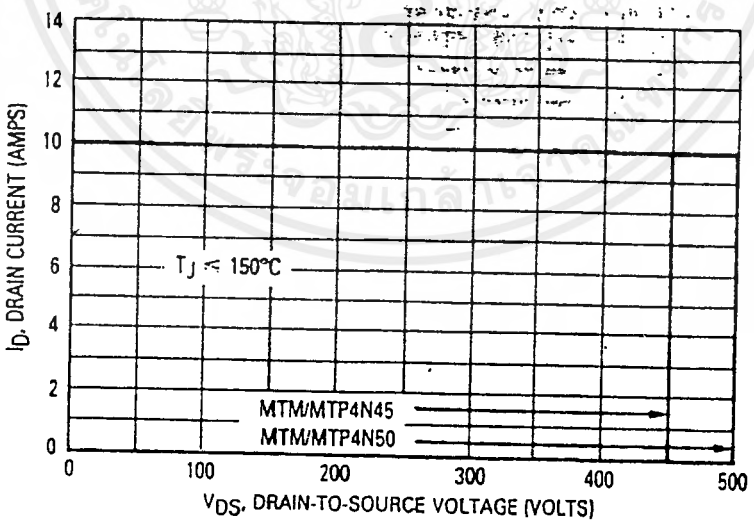
SSOA เป็นกราฟแสดงพิกัดกระแสและแรงดันใช้งานที่ปลอดภัยของเพาเวอร์มอสเฟตขณะเปลี่ยนสถานะ การใช้ SSOA สามารถใช้ได้ทั้งในการพิจารณาพิกัดปลอดภัยทั้งในช่วงเวลาเริ่มจะนำกระแส และช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

ปกติกราฟ SSOA จะใช้เพื่อพิจารณาเงื่อนไขปลอดภัยของเพาเวอร์มอสเฟตเช่นเดียวกับกราฟ RBSOA ของไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ตัวอย่างกราฟ SSOA แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 (ข) และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ RBSOA ของไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์แล้ว

จะเห็นได้ว่า SSOA จะมีพื้นที่ปลอดภัยมากกว่า และขีดจำกัดกำลังจะอยู่ที่แรงดันตกคร่อมเดรนกับซอสสูงสุดและกระแสเดรนสูงสุดเท่านั้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 ก) พิกัดที่ปลอดภัยฟอร์เวิร์ดไบอัส (Forward Bias Safe Operating Area)

ข) พิกัดที่ปลอดภัยของเพนเวอร์มอสเฟต (Switching Safe Operating Area)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนขึ้นเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12 กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของเพาเวอร์มอสเฟต

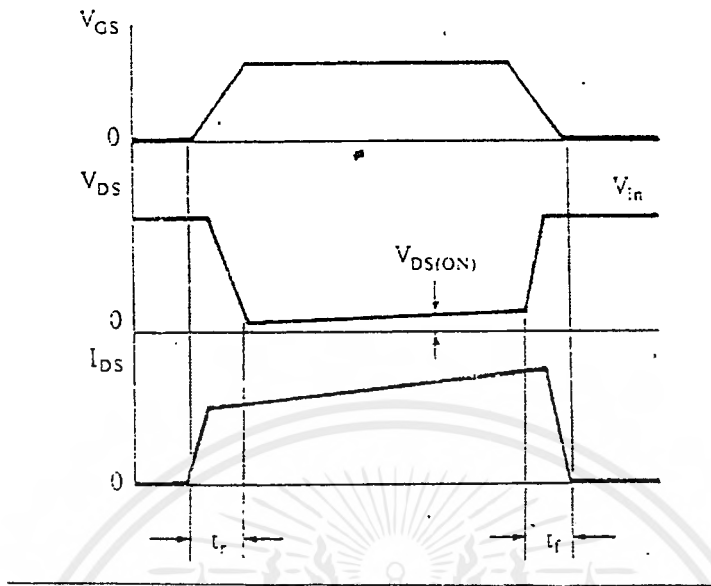
กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์มอสเฟตในขณะที่ทำงาน จะเป็นไปได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะ และกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส แต่สำหรับเพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแส และช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้นกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาก เพราะตามโครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้น จึงไม่มีปัญหาในลักษณะเดียวกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตามเพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสค่อนข้างสูง การสูญเสียเพาเวอร์มอสเฟตขณะนำกระแสจึงสูงกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะการตอบสนองของเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อทำงานเป็นสวิตช์

ถึงแม้ว่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจะค่อนข้างสั้น แต่โดยทั่วไปเพาเวอร์มอสเฟตมักถูกใช้งานที่ความถี่สูง การใช้งานที่ความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิรตซ์ การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจำเป็นต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส ของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน จึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลาด้วย ดังนั้นกำลังงานสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน P_D จะมีค่าเท่ากับ

$$P_D = P_{SW(ON)} + P_{SW(OFF)} + P_C \quad (4-5)$$

$$P_{SW(ON)} = \frac{0.5IPK(on) V_{in} * t_r}{T} \quad (4-6)$$

$$P_{SW(OFF)} = \frac{0.5IPK(off) V_{in} * t_r}{T} \quad (4-7)$$



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันคั่นคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส ในส่วนที่แรงจะเป็นส่วนที่จะเกิดกำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนได้สูง

$$P_C = I_{Dms}^2 * R_{DSon} (T_J) \tag{4-8}$$

- เมื่อ $P_{SW(ON)}$ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
- $P_{SW(OFF)}$ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
- P_C คือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
- $I_{PK(on)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส
- $I_{PK(off)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแส
- I_{Dms} คือ ค่ากระแส rms ที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน
- $R_{DSon}(T_J)$ คือ ค่าความต้านทานระหว่างเกรนและซอส ที่อุณหภูมิรอยต่อสูงสุดขณะทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต
- t_r คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
- t_f คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

4.13 ข้อได้เปรียบจากการใช้มอสเฟต

คำนวณความเร็ว

มอสเฟตกำลังมีความสามารถในการสวิตซ์ ซึ่ง ด้วยความเร็วโดยปราศจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

เขาจึงทำให้มอสเฟตมีความเร็วมากกว่าทรานซิสเตอร์สวิตซ์ซึ่งมาก

ความเร็วของมอสเฟตนั้น ขึ้นอยู่กับการอัดและคายประจุของการเก็บประจุของมอสเฟตเอง โดยจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ลักษณะของอินพุต

ขาเกตของเพาเวอร์มอสเฟตนั้นจะถูกแยกจากแหล่งจ่ายด้วยชั้นออกไซด์ที่ทำให้เกิดความต้านทานกระแสตรงประมาณ 40 เมกกะโอห์ม มอสเฟตถูกไบอัสด้วยแรงดัน 10 โวลต์ ด้วยแรงดันขนาดนี้จึงสามารถขับมอสเฟตนี้ได้ด้วย ไอซี ซิมอส หรือทีทีแอล ได้โดยจึงไม่ต้องคำนึงถึงกระแสของโหลด ทำให้ลดความยุ่งยากของวงจรขับ โดยรวมแล้วจะทำให้ประหยัดยิ่งขึ้น

ย่านทำงานปลอดภัย

การใช้งานไม่เกินพิกัดของมอสเฟตนั้น อาจจะทำให้มอสเฟตพังได้ แต่สำหรับมอสเฟตแล้วบางที่อาจจะไม่จำเป็นจะต้องใช้วงจรสับเบอร์ก็ได้ หรือใช้ค่าตัวเก็บประจุน้อยๆ ได้ขอบเขตของย่านปลอดภัย ถูกกำหนดด้วยพิกัดกระแสสูงสุด แรงดันเบรคควาน์ และความจุของอุปกรณ์ ขอบเขตของย่านปลอดภัยจะกว้าง เนื่องจากไม่เกิดเบรคควาน์เซกันศารี่

แรงดัน

แรงดันต่ำสุดของมอสเฟตกำลังหาได้จากค่าความต้านทานของอุปกรณ์ r_{DS} สำหรับอุปกรณ์แรงดันต่ำ ค่าของ r_{DS} จะต้องมีค่าต่ำที่สุด สำหรับอุปกรณ์แรงสูงค่า r_{DS} ต้องมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ r_{DS} เป็นบวก

สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิในตัวมอสเฟตสูงขึ้น กระแสเดรนจะมีค่าลดลง ดังนั้นการทำงานของมอสเฟตจึงไม่มีเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มหนีของอุณหภูมิ (thermal runaway)

เพิ่มกำลังได้

สามารถเพิ่มกำลังของสวิตซ์ได้โดยการนำมอสเฟตมาต่อขนานกันได้หลายๆตัว อย่างไรก็ตาม มอสเฟตกำลังก็มีข้อเสียเช่นกันคือ ค่าความต้านทานขณะนำกระแส ในมอสเฟตกำลังสูงกว่าในทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ ดังนั้น การใช้งานที่ความถี่ที่ต่ำซึ่งความสูญเสียขณะนำกระแสในอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง เป็นสิ่งสำคัญ จึงไม่ควรใช้มอสเฟตกำลัง

บทที่ 5

เรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์

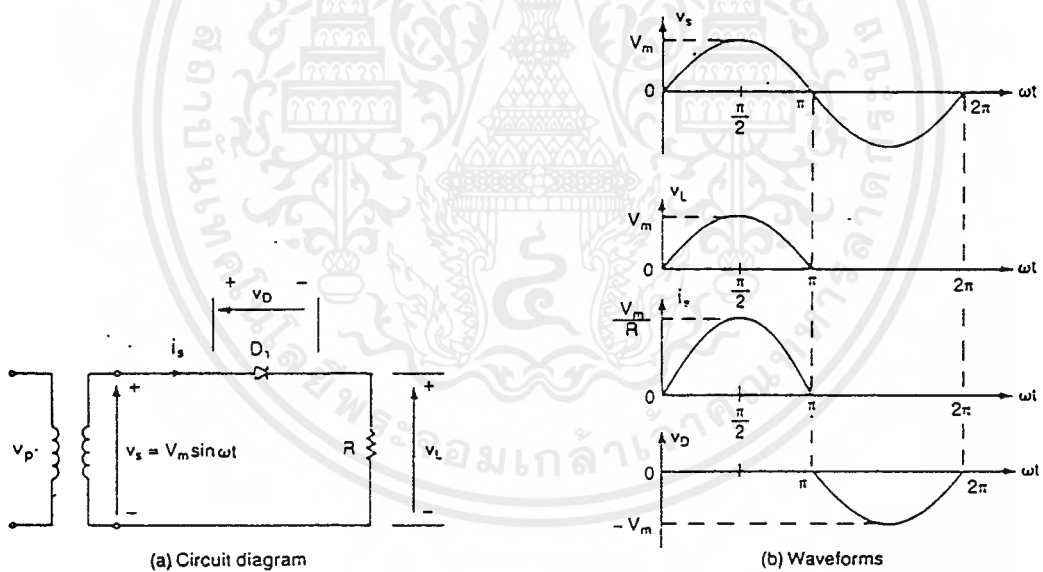
(Rectifier & Inverter)

5.1 เรกติไฟเออร์

การเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโหลดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะไม่ราบเรียบเหมือนกับได้จากแบตเตอรี่ แต่จะประกอบด้วย ริปเปิล (ripple) ในที่นี้จะศึกษาวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

5.1.1 วงจรเรกติไฟเออร์ชนิดหนึ่งเฟส ครึ่งลูกคลื่น

(Single Phase half wave rectifier circuit)



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรเรกติไฟเออร์ชนิดหนึ่งเฟส ครึ่งลูกคลื่น

ในขณะที่ไดโอดได้รับฟอร์เวิร์ดไบอัสคือ ที่แรงดันที่อาโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับคาโทด ไดโอดจะนำกระแสผ่านไปยังโหลด แรงดันที่ปรากฏที่โหลดคือแรงดันของแหล่งจ่ายเฉพาะซีกบวก และเมื่อไดโอดได้รับรีเวิร์ดไบอัสคือ แรงดันที่คาโทดเป็นบวกเมื่อเทียบกับอาโนด จะทำให้ไดโอดหยุดนำกระแสแรงดันที่โหลดในช่วงนี้จะเป็นศูนย์จนกระทั่งไดโอดได้รับฟอร์เวิร์ดไบอัสไดโอดก็จะนำกระแสอีกเป็นเช่นนี้สลับกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

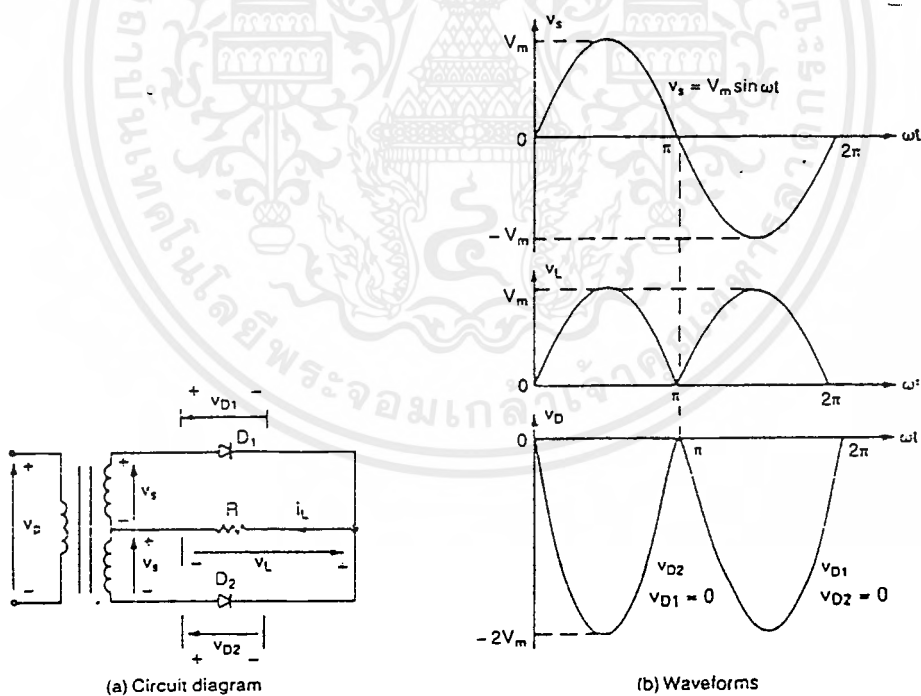
5.1.2 วงจรเรกติไฟเออร์ชนิดหนึ่งเฟส เต็มลูกคลื่น

(Single Phase full wave rectifier circuit)

ในวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ครึ่งลูกคลื่นจะใช้ไดโอดเพียงตัวเดียว แต่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส เต็มลูกคลื่นมีลักษณะการต่อหลายแบบ ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

ก) การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มลูกคลื่นโดยใช้หม้อแปลงที่มีจุดกึ่งกลาง(Full wave rectifier with center tap transformer)

การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มลูกคลื่นโดยใช้หม้อแปลงที่มีจุดกึ่งกลางดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 จะใช้ไดโอดเพียง 2 ตัว เปลี่ยนกันนำกระแสตัวละครึ่งลูกคลื่น ไดโอดตัวที่ 1 จะนำกระแสขณะที่แรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันที่ A เป็นบวกเมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางของหม้อแปลง ไดโอดตัวที่ 1 จะหยุดนำกระแสเมื่อแรงดันที่ A ตกลงสู่ศูนย์คือที่มุม 180 องศา และไดโอดตัวที่ 2 จะเริ่มนำกระแสต่อผ่านไปยังโหนด ไดโอดตัวที่ 2 จะหยุดนำกระแสที่มุม 360 องศา และไดโอดตัวที่ 1 จะนำกระแสต่อเช่นนี้สลับกันไป



รูปที่ 5.2 แสดงวงจรเรกติไฟเออร์แบบหม้อแปลงแท่งกึ่งกลาง

$$V = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_A \sin \omega t \, d\omega t \tag{5-1}$$

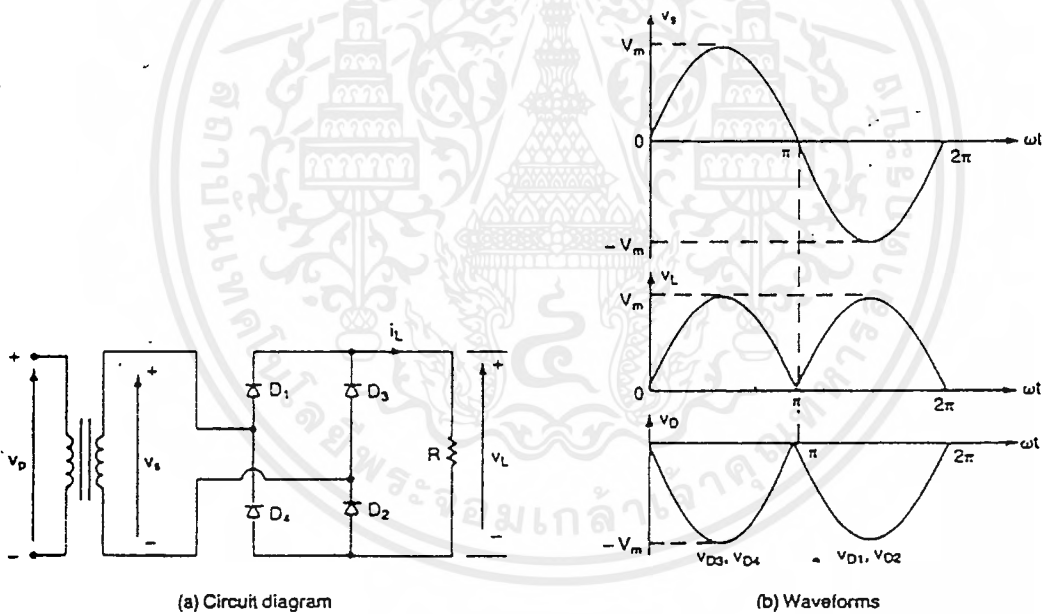
$V_A = V_B =$ แรงดันอาร์เอ็มเอส ระหว่างขั้ว A และ B เทียบกับจุดกึ่งกลางของ

หม้อแปลงทางค่านขดจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบริดจ์หนึ่งเฟส (bridge Rectifier)

วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบริดจ์หนึ่งเฟสจะประกอบด้วยไดโอดจำนวน 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ในวงจรแบบนี้จะสามารถจ่ายพลังงานกลับสู่แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับได้ กระแสไหลผ่านโหลดเมื่อไดโอด 1 และ 2 เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายอยู่ในไซเคิลบวกและจะหยุดนำกระแสเมื่อแรงดันตกเป็นศูนย์ที่มุม 180 องศา ไดโอด 3 และ 4 จะนำกระแสทันทีเมื่อเริ่มช่วงไซเคิลลบและจะหยุดนำกระแสเมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายเป็นศูนย์ที่มุม 360 องศา ไดโอด 1 และ 2 ก็จะนำกระแสเช่นนี้สลับกันไป



