

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

Ultrasonic Cleaner



6

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2541

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 34134
วัน, เดือน, ปี..... 6 ต.ค. 2542

ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค

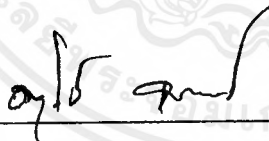
ผู้จัดทำ

1. นายชนรัตน์ หาชนะนี
2. นายพันเลิศ รัตน์ะ
3. นายไพฑูรย์ พันธุดิธร
4. นายศิริพงษ์ นกพวงค์



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ประภาพร ไพรสุวรรณ)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์อานวัฒน์ ขางวนิชดิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค

นายธนรัตน์ หาชนะนี้

นายพันเลิศ รัตนะ

นายไพฑูรย์ พันธุดิธร

นายศิริพงษ์ นกทนางค์

ผ.ศ. ประภาส ไพรสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541

### บทคัดย่อ

การทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค คือการนำคุณสมบัติของคลื่นอุลตราโซนิคที่เป็นคลื่นเสียงซึ่งมีความถี่สูงเกินกว่ามนุษย์จะรับฟังได้ มีทิศทางและกำหนดทิศทางได้ มาใช้ในการทำความสะอาดคลื่นอุลตราโซนิค เมื่อผ่านเข้าไปในของเหลวจะทำให้เกิดกระบวนการ คาวีเทชัน และ อิมโพลชัน ทำให้เกิดฟองอากาศคาวีเทชันขึ้น ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นกระบวนการทำความสะอาด ประเภทจุ่มชิ้นงานลงไปในการทำความสะอาด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นในประเภทการทำความสะอาดแบบเดียวกัน (การจุ่มและล้าง)แล้ว กระบวนการคาวีเทชัน และ อิมโพลชัน จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

การกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิค จะใช้อุลตราโซนิคทรานส์ดีวเซอร์ ประเภทเปียโซอิเล็กทริกส์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล โดยความถี่ของการสั่นจะมีค่าเท่ากับความถี่ของพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้ ในโครงการชิ้นนี้จะใช้อุลตราโซนิคทรานส์ดีวเซอร์ ที่มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 28 กิโลเฮิรตซ์

วงจรที่จะทำให้อุลตราโซนิคทรานส์ดีวเซอร์ทำงาน จะใช้วงจรกำเนิดความถี่ที่มีไอซี ทีแอล 494 เป็นตัวกำเนิดความถี่ และส่งสัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดความถี่ไปยังวงจรขับเกท สัญญาณที่ออกจากวงจรขับเกทจะส่ง ไปยังวงจรกำลัง และนำวงจรกำลังต่อกับอุลตราโซนิคทรานส์ดีวเซอร์ เพื่อกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิคต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ULTRASONIC CLEANER

Thanarat	Hathane
Punlert	Ruttana
Paitoon	Panthuwadeethorn
Siriphong	Nokthanong
Asst. Prof. Prapas	Paisuwanna Advisor
Anuwat	Jangwanitlert Advisor

1998

### Abstract

Ultrasonic cleaning is bringing of properties of ultrasonic wave that is high frequency wave and can be controled direction to use in cleaning.

Cavitation and implosion happen in liquid when ultrasonic wave travels through liquid elastic medium. It creates cavitative bubble used in immerse and wash cleaning. When compare this type with other process in the same cleaning (immerse and wash) , this type is better.

Ultrasonic creating uses piaso electric transducer. It can transfer electrical energy to mechanical energy. The oscillated frequency have to be matched with electrical energetic frequency which is input (in this project , uses resonant frequency 28 kH ).