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรวงจรเรกติไฟร์เออร์แบบบริดจ์

$$V = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} v \quad (5-2)$$

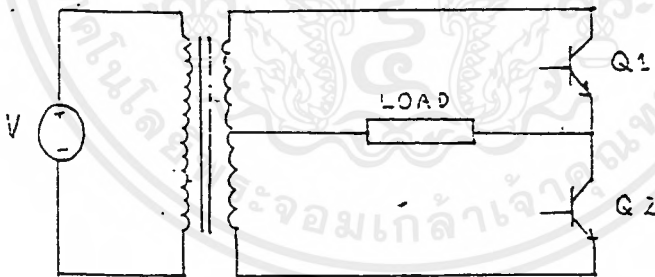
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรหลักที่ใช้ในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเป็นสวิทช์ปิดเปิด ในโครงการนี้ได้ใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์และใช้อินเวอร์เตอร์แบบเพสเดียว ซึ่งจะขอกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไป 3 แบบ คือ

5.2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล (Push Pull Inverter)

อินเวอร์เตอร์แบบนี้ใช้ทรานซิสเตอร์เพียง 2 ตัวเท่านั้น แต่ต้องมีหม้อแปลงเซ็นเตอร์แท็ป อินเวอร์เตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการกำลังสูงมากนัก เนื่องจากใช้หม้อแปลงเซ็นเตอร์แท็ปจะทำให้มีสไปค์โวลตเจจเกิดขึ้นมาก และข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของอินเวอร์เตอร์แบบนี้ คือ ต้องพันด้านปฐมภูมิให้ขดลวดสองขดที่แบ่งโดยจุดกราวด์มีความสมมาตรกัน ลักษณะอินเวอร์เตอร์แบบนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.4

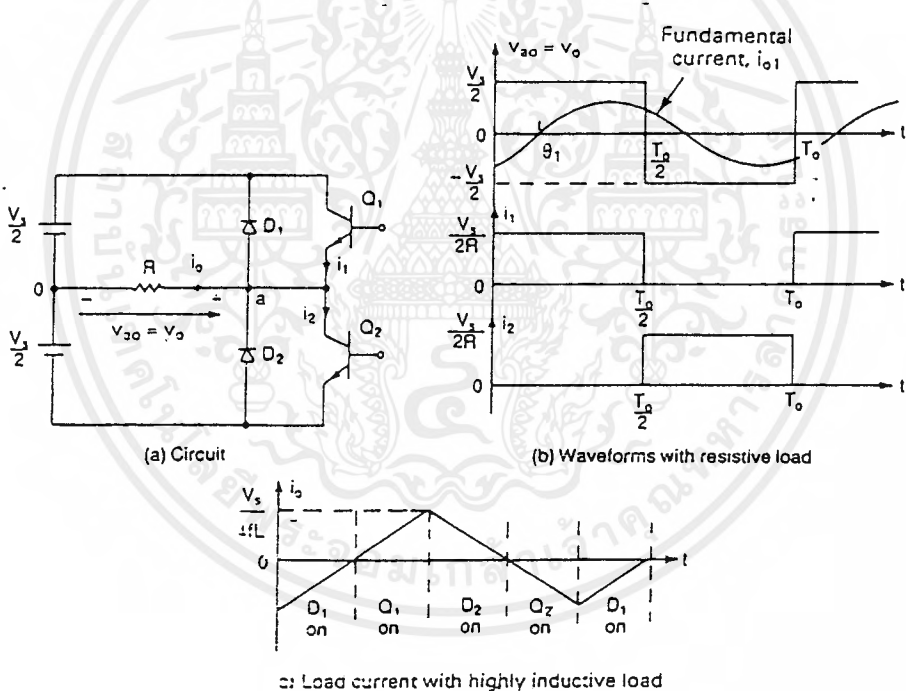


รูปที่ 5.4 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

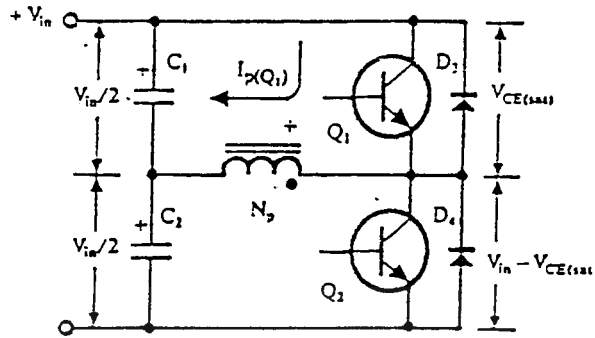
5.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge Inverter Circuit)

เนื่องจากตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 กำหนดให้มีค่าเท่ากับต่ออนุกรมอยู่ทางด้านอินพุท เพื่อแบ่งครึ่งแรงดัน แรงดันตกคร่อม C_1 และ C_2 จึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันที่อินพุทเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงานด้วยตัวละครึ่งคาบเวลาเช่นเดียวกันกับพหุพลาอินเวอร์เตอร์ และเพื่อให้ง่ายแก่การพิจารณาการทำงานของวงจร เราจะพิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุ C_0 ต่ออยู่ในวงจรเสียก่อน โดยให้ปลายของขดลวดไพรมารี N_p ที่ต่ออยู่กับ C_0 นั้นต่อโดยตรงเข้ากับจุดต่อระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ดังในรูปที่ 3.5

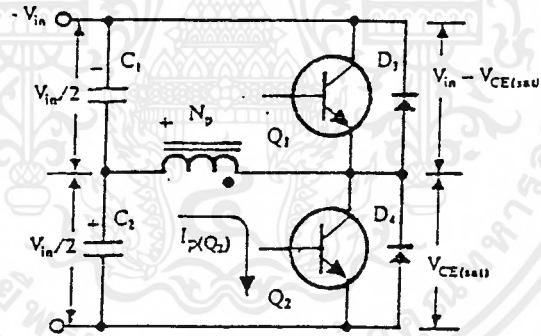


รูปที่ 5.5 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

รูปที่ 5.6 แสดงการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

ก) ขณะที่ Q_1 นำกระแส Q_2 จะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ $V_{in} - V_{CE(SAT)}$

และแรงดันตกคร่อม N_p เท่ากับ $V_{in} / 2 - V_{CE(SAT)}$

ข) ขณะที่ Q_2 นำกระแส Q_1 จะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ $V_{in} - V_{CE(SAT)}$

เช่นเดียวกัน และมีแรงดันตกคร่อม N_p เท่ากับ $V_{in} / 2 - V_{CE(SAT)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Q_1 เริ่มนำกระแสและ Q_2 ไม่นำกระแส แรงดันตกคร่อม Q_2 จะมีค่าเท่ากับ $V_{in} - V_{CE(SAT)}$ ส่วนแรงดันตกคร่อมไพรมารี N_p จะมีค่าเท่ากับ $V_{C1} - V_{CE(SAT)}$ หรือจะมีค่าเท่ากับ นั่นเอง $V_{in}/2 - V_{CE(SAT)}$ ในทำนองเดียวกัน เมื่อ Q_2 นำกระแสและ Q_1 ไม่นำกระแส แรงดันตกคร่อม Q_1 จะมีค่าเท่ากับ $V_{in}/2 - V_{CE(SAT)}$ เช่นเดียวกัน แรงดันตกคร่อมที่ขดไพรมารี N_p ก็ยังคงมีค่าเท่ากับ $V_{in} - V_{CE(SAT)}$ เนื่องจาก $V_{CE(SAT)}$ มีค่าประมาณ 0.5 ถึง 1 โวลต์ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อม Q_1 และ Q_2 ที่ด้านเซคันดารีจะมีลักษณะเดียวกันกับพหุคูณอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในโครงการนี้ได้ใช้ลักษณะอินเวอร์เตอร์แบบนี้

ข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบนี้ก็คือ ค่ากำลังที่ออกมาจะน้อยกว่าแบบพหุคูณและแบบฟูลบริดจ์ครึ่งหนึ่ง เนื่องจากค่าแรงดันตกคร่อมครั้งหนึ่งโดย C_1 และ C_2

คอมมิวเตตติ้งไดโอด D_1 และ D_2 ที่ต่อคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะมีหน้าที่ 2 ประการ คือ

1. ป้องกันการเกิดแรงดันสไปค์ในขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากค่าเหนี่ยวนำแฝงในหม้อแปลง โดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำจะถูกถ่ายเทออกไปยังอินพุตด้วยคอมมิวเตตติ้งไดโอด จึงไม่ทำให้เกิดสไปค์เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส

2. ในขณะที่ที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแสขดไพรมารี N_p จะมีการกลับขั้วแรงดันเกิดขึ้น ถ้าไม่มีคอมมิวเตตติ้งไดโอด Q_2 จะได้รับแรงดันที่คอลเล็กเตอร์เป็นลบ ในขณะที่ Q_1 ก็จะมีแรงดันตกคร่อมมากกว่าค่า $V_{in}/2$ ในกรณีนี้ไดโอด D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบอัสตรงจากแรงดันของขดไพรมารีและลดค่าแรงดันนี้ลงไป ในทำนองเดียวกับเมื่อ Q_2 เริ่มหยุดนำกระแส ไดโอด D_1 จะทำหน้าที่เช่นเดียวกันเป็นการป้องกันเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

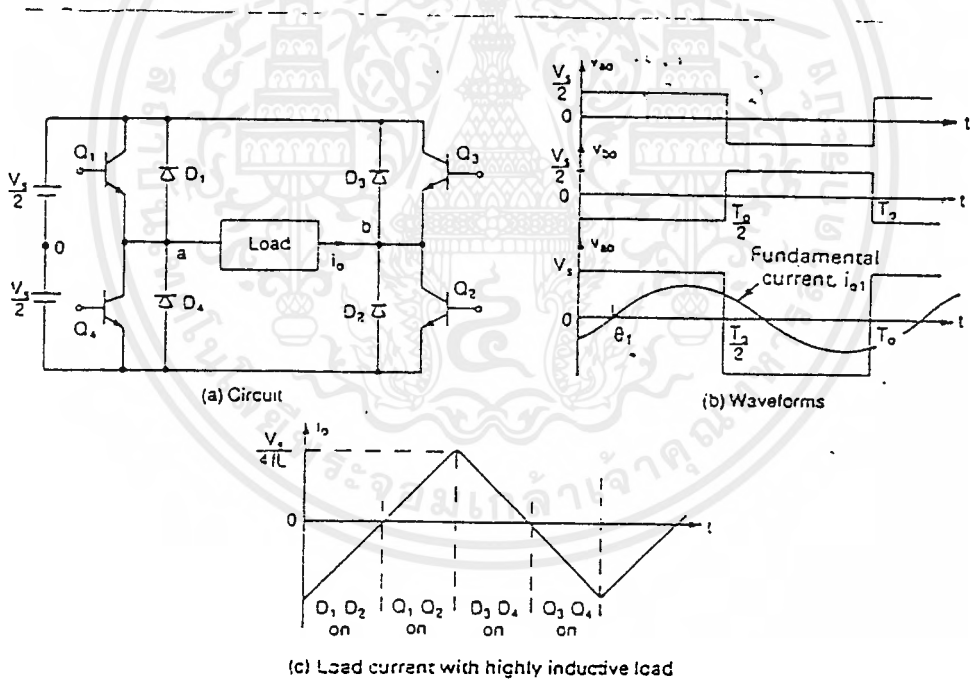
ไดโอดที่นำมาใช้เป็นคอมมิวเตตติ้งไดโอด D_1 และ D_2 ต้องเป็นชนิด fast recovery ต้องทนแรงดันย้อนกลับได้น้อย 2 เท่าของแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะหยุดนำกระแส

5.2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge Inverter Circuit)

ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ขณะทำงานจะมีแรงดันตกคร่อมพหุคูณไพรมารีเท่ากับแรงดันอินพุต แต่แรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีค่าเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุตเท่านั้น และค่ากระแสสูงสุดที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์นั้นแต่ละตัวจะมีค่าเป็นครึ่งของกระแสสูงสุดในฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่กำลังขาออกเท่ากัน

เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวจะทำงานโดยนำกระแส และหยุดนำกระแสสลับกันเป็นคู่ ๆ ในแต่ละครึ่งคาบเวลา Q_1 และ Q_2 จะนำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลาและ

เมื่อหยุดนำกระแส Q_3 และ Q_4 จะนำกระแสต่อพร้อมกันในครึ่งคาบเวลาที่เหลือสลับกันเช่นนี้เรื่อยไป ลักษณะการทำงานของวงจรที่ได้จึงเป็นเช่นเดียวกับฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ยกเว้นแรงดันตกคร่อมขดไฟโรมาจะมีค่าเท่ากับ $V_{in} - 2V_{CE(SAT)}$ ดังนั้นผลของการทำงานของวงจรจึงเหมือนผลที่ได้จากพหุขลุอินเวอร์เตอร์นั่นเอง จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อม Q_1 และ Q_2 ขณะหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากับ $V_{in} - V_{CEQ3(SAT)}$ และ $V_{in} - V_{CEQ4(SAT)}$ ตามลำดับ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อม Q_3 และ Q_4 ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ $V_{in} - V_{CE1(SAT)}$ และ $V_{in} - V_{CE2(SAT)}$ ตามลำดับเช่นเดียวกัน ส่วนไดโอด D_1 ถึง D_4 ทำหน้าที่เป็นคอมมิวเตตติ้งไดโอดให้กับวงจรเพื่อป้องกัน Q_1 ถึง Q_4 เช่นเดียวกับฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.7 แสดงวงจรพหุขลุอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น การนำออกเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วงจรควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์

วงจรควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์จะมีหน้าที่ในการทำให้มอเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์เปิดเพื่อทำให้เกิดความถี่สูงตามที่ต้องการที่โหลด วงจรส่วนเพาเวอร์เป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพราะฉะนั้นจึงต้องสร้างวงจรขับขึ้นมา 4 ชุดมาขับมอเตอร์ให้สลับกันสวิตช์ วงจรที่สร้างสัญญาณพัลส์ได้ใช้ IC เบอร์ TL494 กำหนดสัญญาณที่ความถี่ 28 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าเคปตามย่เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวงจรขับใช้วิธีการต่อหม้อแปลงในการขับนำเกทของมอเตอร์

6.1 ไอซีเบอร์ TL494 สำหรับโหมดควบคุมจากแรงดัน

ไอซีเบอร์ TL494 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยทำงานควบคุมจากโหมดแรงดัน ซึ่งจะได้นำมาเป็นวงจรสร้างพัลส์ที่ความถี่ 28 กิโลเฮิร์ตซ์ โครงสร้างภายในและการจัดขาของ TL494 แสดงในรูปที่ 6.1 การทำงานของไอซีจะเป็นดังนี้

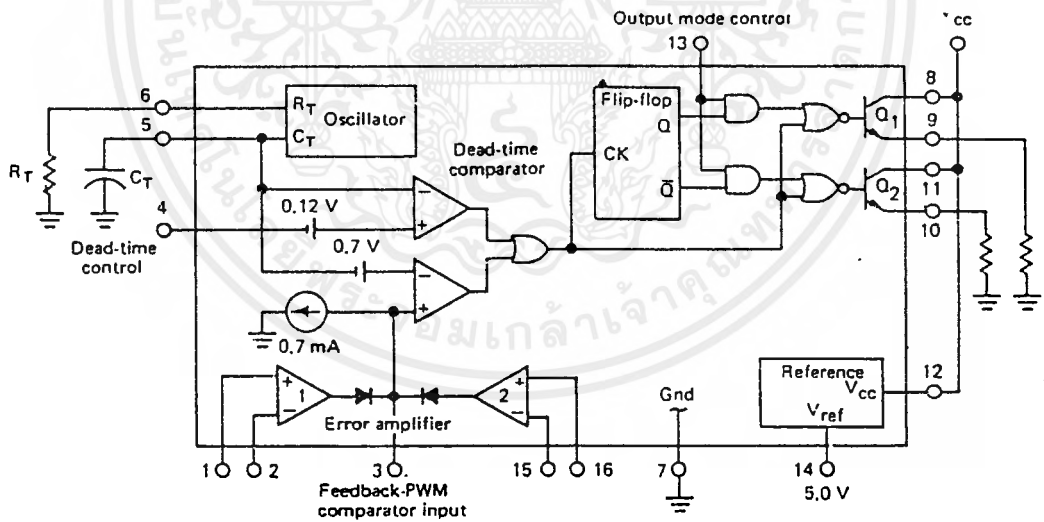


FIGURE 7-4 Internal block diagram of the TL494 PWM controller. (Courtesy of Motorola Semiconductor Products, Inc.)

รูปที่ 6.1 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ TL494

6.1.1 การกำหนดเวลาคาบการทำงาน

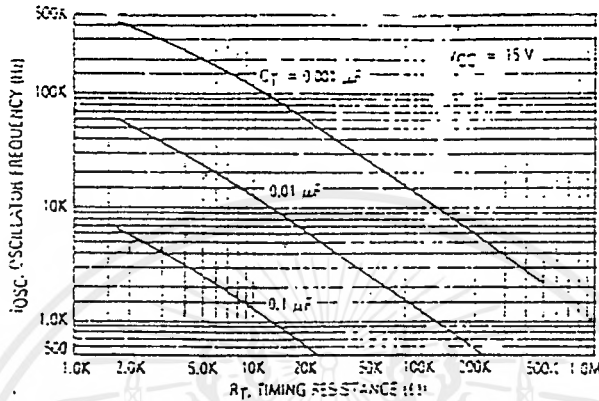
วงจรของ TL494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของ

เอาต์พุตพัลส์ กำหนดได้โดยค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของไอซี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จาก

$$T = \frac{R_T C_T}{1.1} \quad (6-1)$$

$$f = \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (6-2)$$



รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่า $R_T C_T$ ในการกำหนดความถี่ ที่ความถี่การทำงาน 28 กิโลเฮิรตซ์

$$R_T = 3928.57 \quad \Omega \quad C_T = 0.01 \quad \mu F$$

6.1.2 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซี จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 6 กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง (Error Amp) ทั้ง 2 ตัว ที่ PWM Comparator ส่วน NOR เกทที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาต์พุต Q_1 และ Q_2 จะทำงานก็ต่อเมื่อขา C_k ของฟลิปฟลอป อยู่ในสถานะ low เท่านั้น ซึ่ง C_k จะเป็น low ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจากวงจรขยายความแตกต่างทั้งสอง นั่นคือแรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ หากมีค่าสูงขึ้นความกว้างเอาต์พุตของไอซีจะลดลงในทางกลับกันแรงดันที่ป้อนหากมีค่าลดลงความกว้างเอาต์พุตของไอซีจะเพิ่มขึ้น

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีสามารถกำหนดให้มีค่ามากที่สุด หรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วย การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 โวลต์ จนถึง 3.5 โวลต์ ส่วนวงจรขยายความแตกต่างทั้งสองตัวจะมีช่วงของอินพุตคอมมอนโหมคตั้งแต่ -0.3 ถึง $(V_{CC}-2)$ โวลต์ และสามารถใช้ตรวจสอบแรงดันหรือกระแสที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ได้วงจรขยายความแตกต่าง ทั้ง 2 ตัวจะให้เอาต์พุตในลักษณะให้สถานะ High (Active high) โดยต่อกันในลักษณะ OR ที่ขาอินอินเวอร์ตติ้ง (non-inverting) ของ PWM Comparator การต่อกันในลักษณะนี้ วงจรขยายความแตกต่างตัวที่ทำให้เกิดความกว้างเอาต์พุตพัลส์ต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างเอาต์พุตของไอซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

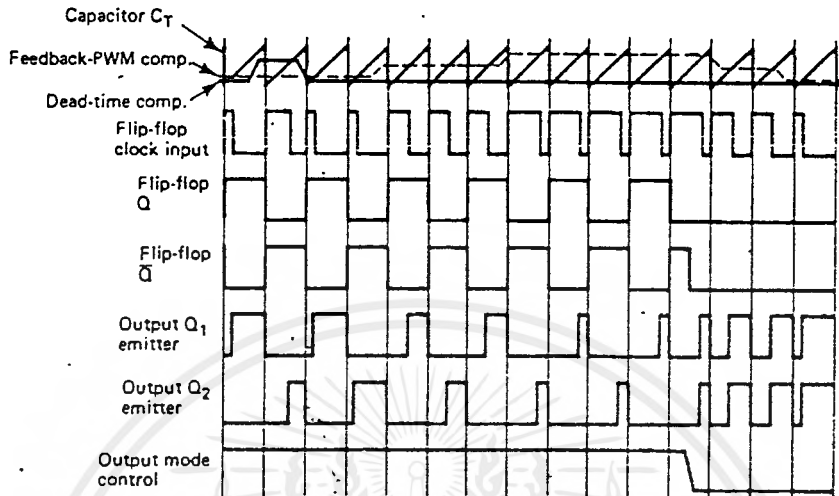
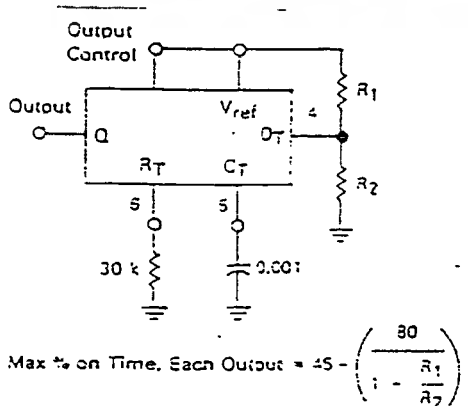


FIGURE 7-5 Timing diagram waveforms of the TL494 PWM controller. (Courtesy of Motorola Semiconductor Products, Inc.)

รูปที่ 6.3 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL494

6.1.3 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D (Dead Time)

TL494 สามารถให้ผู้ใช้กำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D ของวงจรได้เอง ด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ที่ขา 4 ของไอซี อย่างไรก็ตาม หากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาเพื่อต่ำสุดของไอซี จะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120 มิลลิโวลต์ที่ต่ออยู่ใน ดังนั้นช่วงเวลา t_{on} สูงสุดของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซีจะเท่ากับ 48 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 (output control) เข้ากับขา 14 (+5 V_{ref}) และมีค่าเท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์



รูปที่ 6.4 แสดงวงจรการต่อเคทามย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

$$\% \text{ ON} = 45 - [80 / (1 + R_1/R_2)] \quad (6-3)$$

ต้องการ Dead time = 10 % ดังนั้น % ON = 40 แทนค่าในสมการ จะได้

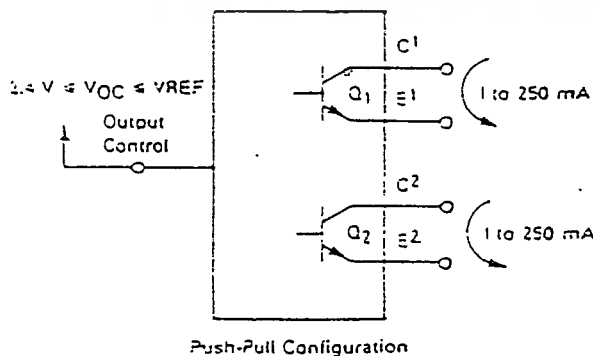
$$R_1/R_2 = 15$$

ให้ $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$

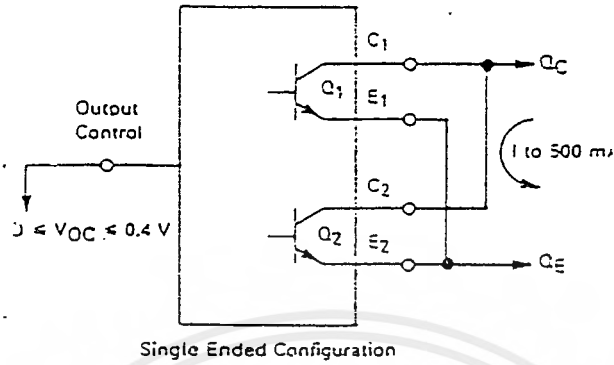
6.1.4 การเลือกใช้ Q_1 และ Q_2 ที่เอาต์พุตของไอซี

เอาต์พุต Q_1 และ Q_2 ของไอซีสามารถทำงานได้ 2 โหมด คือ ทำงานพร้อมกัน หรือ สลับกันทำงาน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 (output control) โดยขณะที่ C_T ดิสชาร์จ เอาต์พุตของ Dead-Time Comparator จะให้พัลส์ออกมา C_k จะมีสถานะเป็น High และหยุดการทำงานของ Q_1 และ Q_2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น High โดยการต่อเข้ากับขา 4 (+5 V_{ref}) Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงานตามจังหวะของฟลิปฟลอปเพื่อใช้ขับอินเวอร์เตอร์แบบพุ่มพุด ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะเป็น 2 เท่าของค่าคาบเวลาสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี แต่ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น low โดยการต่อลงกราวด์ (ยกเลิกฟลิปฟลอป) Q_1 และ Q_2 จะทำงานพร้อมกันและสามารถขนาน Q_1 และ Q_2 เข้าด้วยกันได้ ถ้าต้องการให้นำกระแสได้มากขึ้น ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับค่าคาบเวลาของสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี (ช่วงนำกระแสสูงสุดเท่ากับ 96 % ของค่าคาบเวลา)

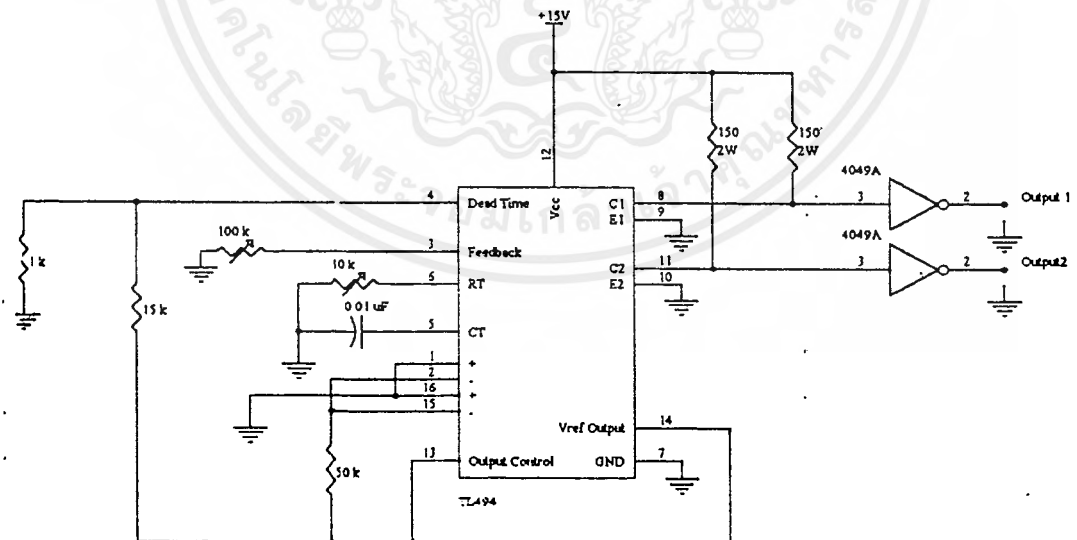
TL494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง $V_{cc} = 7$ ถึง 40 โวลต์ มีแรงดันอ้างอิงภายในโวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 10 มิลลิแอมป์เพื่อใช้กับวงจรภายนอกได้ โดยมีค่าความถูกต้อง $\pm 1.5 \%$ ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะการเลือกใช้เอาต์พุตของ TL494

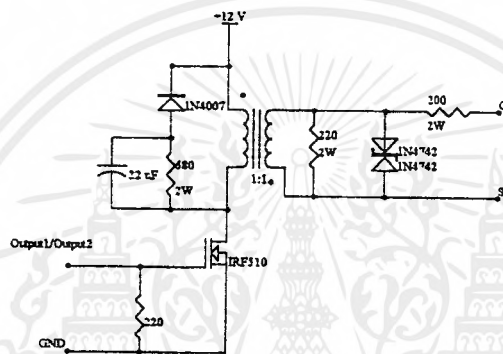


รูปที่ 6.6 การต่อวงจรสร้างพัลส์ความถี่ 28 kHz ของ TL494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 วงจรขับเกทของเพาเวอร์มอสเฟต

ในส่วนของวงจรขับเกทของเพาเวอร์มอสเฟตนั้น จะใช้วงจรขับด้วยหม้อแปลง โดยจะต่อมอสเฟตให้ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ เพื่อช่วยในการขยายกระแสไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น โดยผ่านหม้อแปลงที่มีอัตราส่วน 1 : 1 จากนั้นจะต่อขานานด้วยซีเนอร์ไดโอดเพื่อรักษาแรงดันเอาท์พุทให้คงที่ โดยค่าความต้านทานที่ต่อขานานด้านทุติยภูมิไว้เพื่อแบ่งกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดซึ่งรูปวงจรแสดงดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 วงจรขับเกทของเพาเวอร์มอสเฟต

6.3 วงจรสแน็บเบอร์ (Snubber Circuit)

วงจรสแน็บเบอร์เป็นส่วนหนึ่งที่เพิ่มเข้ามาในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อลดกำลังงานสูญเสียและป้องกันการเกิดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรขณะทำงานปกติ วงจรสแน็บเบอร์ในที่นี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ วงจรสแน็บเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส (turn off snubber) และวงจรสแน็บเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน (clame snubber) วงจรสแน็บเบอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และไดโอด ในบางครั้งจึงเรียกว่า วงจร RCD สแน็บเบอร์

6.3.1 วงจรสแน็บเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะเป็นไปได้สูงในขณะเปลี่ยนสถานะการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแส ก่อนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะหยุดนำกระแสทันที การระแจะลดลงอย่างช้า ๆ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันอินพุตอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 6.8 กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนในช่วงนี้ จึงเกิดขึ้นสูง

เพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสียในช่วงนี้อาจทำได้โดยการต่อวงจรสแน็บเบอร์เข้ากับ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมคอลเล็กเตอร์และอีมีเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงได้ทันกัน ซึ่งจะทำให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ ลักษณะการต่อวงจรสแน็บเบอร์อาจทำได้ดังรูปที่ 6.9

การทำงานของวงจร RCD สแน็บเบอร์ช่วงเริ่มหยุดนำกระแสจะเป็นดังนี้คือ เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีกระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 และไดโอด D_1 ของวงจรสแน็บเบอร์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C_1 ด้วย แรงดันที่ตกคร่อม C_1 จะทำให้แรงดันที่คอลเล็กเตอร์ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังนั้นถ้าให้ C_1 มีค่ามากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์จะถูกหน่วงออกไปเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงจนมีค่าน้อย ๆ ได้ทันกัน

ขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแสอีกครั้ง C_1 จะคายประจุผ่านตัวความต้านทาน R_1 ทิ้งไป แรงดันที่ตกคร่อม C_1 จึงลดต่ำลงได้อีกครั้งและสามารถทำงานได้ในช่วงต่อไป ค่าของ C_1 และ R_1 ที่เหมาะสมอาจหาได้จาก

$$C_1 = \frac{0.5(I_{P(PK)} * t_{off})}{V_m} \quad (6-4)$$

$$R_1 = \frac{t_{on}(Min)}{3C_1} \quad (6-5)$$

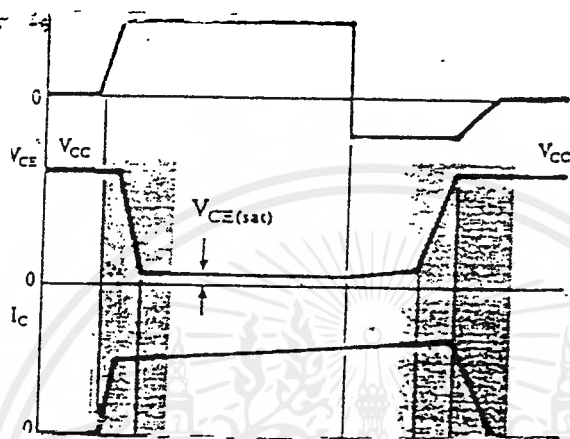
เมื่อ $I_{P(PK)}$	คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์
V_m	คือ ค่าแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์
t_{off}	คือ ช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์
t_{on}	คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

การคายประจุของ C_1 จะทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในตัว R_1 สูง ตัวความต้านทานจะต้องทนกำลังได้สูง โดยค่ากำลังงานสูญเสียใน R_1 อาจหาได้จาก

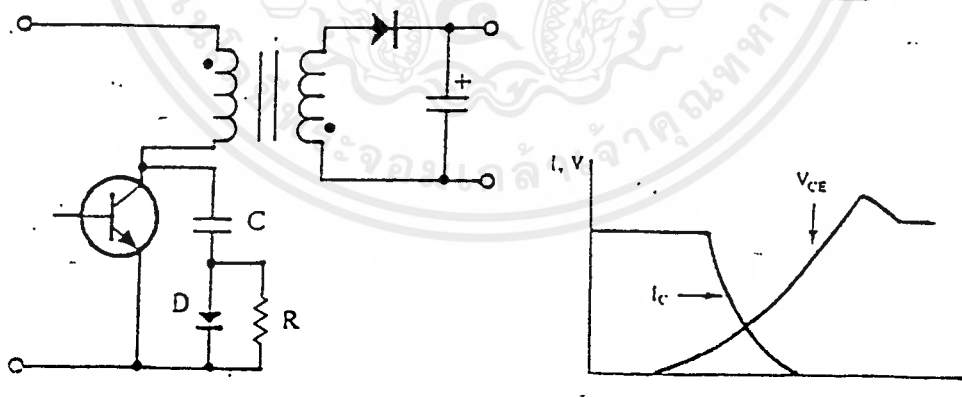
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_o = \frac{C_1(2V_m)^2}{2T} \tag{6-6}$$

เมื่อ T คือ ค่าคาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์



รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะการลดของกระแสและการเพิ่มของแรงดันคั่นคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ขณะเริ่มหยุดนำกระแส



รูปที่ 6.9 แสดงการต่อวงจร snubber ขั้วหยุดนำกระแสเพื่อหน่วงแรงดันคั่นคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

6.3.2 วงจร snubber ป้องกันแรงดันเกิน

ปกติการเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะทำงาน มักมีสาเหตุหลักการทำงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกินพิกัดปลอดภัย RBSOA แรงดันสไปค์ขณะหยุดนำกระแสจะทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแสมีค่าสูงเกินค่าแรงดันสูงสุดที่มันสามารถทนได้ และเกิดการพังเสียหายขึ้น วงจรสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกินจึงมีหน้าที่ป้องกันค่าแรงดันสไปค์ที่เกิดขึ้นไม่ให้เกินค่าปลอดภัยของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ การต่อวงจร RCD สับเบอ์เพื่อป้องกันแรงดันเกินอาจทำได้ดังรูปที่ 6.10

การทำงานของวงจรสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกินจะเป็นดังนี้คือ ในขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 จะถูกชาร์จประจุผ่านไดโอด D_1 จากแรงดันสไปค์ค่าของ R_1 จะทำให้แรงดันตกคร่อม C_1 มีค่าต่ำกว่าแรงดันสไปค์ และมีค่าคงที่ตลอดช่วงการเกิดแรงดันสไปค์ ค่าแรงดันสูงสุดที่คอลเล็กเตอร์ขณะเกิดแรงดันสไปค์จึงถูกกั้นไว้ด้วยแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 และเนื่องจากแรงดันสไปค์จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้นขณะที่แรงดันสไปค์มีค่าลดลง C_1 จะคายประจุออกมาผ่านตัวต้านทาน R_1 แรงดันที่ตกคร่อมคอลเล็กเตอร์จะกลับสู่แรงดันตามการทำงานปกติ

อาจกล่าวได้ว่า วงจรสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกินนั้นทำงานโดยการถ่ายเทพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำอันเป็นตัวทำให้เกิดแรงดันสไปค์ไปไว้ที่ตัวเก็บประจุ C_1 แทนนั้นคือ

$$\frac{1}{2}C_1V_C^2 = \frac{1}{2}L_1I_{P(PK)}^2 \quad (6-7)$$

เนื่องจาก V_C จะมีค่าได้ไม่เกิน $V_{CEO} - V_{clamp}$ ดังนั้น

$$C = \frac{L_1I_{P(PK)}^2}{V_{CEO} - V_{clamp}} \quad (6-8)$$

เมื่อ L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากฟลักซ์รั่วของขดโพรมารี

(Leakage Inductance)

$I_{P(PK)}^2$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

V_{CEO} คือ อัตราการทนแรงดันตกคร่อมสูงสุดของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

V_{clamp} คือ ค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมให้เกิดได้เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส

ค่าของ R_1 อาจหาได้จาก

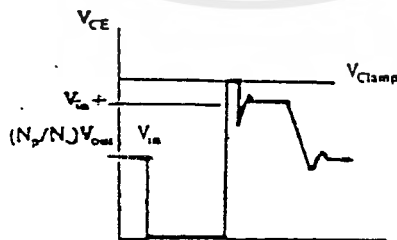
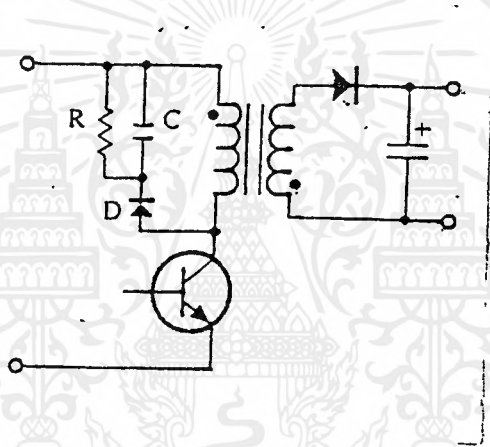
$$R_1 = \frac{t_{off}(\text{Min})}{3C_1} \tag{6-9}$$

กำลังงานสูญเสียใน R_1 จะมีค่าเท่ากับ

$$P_O = \frac{0.5Li^2 P(\text{PK})}{T} \tag{6-10}$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

t_{off} คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์



รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะการต่อวงจรสับเบอร์ดป้องกันแรงดันเกินเพื่อจำกัดค่าแรงดันสูงสุดที่ตก

คร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การสร้าง การทดสอบและผลการทดลอง

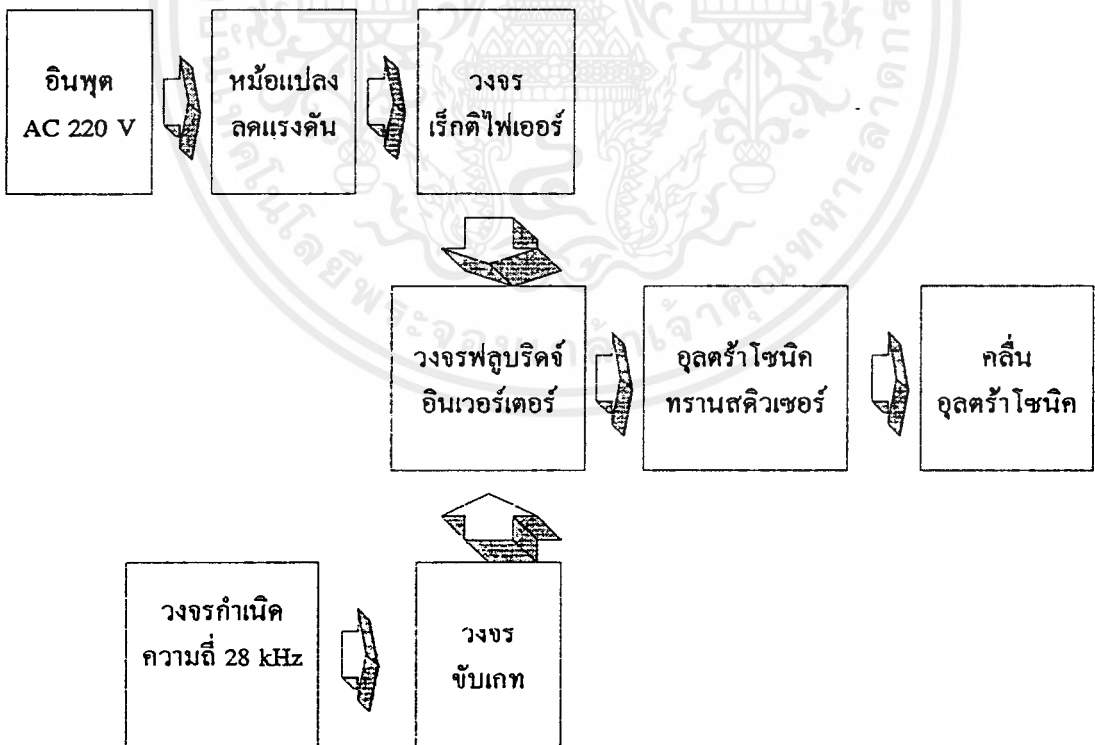
ในบทที่เป็นการสร้างเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก และนำเครื่องที่ได้มาทำการทดสอบและแสดงผลการทดลอง

7.1 การสร้าง

ในการสร้างเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกสามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้คือ

7.1.1 ส่วนของวงจรขับอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

จะใช้ไอซี TL 494เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 28 kHz จากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้มาป้อนเข้าวงจรขับเกทของมอสเฟตเพื่อจ่ายให้กับวงจรฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และเมื่อมอสเฟตทำงานจากนั้นจะนำสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์มาขับอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

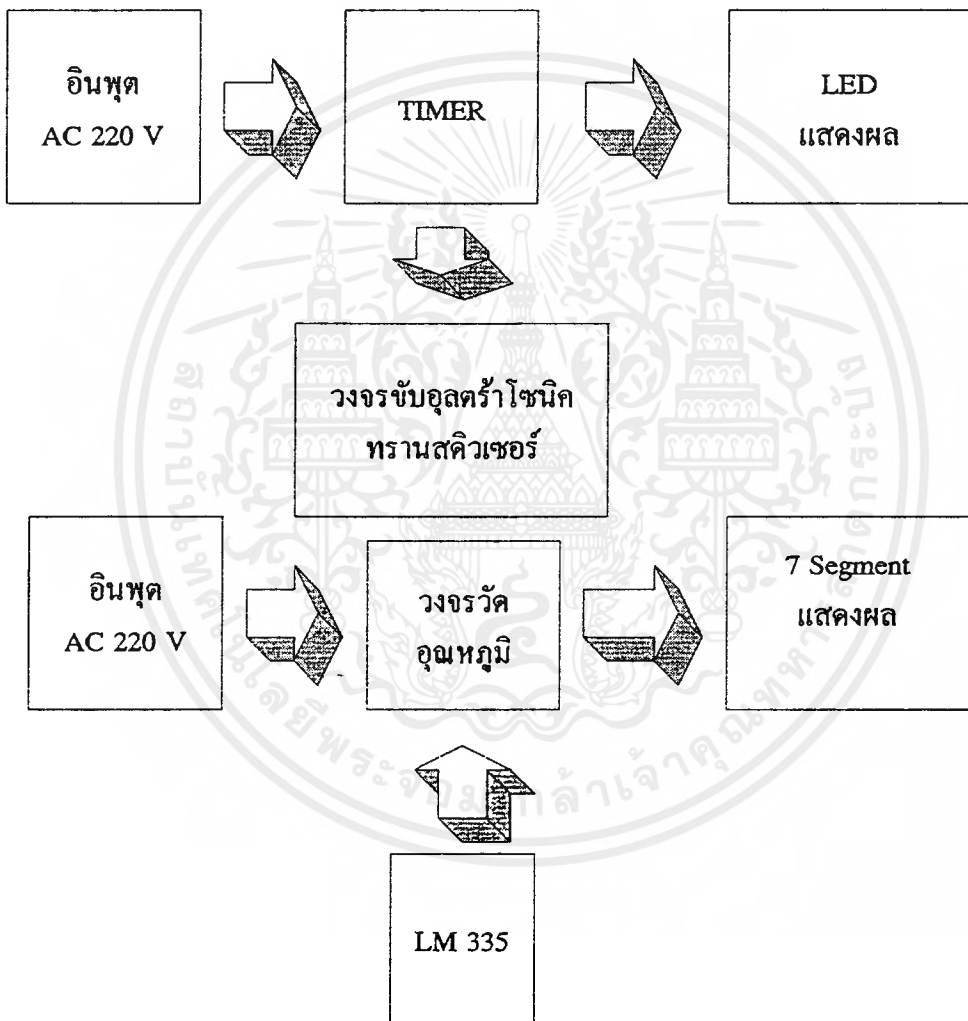


รูปที่ 7.1 แสดงบล็อกโคะแกรมวงจรขับอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.2 ส่วนของวงจรควบคุมการทำงาน

จะใช้วงจรตั้งเวลาดิจิทัล (digital timer) เป็นตัวควบคุมการทำงานของวงจรขับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ใช้กำเนิดคลื่นอุลตราโซนิค ซึ่งสามารถตั้งเวลาการทำงานได้และแสดงผลด้วย แอลอีดี (LED) การตัดการทำงานของวงจรจะตัดที่อินพุตที่ป้อนเข้าวงจรขับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ ส่วนวงจรวัดอุณหภูมิของน้ำจะใช้ LM 335 เป็นตัววัดอุณหภูมิ และแสดงผล เซเวนเซกเมนต์ (7 Segment)

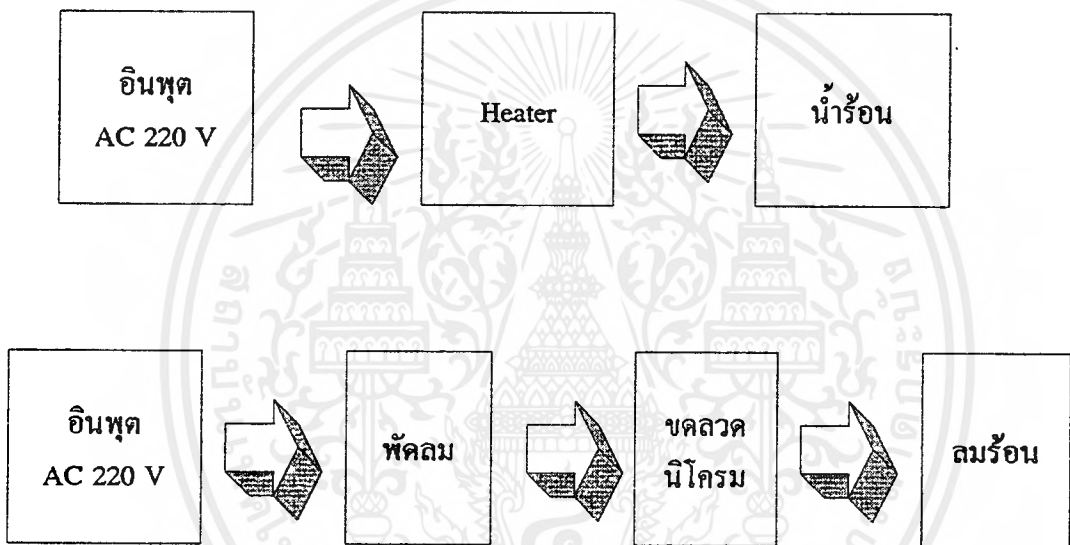


รูปที่ 7.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

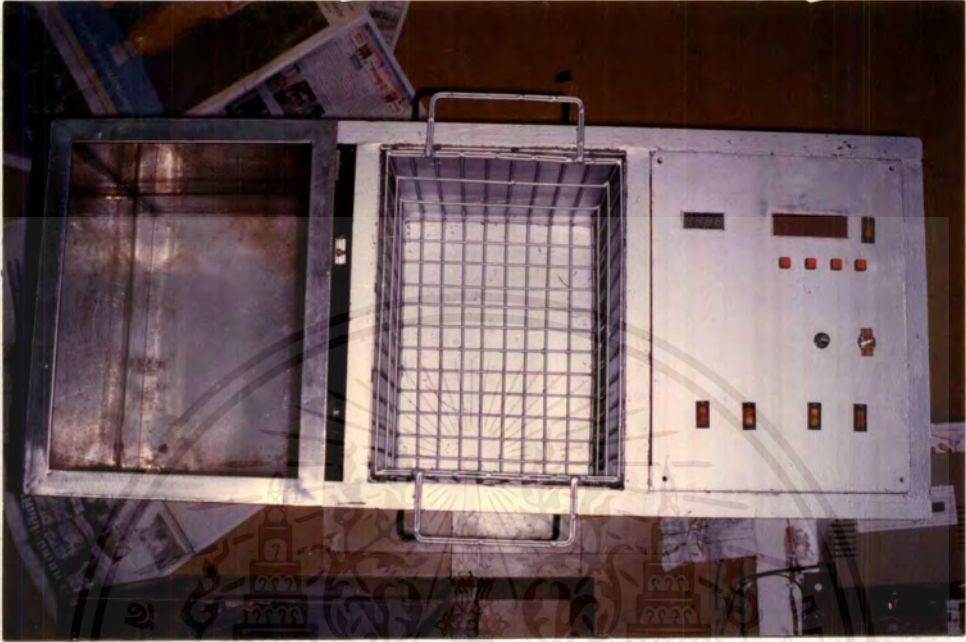
7.1.3 ส่วนของวงจรฮีเตอร์และลมร้อน

ส่วนของฮีเตอร์จะตัดไว้ที่ตัวถังเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้สูงขึ้นเพื่อช่วยในการละลายคราบสกปรกบางชนิดเช่น คราบน้ำมัน คราบไขมัน เป็นต้น ส่วนของลมร้อน จะมีพัดลมดูดอากาศ โดยดูดอากาศจากภายนอกผ่านขดลวดนิโครมทำให้อากาศที่ผ่านลวดนิโครมร้อนขึ้นเพื่อเป่าวัตถุที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคแล้วนั้นแห้งสนิท ซึ่งส่วนของวงจรนี้สามารถแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 7.3

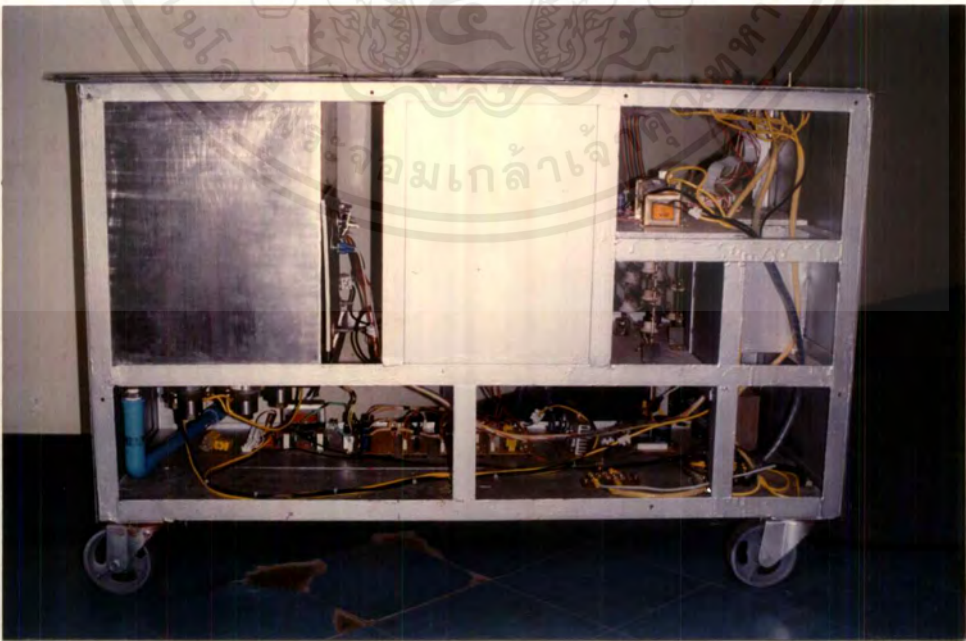


รูปที่ 7.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรฮีเตอร์และลมร้อน

ซึ่งเมื่อนำส่วนต่างๆ มาประกอบกันกับโครงสร้างจะได้เป็นโครงการที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 7.4 ลักษณะของ โครงงานที่เสร็จสมบูรณ์

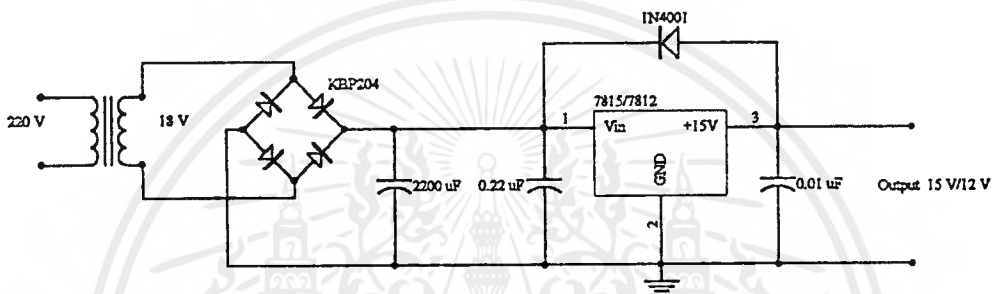


รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะ โครงสร้างภายในเครื่อง

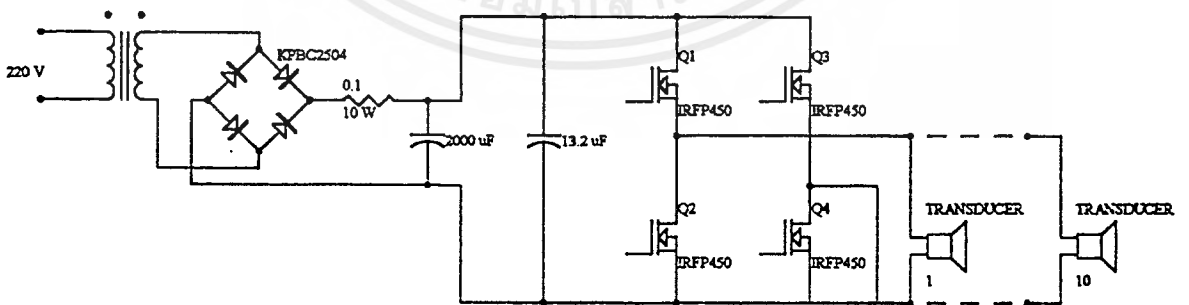
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 การทดสอบ

ในการทดสอบเป็นการวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ ของวงจรจับส่วนต่างๆ ที่นำมาใช้ในการจับชุดรีโซนิคทรานสดิวเซอร์แล้วสังเกตจุดวัดที่นำมาทำความสะอาดว่าสะอาดหรือไม่ และได้เปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ซึ่งวงจรที่ใช้ทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7.6 ถึง 7.8

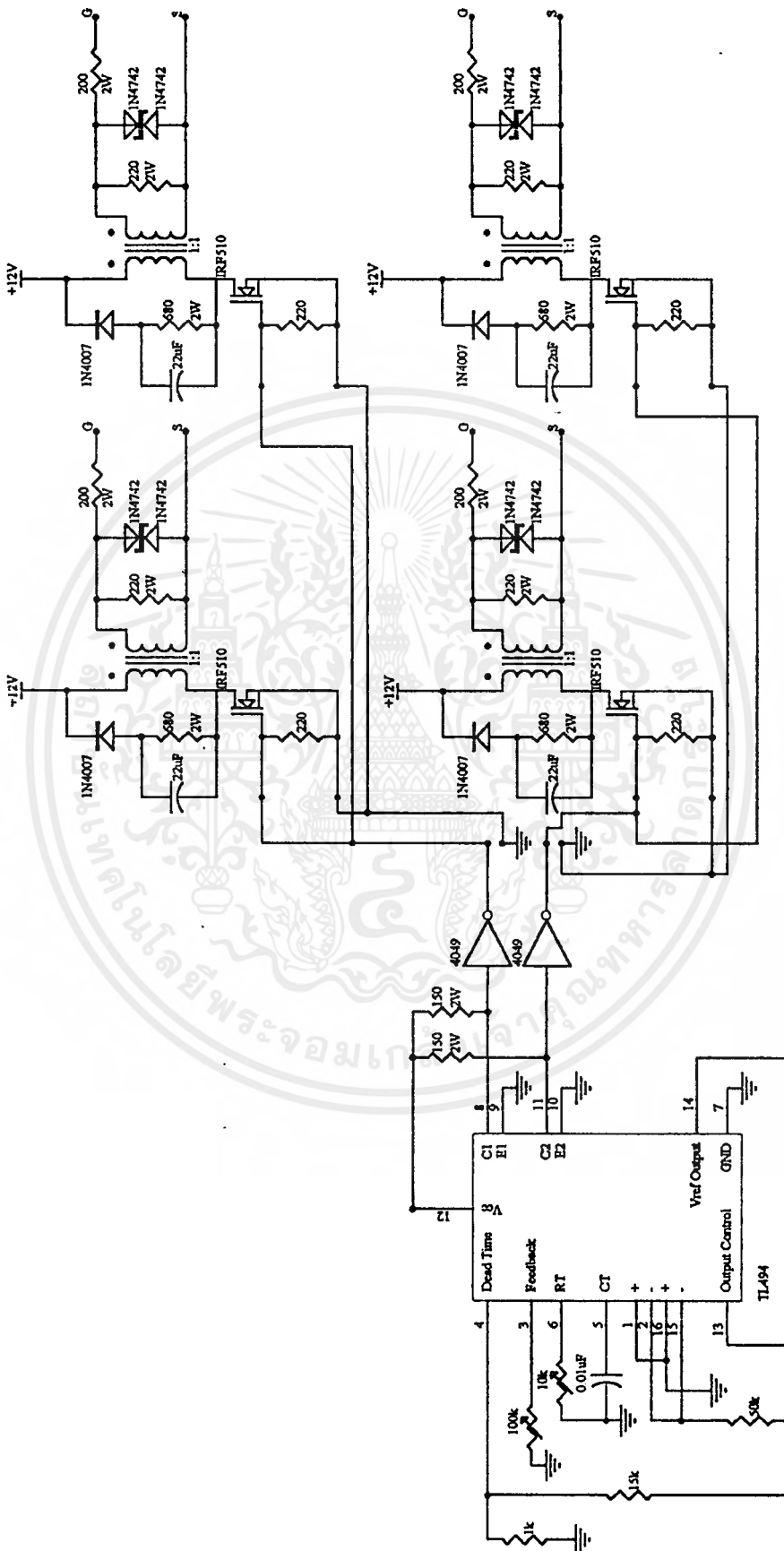


รูปที่ 7.6 วงจรโวลทเตจเรกูเลเตอร์



รูปที่ 7.7 วงจรภาคเพาเวอร์ที่ใช้ในการจับชุดรีโซนิคทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 7.8 วงจรกำเนิดความถี่และวงจรขับเคลื่อน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรหัสที่ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยังอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 ผลการทดลอง

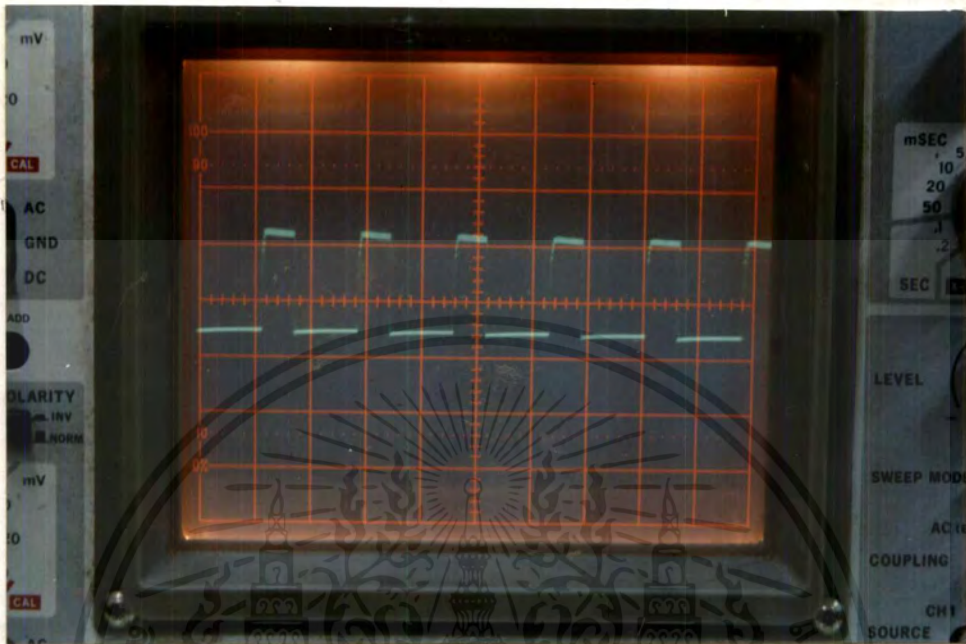


รูปที่ 7.9 สัญญาณเอาต์พุต 1 ซึ่งมีความถี่ขนาด 28 kHz จากวงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ไอซี TL 494 ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV

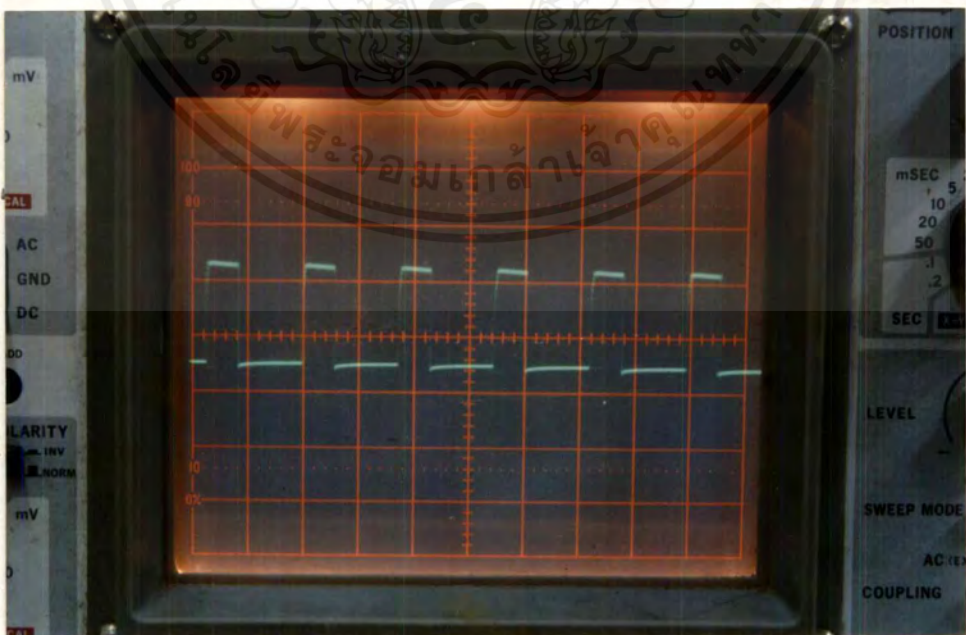


รูปที่ 7.10 สัญญาณเอาต์พุต 2 ซึ่งมีความถี่ขนาด 28 kHz จากวงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ไอซี TL 494 ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV

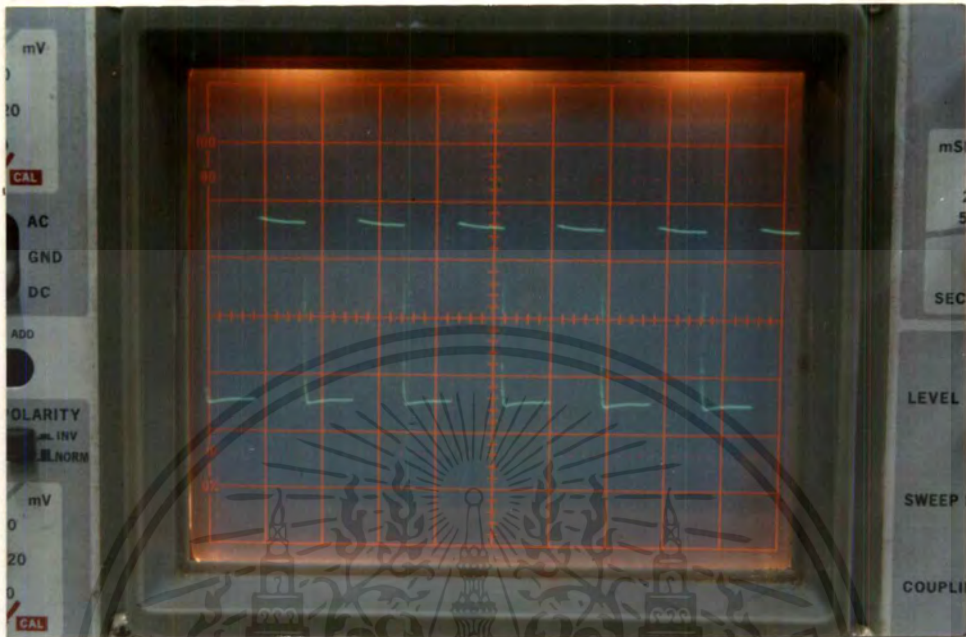
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.11 สัญญาณเอาต์พุต 1 ที่ออกจากวงจรขั้วเกท ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV



รูปที่ 7.12 สัญญาณเอาต์พุต 2 ที่ออกจากวงจรขั้วเกท ที่ 10 Volt/DIV , 20 μ Sec/DIV
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับวงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

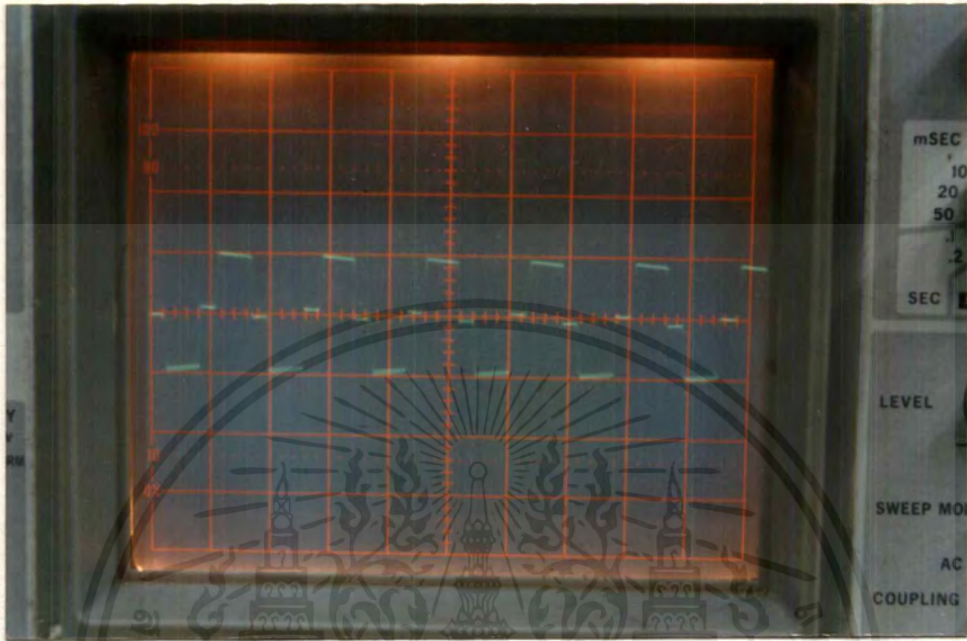


รูปที่ 7.13 สัญญาณที่ใช้ขั้วอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ขณะไม่มีโหลด ที่ 10 Volt/DIV ,
20 μ Sec/DIV , Probe x 10



รูปที่ 7.14 สัญญาณที่ใช้ขั้วอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ขณะมีภาระโหลด ที่ 10 Volt/DIV ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.15 แสดงการวัดสัญญาณเพื่อใช้หากระแสที่ใช้ขับอุตุตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ขณะมีภาระ
โหลด ที่ 2 Volt/DIV , $20 \mu\text{Sec/DIV}$, $\text{Probe} \times 10$, $R = 10 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 ตารางผลการทดลอง

7.4.1 ขณะวงจรจ่ายโหลด ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ปริมาณน้ำหรือน้ำยา

12 ลิตร

Vin (V)	Iin (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Vout _{rms} (V)	Iout _{rms} (A)	efficiency (%)
0	0	0	0	0	0	0
25	0.2	37	0.2	23.33	0.18	86.04
50	0.38	66	0.3	48.08	0.34	86.04
75	0.58	96	0.4	70.71	0.52	84.52
100	0.65	124	0.52	90.51	0.6	83.55
125	0.82	151	0.68	113.14	0.78	86.09
150	1.1	180	0.8	137.17	1	83.14
175	1.3	212	0.9	162.63	1.25	89.36
200	1.52	230	1.1	180.31	1.45	86.00
220	1.78	265	1.25	208.6	1.68	89.48

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าขณะที่วงจรจ่ายโหลด ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ปริมาณน้ำหรือน้ำยา

12 ลิตร

7.4.2 ขณระจรงจ่ยโหลด ณ ระดบแรงค่นไฟฟ้ต่งๆ ที่ปรมณน้หรือน้ย

24 ลลทร

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	V _{out_{rms}} (V)	I _{out_{rms}} (A)	efficiency (%)
0	0	0	0	0	0	0
25	0.2	37	0.2	28.8	0.14	79.2
50	0.4	68	0.28	53.74	0.3	80.6
75	0.6	96	0.32	77.78	0.48	82.96
100	0.7	125	0.5	94.75	0.6	81.21
125	0.85	160	0.65	121.62	0.68	77.83
150	1.16	183	0.75	141.42	0.94	76.40
175	1.34	215	0.85	168.29	1.15	82.53
200	1.55	232	1	185.26	1.35	80.67
220	1.85	274	1.2	212.13	1.55	80.78

ตารงที่ 7.2 แสดงค้ขณะที่วจรงจ่ยโหลด ณ ระดบแรงค่นไฟฟ้ต่งๆ ที่ปรมณน้หรือน้ย

24 ลลทร

จกการทลลองพบว้ วล้การหาค้เอท้พุดขงครล้่งท้คควมสะอาดค้ด้วยคลล้น
 อุลคร้โชนค่นน้ จะอศยลล้การท้ว้อุลคร้โชนคทรานสลวเซอร์จะเปลล้นพล้งงานไฟฟ้เป็น
 พล้งงานกลเพราะจะน้จะค้
 พล้งงานไฟฟ้ที่ป้อนให้ก้บอุลคร้โชนคทรานสลวเซอร์

$$P = V \cdot I \cdot \cos\theta \quad (7-1)$$

เอกสารน้เป็นเอกสารท้สงวนไว้ส้หรับการใช้งานเพล้การศล้ษาเท่าน้ัน ไม่อนุญาตให้น้ไปใช้ประโยชน้ด้านการค้
 ไม่ว้กรณีค้ๆ ท้งลล้น อล้ท้งห้ามม้ให้ด้ดเปล้งน้เอหาและตล้องอ้องล้งเจ้าขงเอกสารท้ค้ร้้งท้ม้การน้ไปใช้

โดยที่ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์
 I คือ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์
 θ คือ มุมระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์

พลังงานกลที่อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ส่งออกมา

$$P = F \cdot v \quad (7-2)$$

โดยที่ F คือ แรงที่อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ส่งออกมา
 v คือ ความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิคที่อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ส่งออกมา

เพราะฉะนั้นจะได้

$$v \cdot I \cdot \cos \theta = F \cdot v \quad (7-3)$$

ซึ่งจากสมการที่ 7-3 จะใช้หาค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคได้เพราะค่า v คือความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิคซึ่งสามารถดูได้จากสเปคที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวกด้านหลังซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4 เมตร/วินาที และค่า F คือ ค่าแรงที่คลื่นอุลตราโซนิคกระทำต่อน้ำหรือน้ำยาและกระทบกับวัตถุที่จะทำการทำความสะอาด ซึ่งค่า F นี้ เราไม่สามารถวัดค่าได้ เพราะเราไม่มีอุปกรณ์ในการวัดโดยตรง จึงต้องอาศัยหลักการการวัดค่าเหมือนกับการวัดค่าของลำโพง ใช้ในการหาประสิทธิภาพของเครื่อง โดยจะคำนวณจากวงจร amplifier ที่ใช้ในการขับลำโพง ซึ่งในที่นี้ก็คือการหาประสิทธิภาพของวงจรพลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์แทน

โดยจะได้ว่า

$$\% \text{ ประสิทธิภาพ} = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad (7-4)$$

ซึ่งเราทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วจึงทำการคำนวณหาประสิทธิภาพ

ภาพ ดังแสดงในตารางที่ 7.1 ,7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าขณะที่วงจรจ่ายโหลด ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ปริมาณน้ำหรือน้ำยา 12 ลิตร ส่วนในตารางที่ 7.2 แสดงค่าขณะที่วงจรจ่ายโหลด ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ปริมาณน้ำหรือน้ำยา 24 ลิตร

จากตารางผลการทดลองทั้งสองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเราใส่โหลดมากขึ้น แต่กระแสมากขึ้นคือการเพิ่มปริมาณน้ำหรือน้ำหนักของวัตถุที่จะนำมาทำความสะอาด วงจรจะกินกระแสมากขึ้น แต่กระแสเอาต์พุตจะน้อยลงแต่แรงดันเอาต์พุตจะสูงขึ้น แสดงว่าอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์จะทำงานขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่คกคร่อมตัวมัน ว่ายังมีโหลดมาก แรงดันคกคร่อมก็ยิ่งมากตาม เพื่อนำไปสร้างคลื่นอุลตราโซนิค ส่วนด้านประสิทธิภาพ สรุปได้ว่าเมื่อมีโหลดมากขึ้นประสิทธิภาพจะลดลง และหลังจากทำการล้างวัตถุด้วยคลื่นอุลตราโซนิคแล้วพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบวัตถุก่อนล้างกับหลังล้างด้วยคลื่นอุลตราโซนิค วัตถุหลังล้างจะสะอาดกว่าวัตถุก่อนล้าง



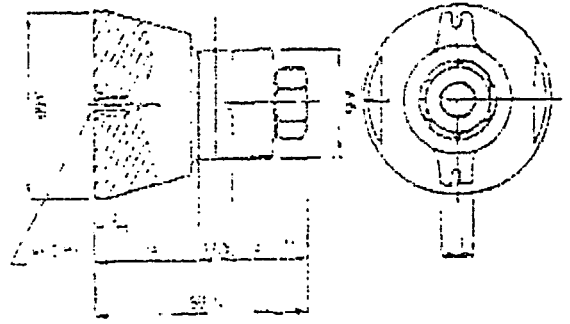
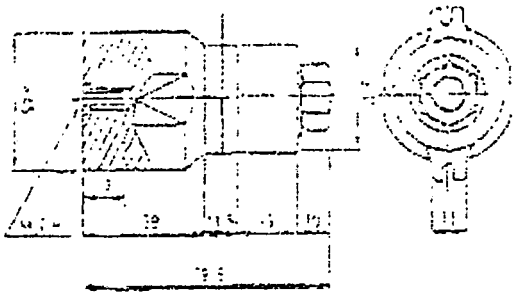
บทที่ 8

สรุปและวิจารณ์

โดยหลักการการทำงานของเครื่องทำความสะอาดอุลตราโซนิค จะทำงานก็ต่อเมื่อ ป้อนสัญญาณรูปขายน้, สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมหรือสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของตัวอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์เข้าที่ตัวทรานสดิวเซอร์ ก็จะทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิคขึ้นและคลื่นนี้จะถูกส่งผ่านตัวถังสู่น้ำหรือน้ำยาที่ใช้ในการทำความสะอาด คลื่นอุลตราโซนิคที่ได้จะมีความถี่คงที่และเป็นตัวทำให้เกิดระลอกคลื่นขึ้นไปกระทบผิวของวัตถุที่จะทำความสะอาดด้วยแรงที่คงที่ ทำให้อนุภาคสิ่งสกปรกที่มีขนาดเล็กๆที่เกาะที่ผิววัตถุหลุดออกไปทำให้วัตถุนั้นสะอาดได้ ส่วนในขณะทำการทำความสะอาดอยู่นั้นจะเกิดเสียงดังขึ้นเนื่องจากตัวถังเกิดการสั่นสะเทือนด้วย ส่วนของวงจรฮีทเตอร์มีไว้เพื่อทำให้น้ำหรือน้ำยามีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาด เช่น คราบน้ำมัน คราบไขมัน เป็นต้น ซึ่งไขมันจะแตกตัวเมื่อน้ำหรือน้ำยามีอุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นยังมีลมร้อนเพื่อเป่าให้วัตถุที่ผ่านขบวนการทำความสะอาดแล้วแห้งเร็วขึ้น ในการทำโครงนี้ไม่สามารถวัดสัญญาณเอาท์พุทโดยตรงที่ตัวอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากสเปคของตัวอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ไม่ได้บอกประสิทธิภาพของตัวอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์และไม่มีเครื่องวัดแรงของพลังงานกลที่ถูกส่งออกมา เพราะฉะนั้นจึงสามารถวัดได้แต่สัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้าตัวอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์นั่นเอง ซึ่งจะนำมาใช้ในการหาประสิทธิภาพ แนวทางในการพัฒนาต่อไปคือ สร้างเครื่องให้สามารถปรับความแรงของการส่งคลื่นอุลตราโซนิคเพื่อใช้ในการทำความสะอาดได้หลายระดับตามวัตถุที่จะนำมาทำความสะอาด โดยใช้ข้อดีที่ทรานฟอร์มเมอร์ในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเรกติไฟร์เออร์และผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อป้อนให้อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ต่อไป และควรต้องติดตั้งสายดินเพื่อความปลอดภัยด้วย

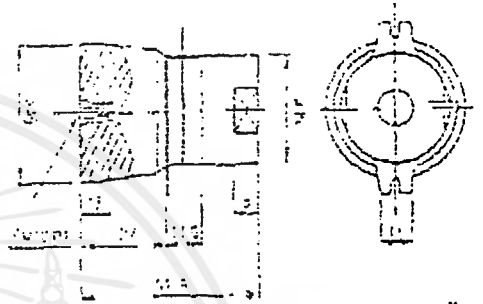
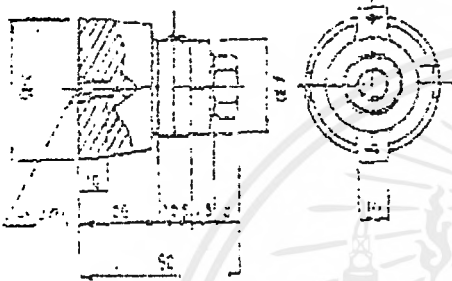


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



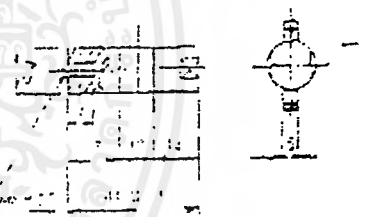
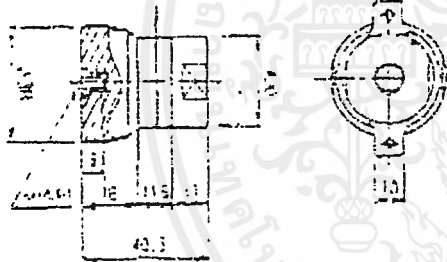
N.S.L. 4373-A

N.S.L. 4374-A

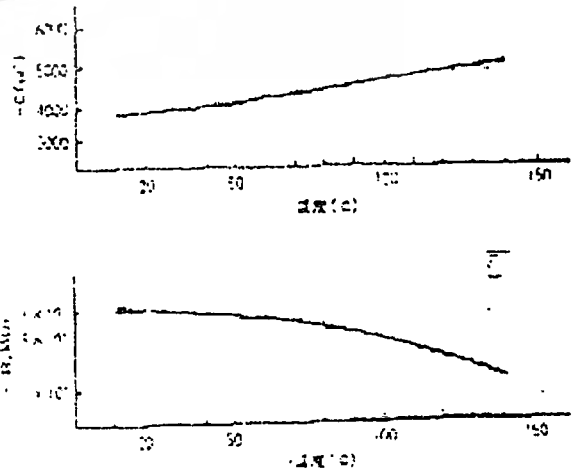
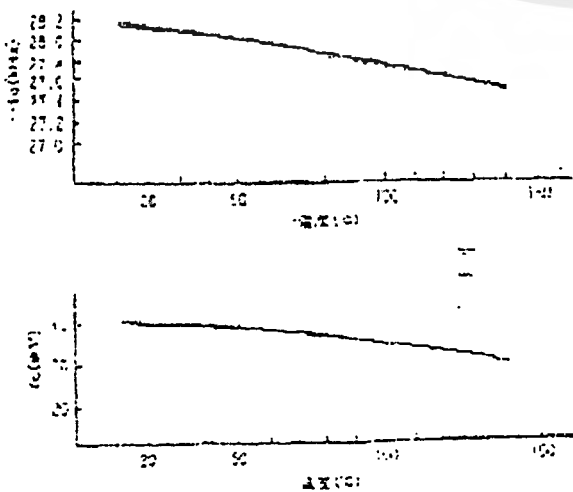


N.S.L. 4375-A

N.S.L. 4376-A



กราฟแสดง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MOTOROLA

**SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS**

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for Switchmode power supply control. This device features:

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator With Master Or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5 Volt Reference
- Adjustable Dead-Time Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source Or Sink
- Output Control For Push-Pull Or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout

**SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS**

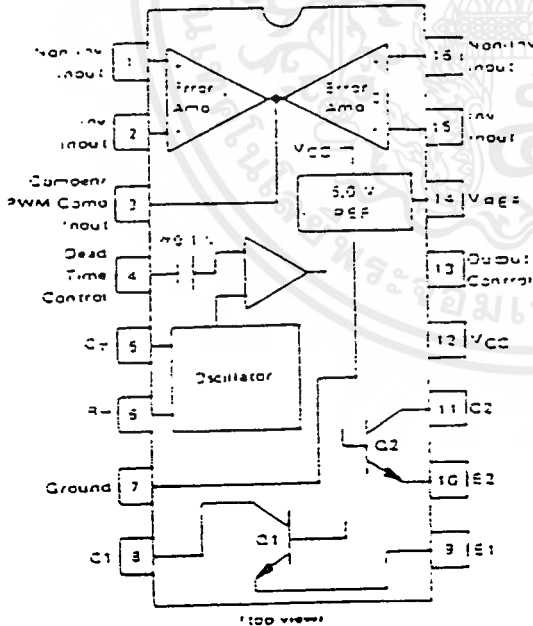
**SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUITS**



**J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 820-10**



**N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 548-05**



The TL494C is specified over the commercial operating range of 0°C to 70°C. The TL494I is specified over the industrial range of -25°C to 85°C. The TL494M is specified over the full military range of -55°C to 125°C.

ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
TL494CN	0°C to 70°C	Plastic DIP
TL494CI	0°C to 70°C	Ceramic DIP
TL494IN	-25°C to 85°C	Plastic DIP
TL494I	-25°C to 85°C	Ceramic DIP
TL494MJ	-55°C to 125°C	Ceramic DIP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

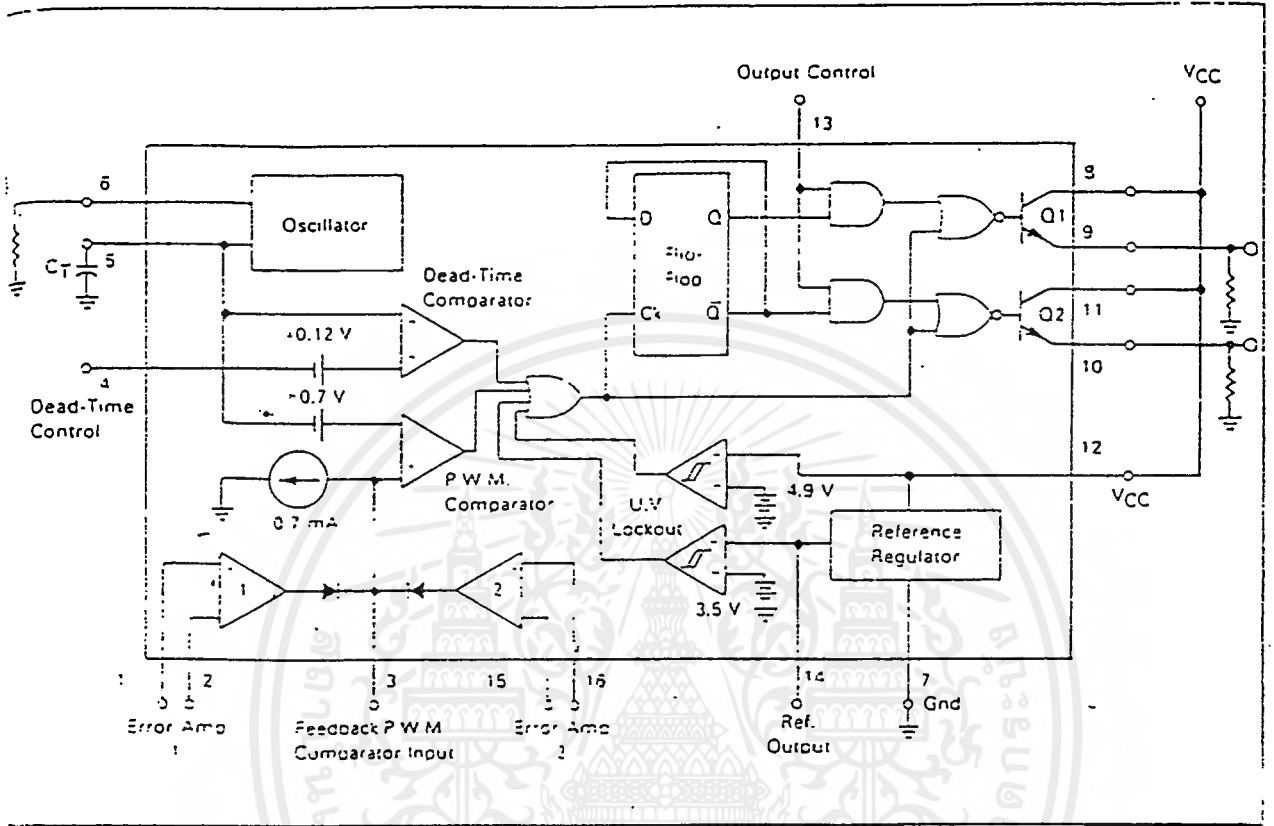
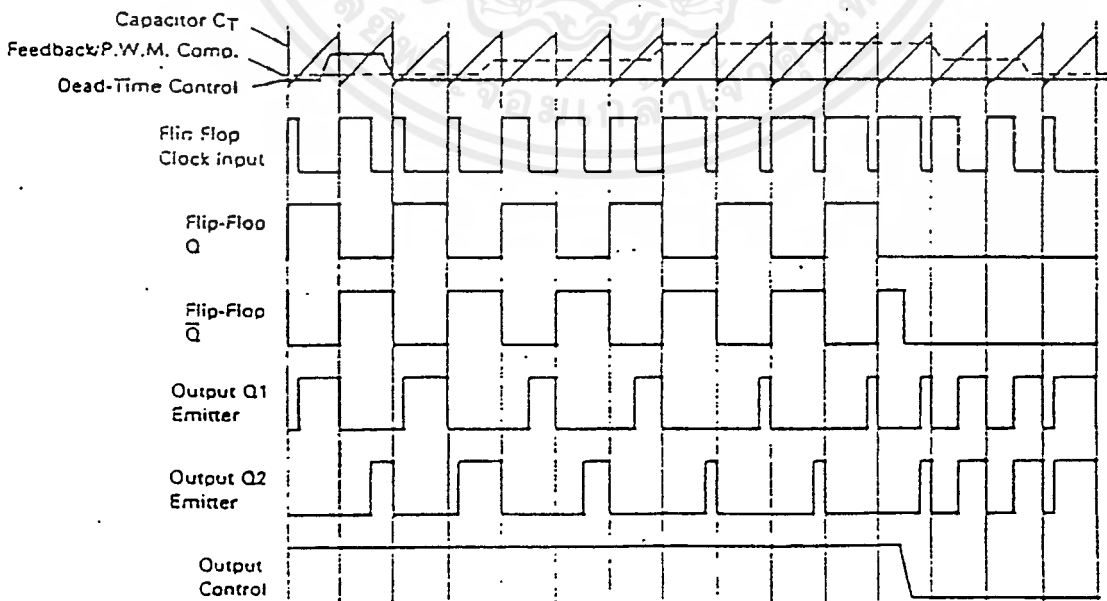


FIGURE 2 — TIMING DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 4.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the timing diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the dead-time control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The dead-time control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output dead time to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional dead time may be imposed on the output by setting the dead-time-control input to a fixed voltage, ranging between 0 to 3.3 V.

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the dead time control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 to 3.5 V. Both error amplifiers have a common-mode input range from -0.3 V to $(V_{CC} - 2 V)$, and may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the non-inverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the dead-time comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of $\pm 1.5\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0 to 70°C.

FIGURE 3 — FUNCTIONAL TABLE

Input	Output Function	$\frac{f_{out}}{f_{osc}} =$
Output Control		
Grounded	Single-ended P.W.M. at Q1 and Q2	1
At V_{ref}	Push-pull operation	0.5

494

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies unless otherwise noted)

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	TL494M	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	42	42	42	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	42	42	42	V
Collector Output Current (each transistor) (1)	I_{C1}, I_{C2}	500	500	500	mA
Amplifier Input Voltage Range	V_{IR}	-0.3 to 42	-0.3 to 42	-0.3 to 42	V
Power Dissipation (in $T_A \leq 45^\circ\text{C}$)	P_D	1000	1000	1000	mW
Operating Junction Temperature	T_J				$^\circ\text{C}$
Plastic Package		125	125	—	$^\circ\text{C}$
Ceramic Package		150	150	150	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to 70	-25 to 85	-55 to 125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}				$^\circ\text{C}$
Plastic Package		-55 to 125	-55 to 125	—	$^\circ\text{C}$
Ceramic Package		-65 to 150	-55 to 150	-65 to 150	$^\circ\text{C}$

1: Maximum thermal limits must be observed.

TYPICAL CHARACTERISTICS

Characteristics	Symbol	N Suffix Plastic Package	J Suffix Ceramic Package	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	80	100	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating Ambient Temperature	T_A	45	50	$^\circ\text{C}$

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Condition/Value	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
Power Supply Voltage	V_{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	—	30	40	V
Collector Output Current (each transistor)	I_{C1}, I_{C2}	—	—	200	mA
Amplifier Input Voltage	V_{in}	-0.3	—	$V_{CC} - 2.0$	V
Current Into Feedback Terminal	I_{fb}	—	—	0.3	mA
Reference Output Current	I_{ref}	—	—	10	mA
Timing Resistor	R_T	1.8	30	500	$k\Omega$
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μF
Oscillator Frequency	f_{osc}	1.0	40	200	kHz

STRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$ unless otherwise noted.)

Typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise

Characteristic	Symbol	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Reference Voltage ($I_{IO} = 1.0\text{ mA}$)	V_{ref}	4.75	5.0	5.25	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ($V_{CC} = 7.0\text{ V to }40\text{ V}$)	Reg_{line}	—	2.0	25	—	2.0	25	mV
Load Regulation ($I_{IO} = 1.0\text{ mA to }10\text{ mA}$)	Reg_{load}	—	3.0	15	—	3.0	15	mV
Short-Circuit Output Current ($V_{ref} = 0\text{ V}$)	ISC	15	35	75	15	35	75	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ unless otherwise noted.)Typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
OUTPUT SECTION								
Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_{CE} = 40\text{ V}$)	$I_{C(OH)}$	—	2.0	100	—	2.0	100	μA
Emitter Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_C = 40\text{ V}$, $V_E = 0\text{ V}$)	$I_{E(OH)}$	—	—	-100	—	—	-150	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage (2) Common-Emitter ($V_E = 0\text{ V}$, $I_C = 200\text{ mA}$)	$V_{SAT(C)}$	—	1.1	1.3	—	1.1	1.5	V
Emitter-Follower ($V_C = 15\text{ V}$, $I_E = -200\text{ mA}$)	$V_{SAT(E)}$	—	1.5	2.5	—	1.5	2.5	V
Output Control Pin Current Low State ($V_{OC} \leq 0.4\text{ V}$)	I_{OCL}	—	10	—	—	10	—	μA
High State ($V_{OC} = V_{ref}$)	I_{OCH}	—	0.2	3.5	—	0.2	3.5	mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 13)	t_r	—	100	200	—	100	200	ns
Emitter-Follower (See Figure 14)		—	100	200	—	100	200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 13)	t_f	—	25	100	—	25	100	ns
Emitter-Follower (See Figure 14)		—	40	100	—	40	100	ns

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
ERROR AMPLIFIER SECTIONS					
Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	—	2.0	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	—	5.0	250	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	—	-0.1	-1.0	μA
Input Common-Mode Voltage Range ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICR}	-0.3 to $V_{CC} - 2.0$	—	—	V
Open-Loop Voltage Gain ($\Delta V_O = 3.0\text{ V}$, $V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	f_C	—	350	—	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	ϕ_m	—	65	—	deg.
Common-Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	CMRR	65	90	—	dB
Power Supply Rejection Ratio ($\Delta V_{CC} = 33\text{ V}$, $V_O = 2.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	PSRR	—	100	—	dB
Output Sink Current (V_O (Pin 3) = 0.7 V)	I_{O-}	0.3	0.7	—	mA
Output Source Current (V_O (Pin 3) = 3.5 V)	I_{O+}	-2.0	-4.0	—	mA

NOTE 2: Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperatures as possible.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 4 — OSCILLATOR FREQUENCY versus TIMING RESISTANCE

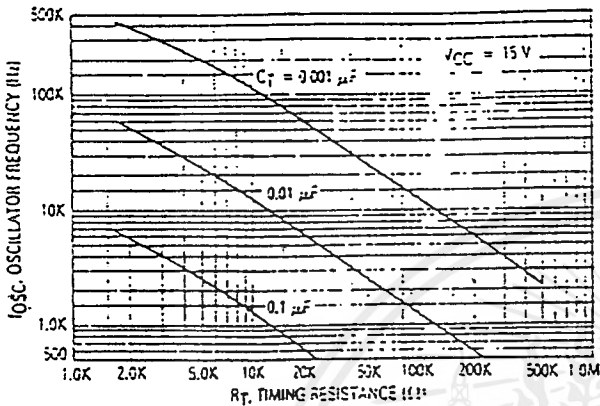


FIGURE 5 — OPEN-LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE versus FREQUENCY

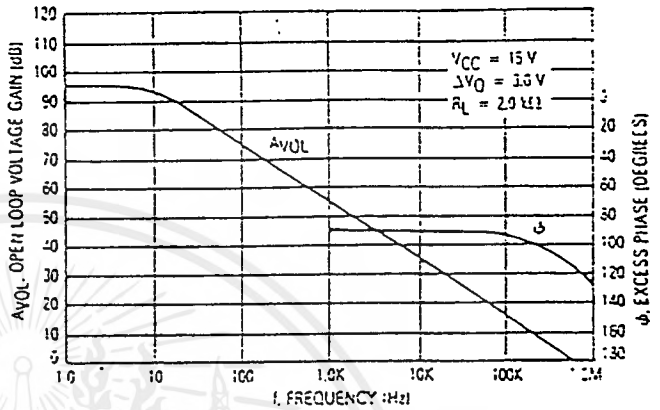


FIGURE 6 — PERCENT DEAD-TIME versus OSCILLATOR FREQUENCY

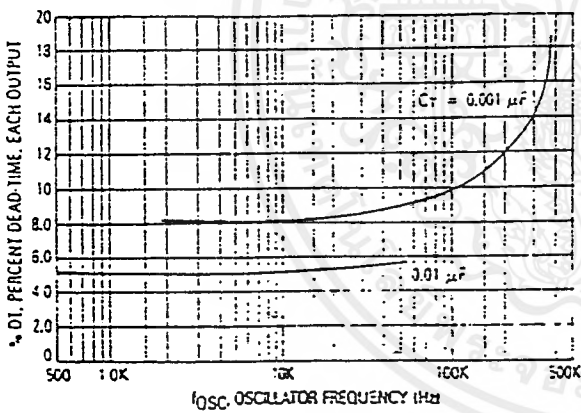


FIGURE 7 — PERCENT DUTY CYCLE versus DEAD-TIME CONTROL VOLTAGE

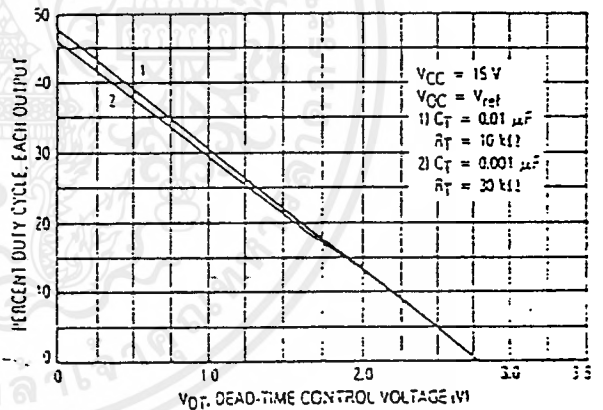


FIGURE 8 — EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus EMITTER CURRENT

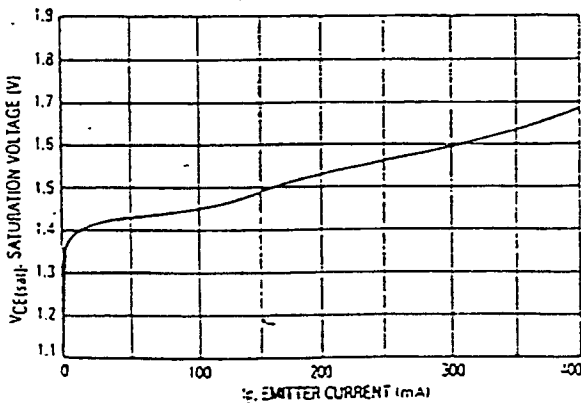
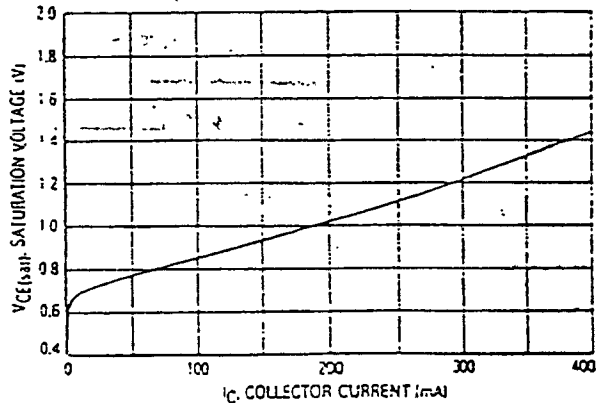


FIGURE 9 — COMMON EMITTER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus COLLECTOR CURRENT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ unless otherwise noted.)Typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
WDM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Output Threshold Voltage (Zero duty cycle)	V_{TH}	—	3.5	4.5	V
Output Sink Current ($V(\text{Pin } 3) = 0.7\ \text{V}$)	I_{L-}	0.3	0.7	—	mA
LOAD-TIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Output Bias Current (Pin 4) ($V(\text{Pin } 4) = 0$ to $5.25\ \text{V}$)	$I_{B}(OT)$	—	-2.0	-10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V(\text{Pin } 4) = 0\ \text{V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$) ($V(\text{Pin } 4) = 0\ \text{V}$, $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	DC_{max}	45 —	48 45	50 50	%
Output Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{TH}	— 0	2.8 —	3.3 —	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	f_{osc}	—	40	—	kHz
Standard Deviation of Frequency* ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	σ_{osc}	—	3.0	—	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 7.0\ \text{V}$ to $40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	$\Delta f_{osc}(\Delta V)$	—	0.1	—	%
Frequency Change with Temperature ($\Delta T_A = T_{low}$ to T_{high}) ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$)	$\Delta f_{osc}(\Delta T)$	—	—	12	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn-On Threshold (V_{CC} Increasing, $I_{ref} = 1.0\ \text{mA}$)	V_{on}	5.5	6.43	7.0	V
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 6 at V_{ref} , All Other Inputs and Outputs Open) ($V_{CC} = 15\ \text{V}$) ($V_{CC} = 40\ \text{V}$)	I_{CC}	— —	5.5 7.0	10 15	mA
Average Supply Current ($V(\text{Pin } 4) = 2.0\ \text{V}$) (See Figure 12) ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$, $V_{CC} = 15\ \text{V}$)	—	—	7.0	—	mA

Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, $\sigma =$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 10 — STANDBY SUPPLY CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE

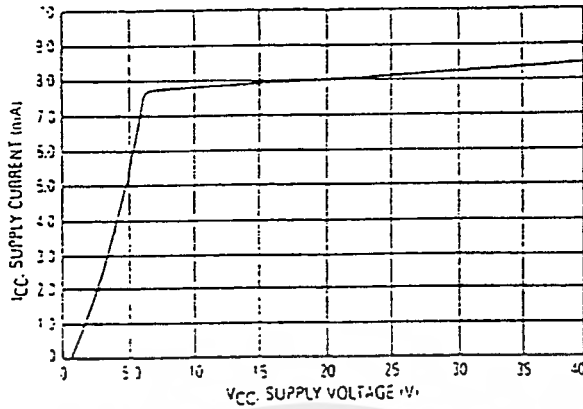


FIGURE 11 — ERROR AMPLIFIER CHARACTERISTICS

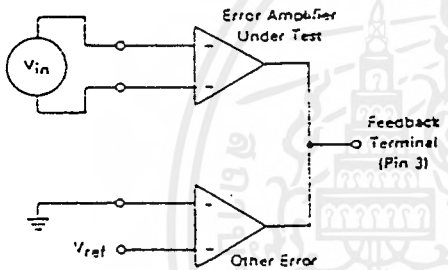


FIGURE 12 — DEAD-TIME AND FEEDBACK CONTROL TEST CIRCUIT

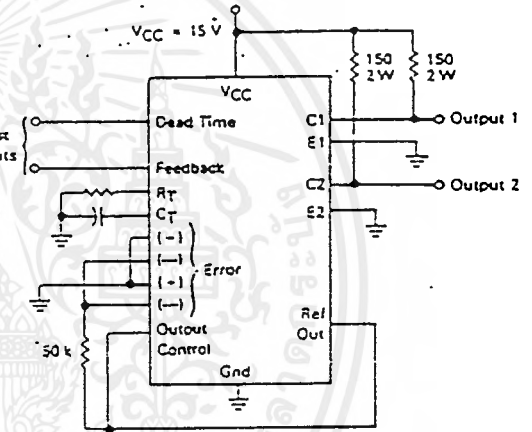


FIGURE 13 — COMMON-EMITTER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM

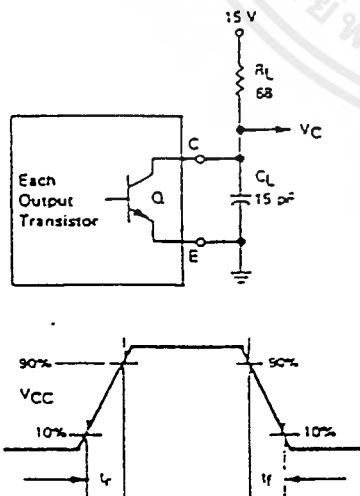
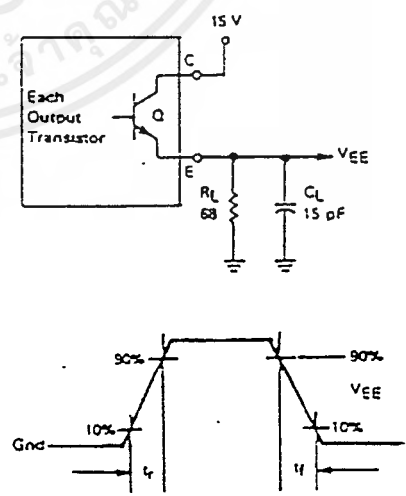


FIGURE 14 — EMITTER-FOLLOWER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 19 — SLAVING TWO OR MORE CONTROL CIRCUITS

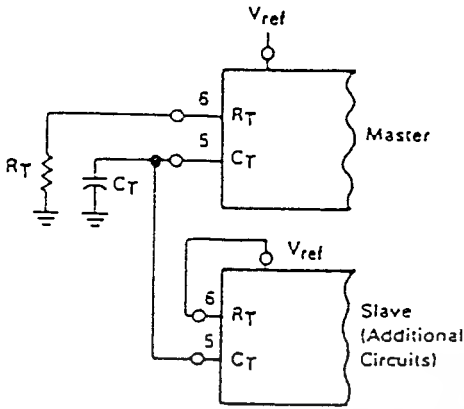


FIGURE 20 — OPERATION WITH $V_{in} > 40$ V USING EXTERNAL ZENER

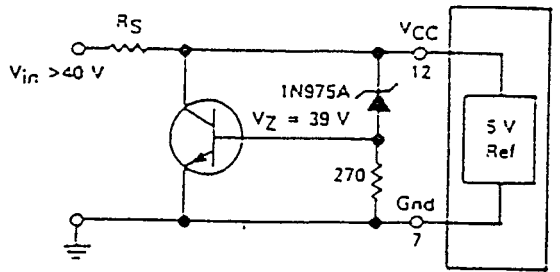
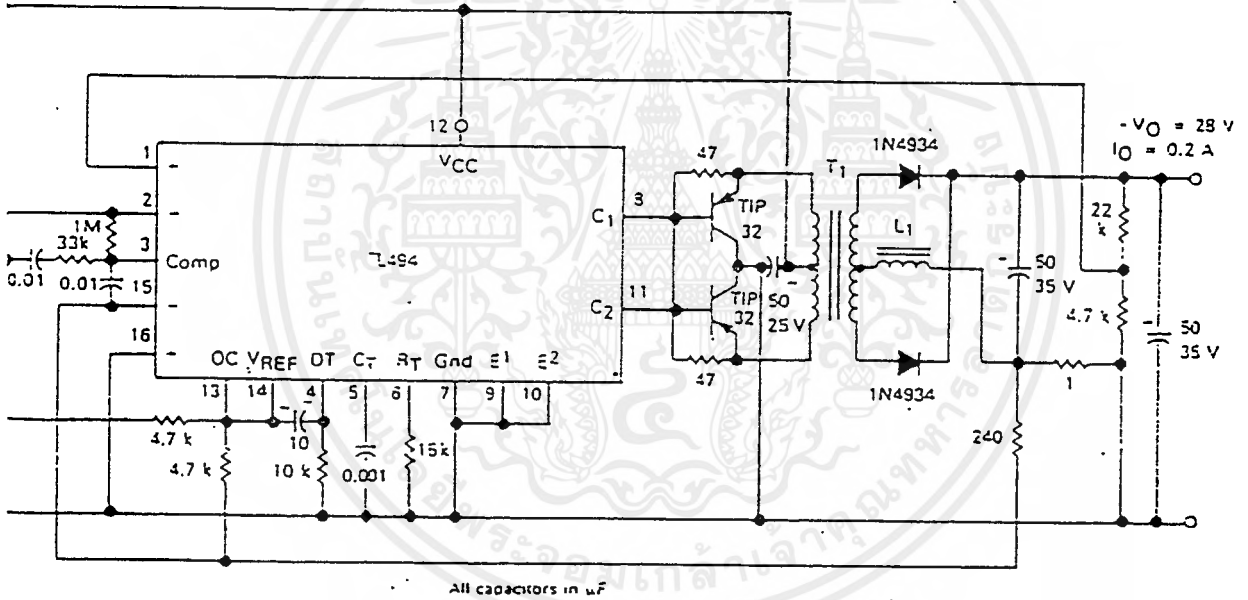


FIGURE 21 — PULSE-WIDTH MODULATED PUSH-PULL CONVERTER

$V_{in} = 8.0$ to 20 V

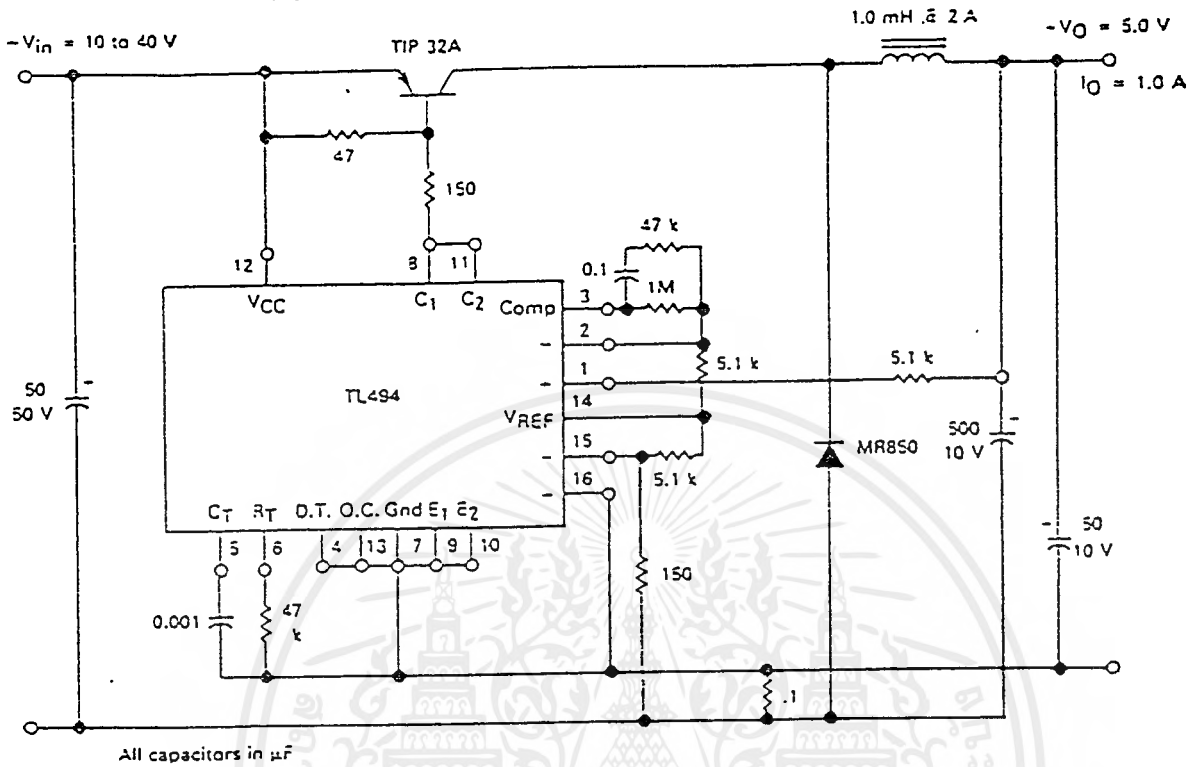


- L1 — 3.5 mH @ 0.3 A
- T1 — Primary: 20T C.T. #28 AWG
Secondary: 120T C.T. #36 AWG
Core: Ferroxcube 1408P-L00-3C3

TEST	CONDITIONS	RESULTS
Line Regulation	$V_{in} = 10$ V to 40 V	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28$ V, $I_O = 1$ mA to 1 A	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28$ V, $I_O = 1.0$ A	55 mV P-P P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28$ V, $R_L = 0.1 \Omega$	1.5 amos
Efficiency	$V_{in} = 28$ V, $I_O = 1$ A	71%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 22 — PULSE-WIDTH MODULATED STEP-DOWN CONVERTER



TEST	CONDITIONS	RESULTS
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_o = 0.2 \text{ to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_o = 200 \text{ mA}$	40 mV p-p P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, R_L = 0.1 \Omega$	250 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_o = 200 \text{ mA}$	72%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCL4040AB



CMOS
12-STAGE BINARY COUNTER

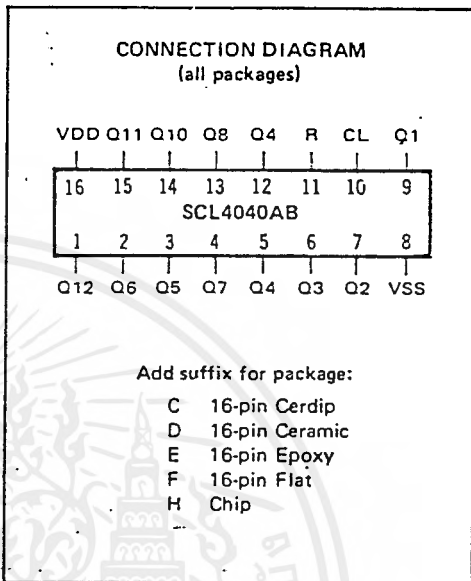
FEATURES

- ◆ 12 Fully Static Stages
- ◆ All 12 Buffered Outputs Available
- ◆ Common Reset Line
- ◆ 8MHz Counting Rate @ 10Vdc
- ◆ All Inputs Buffered

DESCRIPTION

The SCL4040AB consists of 12-ripple-carry binary counter stages with appropriate input buffers and reset circuitry. The counter is reset to its "all 0's" state by a high level on the Reset input. The counter is advanced one count on the negative-going transition of each input pulse. Isolation from external noise and the effects of loads is provided by output buffering.

Applications include time delay circuits, counter controls, and frequency dividers.



TRUTH TABLE

Clock	Reset	Output State
	0	No Change
	0	Advance to next state
x	1	All Outputs are low

X = Don't Care

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

For maximum reliability:

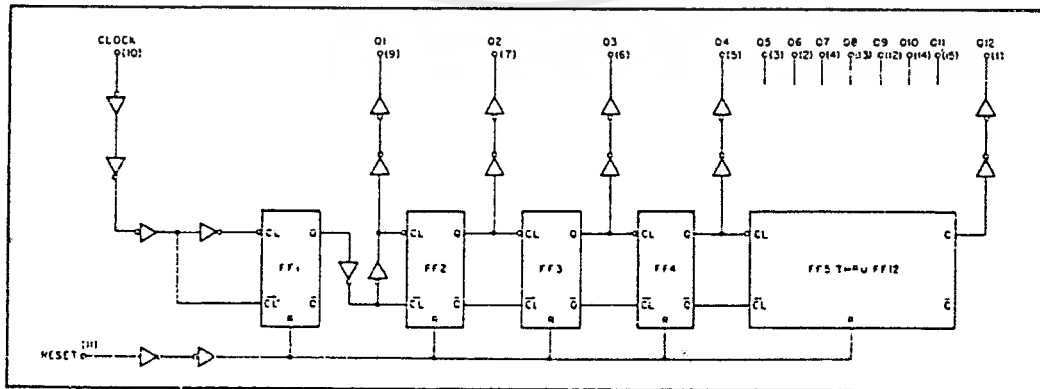
DC Supply Voltage $V_{DD} - V_{SS}$. 3 to 15 Vdc

Operating Temperature T_A

C, D, F, H Device -55 to +125 °C

E Device -40 to +85 °C

LOGIC DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

STATIC CHARACTERISTICS¹

PARAMETER	V _{DD} (Vdc)	CONDITIONS	T _{LOW} ²		+25°C			T _{HIGH} ²		Units		
			Min.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Max.			
QUIESCENT DEVICE CURRENT	I _{DD}	V _{IN} =V _{SS} or V _{DD} All valid input combinations	5	5	—	0.05	5	—	150	μAdc		
			10	10	—	0.1	10	—	300			
			15	15	—	0.2	20	—	600			
OUTPUT HIGH (SOURCE) CURRENT C, D, F, H device	I _{OH}	V _{OH} =4.6V V _{OH} =9.5V V _{OH} =13.5V V _{IN} =V _{SS} or V _{DD}	5	—	-0.15	-0.12	-0.5	—	-0.08	—	mAdc	
			10	—	-0.37	-0.3	-1.15	—	-0.21	—		
			15	—	-1.25	-1.0	-4.5	—	-0.69	—		
			5	—	-0.14	-0.12	-0.5	—	-0.10	—		mAdc
			10	—	-0.35	-0.3	-1.15	—	-0.25	—		
			15	—	-1.2	-1.0	-4.5	—	-0.85	—		
OUTPUT LOW (SINK) CURRENT C, D, F, H device	I _{OL}	V _{OL} =0.4V V _{OL} =0.5V V _{OL} =1.5V V _{IN} =V _{SS} or V _{DD}	5	—	0.15	0.12	0.5	—	0.08	—	mAdc	
			10	—	0.37	0.3	1.0	—	0.21	—		
			15	—	1.25	1.0	5.8	—	0.69	—		
			5	—	0.14	0.12	0.5	—	0.10	—		mAdc
			10	—	0.35	0.3	1.0	—	0.25	—		
			15	—	1.2	1.0	5.8	—	0.85	—		

NOTES: ¹ Remaining Static Electrical Characteristics are listed under "SCL4000B Series Family Specifications".

² T_{LOW} = -55°C for C, D, F, H device.

= -40°C for E device.

T_{HIGH} = +125°C for C, D, F, H device.

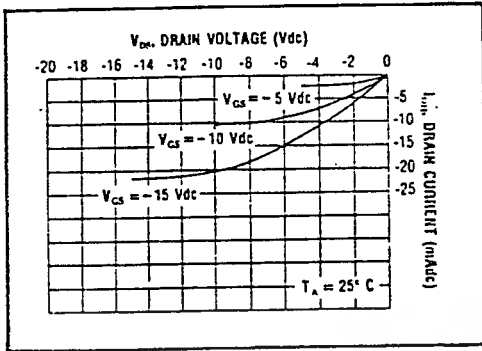
= + 85°C for E device.

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

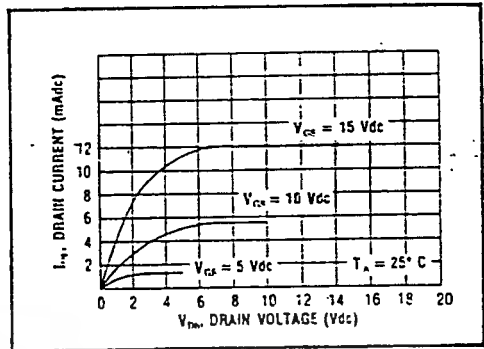
PARAMETER	V _{DD} (Vdc)	Min.	Typ.	Max.	Units
CLOCKED OPERATION					
PROPAGATION DELAY TIME Clock to Q1	I _{PLH} , I _{PHL}	5	—	200	ns
		10	—	100	
		15	—	80	
Q _i to Q _{i+1}	I _{PLH} , I _{PHL}	5	—	150	ns
		10	—	75	
		15	—	60	
OUTPUT TRANSITION TIME	I _{TLH} , I _{TML}	5	—	180	ns
		10	—	90	
		15	—	65	
MINIMUM CLOCK PULSE WIDTH	PW _{CL}	5	—	100	ns
		10	—	50	
		15	—	40	
MAXIMUM CLOCK FREQUENCY	f _{CL}	5	2.0	4.0	MHz
		10	4.0	8.0	
		15	5.0	10.0	
MAXIMUM CLOCK RISE AND FALL TIME	t _{rCL} , t _{fCL}	5	15	—	μs
		10	15	—	
		15	5	—	
RESET OPERATION					
PROPAGATION DELAY TIME	I _{PHL}	5	—	300	ns
		10	—	150	
		15	—	120	
MINIMUM RESET PULSE WIDTH	PW _R	5	—	150	ns
		10	—	75	
		15	—	60	
RESET REMOVAL TIME	t _{rem}	5	—	250	ns
		10	—	125	
		15	—	100	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCL4040AB.

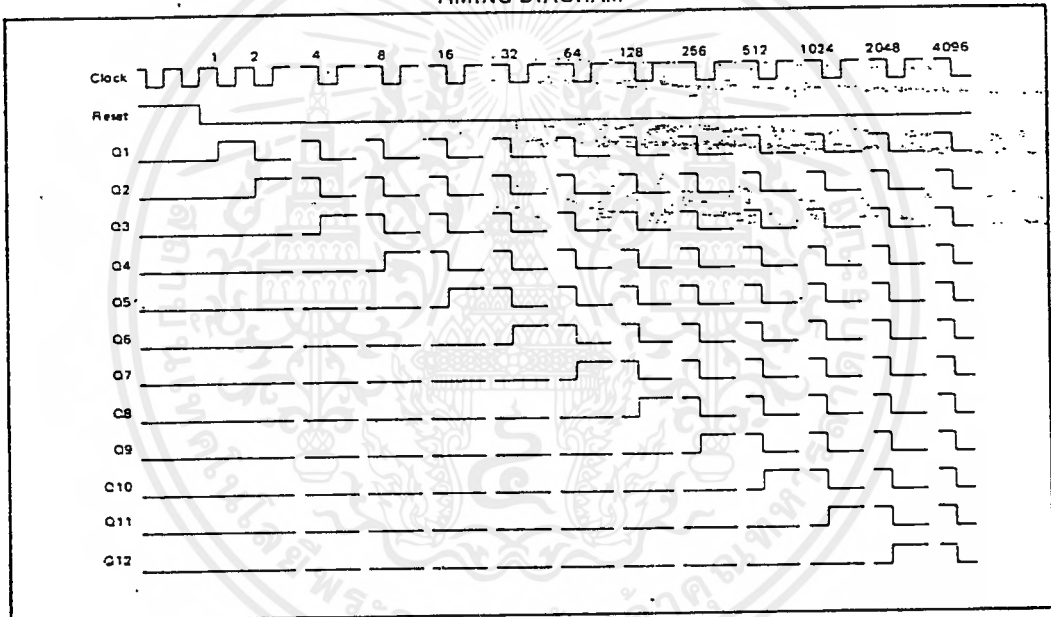


Typical P-Channel Source Current Characteristics

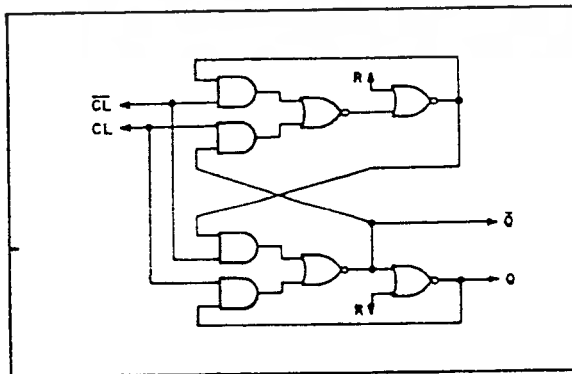


Typical N-Channel Sink Current Characteristics

TIMING DIAGRAM



TYPICAL COUNTER STAGE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

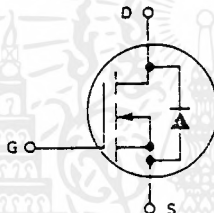
MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA

IRF510
IRF511
IRF512
IRF513

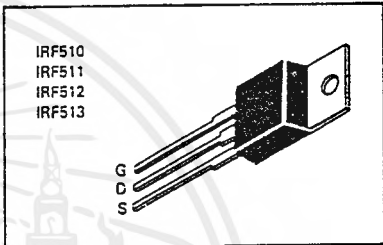
**N-CHANNEL ENHANCEMENT-MODE SILICON GATE
TMOS POWER FIELD EFFECT TRANSISTOR**

These TMOS Power FETs are designed for low voltage, high speed power switching applications such as switching regulators, converters, solenoid and relay drivers.

- Silicon Gate for Fast Switching Speeds
- Rugged — SOA is Power Dissipation Limited
- Source-to-Drain Diode Characterized for Use With Inductive Loads



Part Number	V _{DS}	r _{DS(on)}	I _D
IRF510	100 V	0.6 Ω	4.0 A
IRF511	60 V	0.6 Ω	4.0 A
IRF512	100 V	0.8 Ω	3.5 A
IRF513	60 V	0.8 Ω	3.5 A



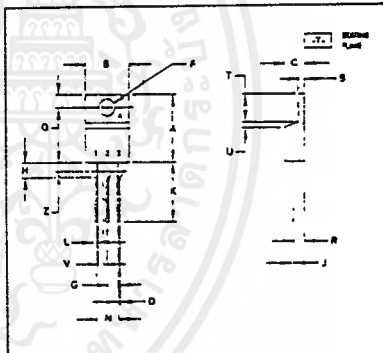
MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	IRF				Unit
		510	511	512	513	
Drain-Source Voltage	V _{DSS}	100	60	100	60	V _{dc}
Drain-Gate Voltage (R _{GS} = 1.0 MΩ)	V _{DGR}	100	60	100	60	V _{cc}
Gate-Source Voltage	V _{GS}	= 20				V _{dc}
Continuous Drain Current T _C = 25°C	I _D	4.0	4.0	3.5	3.5	A _{dc}
Continuous Drain Current T _C = 100°C	I _D	2.5	2.5	2.0	2.0	A _{dc}
Drain Current Pulsed	I _{DM}	16	16	14	14	A _{ac}
Total Power Dissipation @ T _C = 25°C Derate above 25°C	P _D	20				Watts
		0.16				W/°C
Operating and Storage Temperature Range	T _J , T _{stg}	-55 to 150				°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Thermal Resistance Junction to Case	R _{θJC}	5.4	°C/W
Junction to Ambient	R _{θJA}	52.5	°C/W
Maximum Lead Temp. for Soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	T _L	300	°C

See the MTP5N10 Designer's Data Sheet for a complete set of design curves for this product.



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIM Z DETERMINE A ZONE WHERE ALL BODY AND LEAD IRREGULARITIES ARE ALLOWED.

MILLIMETERS		INCHES		
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
1	2.46	2.53	0.097	0.100
2	2.28	2.29	0.090	0.091
3	4.17	4.82	0.164	0.190
4	2.34	2.38	0.092	0.094
5	2.41	2.42	0.095	0.095
6	2.42	2.49	0.095	0.098
7	4.28	4.32	0.169	0.170
8	2.28	2.28	0.090	0.090
9	2.28	2.28	0.090	0.090
10	2.28	2.28	0.090	0.090
11	2.28	2.28	0.090	0.090
12	2.28	2.28	0.090	0.090
13	2.28	2.28	0.090	0.090
14	2.28	2.28	0.090	0.090
15	2.28	2.28	0.090	0.090
16	2.28	2.28	0.090	0.090
17	2.28	2.28	0.090	0.090
18	2.28	2.28	0.090	0.090
19	2.28	2.28	0.090	0.090
20	2.28	2.28	0.090	0.090

CASE 221A-04
TO-220AB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใช้

IRF510-513

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_C = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Drain-Source Breakdown Voltage (V _{GS} = 0, I _D = 250 μA)	V _{(BR)DSS}	100 60	—	—	V _{dc}
Zero Gate Voltage Drain Current (V _{GS} = 0 V, V _{DS} = Rated V _{DSS}) (V _{GS} = 0 V, V _{DS} = 0.8 Rated V _{DSS} , T _C = 125°C)	I _{DSS}	—	—	0.25 1.0	mAdc
Forward Gate-Body Leakage Current (V _{GS} = 20 V, V _{DS} = 0)	I _{GSSF}	—	—	100	nAdc
Reverse Gate-Body Leakage Current (V _{GS} = -20 V, V _{DS} = 0)	I _{GSSR}	—	—	-100	nAdc
ON CHARACTERISTICS*					
Gate Threshold Voltage (V _{DS} = V _{GS} , I _D = 250 μA)	V _{GS(th)}	2.0	—	4.0	V _{dc}
On-State Drain Current (V _{DS} = 25 V, V _{GS} = 10 V)	I _{D(on)}	4.0 3.5	—	—	Adc
Static Drain-Source On-Resistance (V _{GS} = 10 V, I _D = 2.0 A)	r _{DS(on)}	—	—	0.6 0.8	Ohms
Forward Transconductance (V _{DS} = 15 V, I _D = 2.0 A)	g _{FS}	1.0	—	—	mhos
DYNAMIC CHARACTERISTICS					
Input Capacitance	C _{iss}	—	—	150	pF
Output Capacitance (V _{DS} = 25 V, V _{GS} = 0, f = 1.0 MHz)	C _{oss}	—	—	100	pF
Reverse Transfer Capacitance	C _{rss}	—	—	25	pF
SWITCHING CHARACTERISTICS* (T_J = 100°C)					
Turn-On Delay Time	t _{d(on)}	—	—	20	ns
Rise Time	t _r	—	—	25	ns
Turn-Off Delay Time	t _{d(off)}	—	—	25	ns
Fall Time	t _f	—	—	20	ns
SOURCE DRAIN DIODE CHARACTERISTICS*					
Forward On-Voltage	V _{SD}	—	2.0	V _{dc}	
Forward Turn-On Time	t _{on}	I _{IS} = Rated I _D , V _{GS} = 0			Limited by stray inductance
Reverse Recovery Time	t _{rr}	—	230	ns	
INTERNAL PACKAGE INDUCTANCE (TO-220)					
Internal Drain Inductance (Measured from the contact screw on tab to center of die) (Measured from the drain lead 0.25" from package to center of die)	L _d	—	3.5 4.5	—	nH
Internal Source Inductance (Measured from the source lead 0.25" from package to source bond pad.)	L _s	—	7.5	—	nH

*Pulse Test: Pulse Width ≤ 300 μs, Duty Cycle ≤ 2.0 %.

RESISTIVE SWITCHING

FIGURE 1 — SWITCHING TEST CIRCUIT

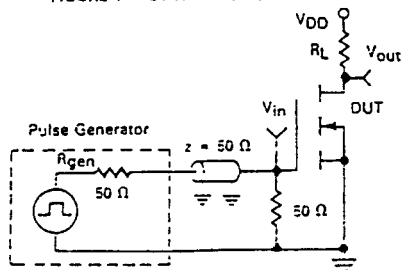
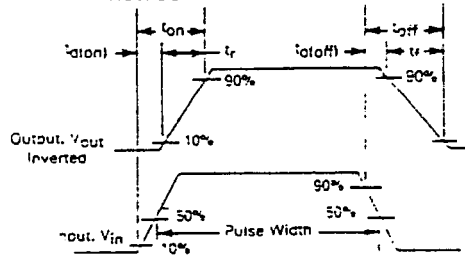


FIGURE 2 — SWITCHING WAVEFORMS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. ประภาส ไพรสุวรรณ และอาจารย์อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์
ที่ปรึกษาที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kuttruff , H. , “ Ultrasonic Fundamentals and Application ” , Elsevier Science Publishers LTD. ,London and New York ,1991
- [2] Belincourt , don. . “ Ultrasonic transducer materials , edited by o.e. mattiat. New York , Plenum Press 1971
- [3] Hatano ,H. and Kanai ,S. , “ High-Frequency Ultrasonic Cleaning Tank Utilizing Oblique Incidence ” IEEE. Transactions on Ultrasonic,Ferroelectrics,and Frequency Control , Vol. 43, No. 4, July, 1996
- [4] Muhammad H. Rashid , “ Power Electronics ” , Prentice-Hall , New Jersey , 1988
- [5] MOTOROLA. “TMOS POWER MOSFET DATA ” ,Fourth Edition ,Third Printing,1989
- [6]. สุวัฒน์ ดัน , “เทคนิคและการออกแบบสวิทช์เพาเวอร์ซัพพลาย” เอนเทลไทย มกราคม 2537
- [7]. เขมิกอนตักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ , “ เทคนิคการใช้งานอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ ” หน้า 58 - 73 , ฉบับที่ 44 , เมษายน , 2524