The ultrasonic transducers are transfer power by electrical circuit system that uses oscillator circuit (uses IC TL494 ) to generate and to emit 28 kH frequency signal to drive gate for amplifying the increased voltage and current that drive power circuit ( the circuit is full bridge inverter power MOSFET ). The transducers converse electrical energy to mechanical energy by vibration that produces the ultrasonic wave.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการของการทำความสะอาดด้วยอุลตราโซนิก	3
2.1 ทฤษฎีคลื่นอุลตราโซนิก	3
2.1.1 นิยามและความหมายของคลื่นอุลตราโซนิก	3
2.1.2 ทฤษฎีคลื่น	3
2.2 การใช้คลื่นอุลตราโซนิกทำความสะอาด	5
2.2.1 กระบวนการควิเตชันและอิมโพลชัน	5
2.2.2 ประโยชน์ของคลื่นอุลตราโซนิกในการทำความสะอาด	6
2.2.3 Important of Minimizing Dissolved Gas	9
2.2.4 ความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิกในการทำความสะอาดโดยการทำให้ละลาย	10
2.2.5 สิ่งสกปรกเชิงซ้อน	11
2.2.6 A Superior Process	11
2.2.7 ประสิทธิภาพของการทำความสะอาดโดยคลื่นอุลตราโซนิก	12
2.2.8 ข้อดีและข้อเสียของการทำความสะอาดโดยคลื่นอุลตราโซนิก	13
2.3 อุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์	14
2.3.1 นิยาม	14
2.3.2 คุณสมบัติทั่วไปของทรานสดิวเซอร์	16
2.3.3 คุณสมบัติทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์	17
2.3.4 เปียโซอิเล็กตริกทรานสดิวเซอร์	18
2.3.5 เปียโซอิเล็กตริกเอฟเฟค	19
2.4 ไคโอด , ซีเนอร์ไคโอด และเพนเวอร์มอสเฟต	20
2.4.1 ไคโอด	20
2.4.2 ซีเนอร์ไคโอด	22
2.4.3 เพนเวอร์มอสเฟต	25

2.5	วงจร LC เรโซแนนท์	42
บทที่ 3	การคำนวณและการสร้างวงจรขับหลอดร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์	46
3.1	วงจรควบคุม	46
3.1.1	ไอซีเบอร์ TL494 สำหรับโหมคควบคุมจากแรงดัน	46
3.1.2	วงจรขับเกทของเพาเวอร์มอสเฟต	51
3.1.3	วงจรสับเบอร์	51
3.1.4	วงจรรวมของการกำเนิดความถี่และวงจรขับเกท	56
3.2	วงจรกำลัง	57
บทที่ 4	การสร้างเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค การนำไปใช้และผลการทดลอง	59
4.1	โครงสร้างส่วนที่เป็นตัวถัง	59
4.2	วงจรทางไฟฟ้า	60
4.2.1	วงจร โวลเตจเรกูเรเตอร์	60
4.2.2	วงจรกำเนิดความถี่	60
4.2.3	วงจรขับเกท	61
4.2.4	วงจรกำลัง	62
	สรุปผลการทดลอง	69
บทที่ 5	สรุปและวิจารณ์	70
	ภาคผนวก	
	กิตติกรรมประกาศ	
	เอกสารอ้างอิง	

## สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงประเภทของคลื่นเสียง	4
รูปที่ 2.2	แสดงธรรมชาติของคลื่นเสียงที่มีช่วงอัดและขยาย	5
รูปที่ 2.3	แสดงกระบวนการเกิด Cavitation และ Implosion	6
รูปที่ 2.4	แสดงหน้าสัมผัสของชิ้นงานเมื่อแช่อยู่ในน้ำยาทำความสะอาด	7
รูปที่ 2.5	แสดงน้ำยาที่ทำละลายรวมตัวกับสิ่งสกปรกเกิดการอิมพัลส์	8
รูปที่ 2.6	แสดง Cavitation ทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำยาทำความสะอาด	8
รูปที่ 2.7	แสดงลักษณะของฟองก๊าซในกระบวนการ Cavitation	9
รูปที่ 2.8	แสดงอนุภาคที่ไม่ละลายกับสารละลาย	10
รูปที่ 2.9	แสดงการทำทำความสะอาด โดยใช้แปรง	11
รูปที่ 2.10	แสดงผลของอุณหภูมิจากปัจจัยต่างๆ	13
รูปที่ 2.11	แสดง Mechanical Transducer	14
รูปที่ 2.12	แสดง ก) เซลล์ที่ยังไม่ถูกแรงใดๆ ข) เซลล์ที่ถูกอัด ค) เซลล์ที่ถูกขยาย	15
รูปที่ 2.14	แสดงภาพเปียโซอิเล็กทริก	18
รูปที่ 2.15	แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของทรานสดิวเซอร์	19
รูปที่ 2.16	แสดงปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก โดยอธิบายในลักษณะที่ชั้นสารทำจากแร่ควอตซ์	19
รูปที่ 2.17	แสดงลักษณะสมบัติของไดโอด	21
รูปที่ 2.18	แสดงโครงสร้างภายนอกของซีเนอร์ไดโอด	22
รูปที่ 2.19	แสดงสัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด	23
รูปที่ 2.20	แสดงวงจรเรกูเรเตอร์ด้วยซีเนอร์ไดโอด	24
รูปที่ 2.21	แสดงวงจรเรกูเรเตอร์เมื่อต่อโหลด	25
รูปที่ 2.22	แสดงวงจรเทียบเคียงหรือชุปเปอร์ประกอบการควบคุมแหล่งจ่ายด้วยแรงดัน	26
รูปที่ 2.23	แสดงลักษณะ โครงสร้างของมอสเฟต	27
รูปที่ 2.24	แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต	29
รูปที่ 2.25	แสดงการทำงานของมอสเฟต	29
รูปที่ 2.26	แสดงคุณลักษณะการ โอนย้ายของมอสเฟตเบอร์ MTP 5N40	30
รูปที่ 2.27	แสดงแรงดันขีดเริ่มที่แปรไปตามอุณหภูมิ	31
รูปที่ 2.28	แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของมอสเฟตขณะนำกระแส	32

รูปที่ 2.29	แสดงตัวเก็บประจุในมอสเฟต	33
รูปที่ 2.30	แสดงภาพตัดภายในของมอสเฟต	34
รูปที่ 2.31	แสดงคุณสมบัติขั้วต่อฟอร์เวิร์ดของไดโอด	35
รูปที่ 2.32	แสดงการสวิตช์ของมอสเฟต	38
รูปที่ 2.33	แสดงกราฟ FBSOA และ RBSOA	40
รูปที่ 2.34	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันเมื่อเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแส	40
รูปที่ 2.35	แสดงวงจร Parallel Resonant	42
รูปที่ 2.36	แสดงกราฟ Skin Depth กับความถี่ต่างๆของตัวนำแต่ละชนิด	44
รูปที่ 3.1	แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของ TL494	46
รูปที่ 3.2	แสดงความสำคัญของค่า R และ C ในการกำหนดความถี่	47
รูปที่ 3.3	แสดงรูปคลื่นและการทำงานของ TL494	48
รูปที่ 3.4	แสดงการต่อวงจรเคดใหม่	49
รูปที่ 3.5	แสดงการเลือกใช้อาร์ตพุทของ TL494	50
รูปที่ 3.6	แสดงการต่อวงจรสร้างพัลส์ความถี่ 28 kHz ของ TL 494	50
รูปที่ 3.7	แสดงวงจรขับเกทของเพาเวอร์มอสเฟต	51
รูปที่ 3.8	แสดงลักษณะการลดลงของกระแสและการเพิ่มแรงดันขณะหยุดนำกระแส	52
รูปที่ 3.9	แสดงการต่อวงจรสับเบอร์ของช่วงหยุดนำกระแสเพื่อหน่วงแรงดันให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ	53
รูปที่ 3.10	แสดงการต่อวงจรสับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน	54
รูปที่ 3.11	แสดงวงจรรวมของการกำเนิดความถี่และวงจรขับเกท	56
รูปที่ 3.12	แสดงวงจรกำลังที่ใช้ในการขับอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์	57
รูปที่ 3.13	แสดงวงจรฟลูตบริจอินเวอร์เตอร์	58
รูปที่ 4.1	แสดงทรานสดิวเซอร์	59
รูปที่ 4.2	แสดงรูปสัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่	60
รูปที่ 4.3	แสดงรูปสัญญาณจากวงจรขับเกท	61
รูปที่ 4.4	แสดงรูปสัญญาณจากวงจรกำลังขณะไม่มีโหลด	62
รูปที่ 4.5	แสดงการต่อวงจรกำเนิดความถี่กับวงจรขับเกท	63
รูปที่ 4.6	แสดงบล็อกลโคแกรมการทำงานของวงจรขับทรานสดิวเซอร์	64
รูปที่ 4.7	แสดงสัญญาณแรงดันอาร์ตพุทขณะขับโหลด	65
รูปที่ 4.8	แสดงคลื่นอาร์ตพุทที่ยังไม่ได้ต่อวงจร RLC เรโซแนนท์	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9	แสดงการต่อวงจรกำลังกับวงจร RLC เรโซแนนท์	67
รูปที่ 4.10	แสดงรูปโครงสร้างโรงงานที่เสร็จสมบูรณ์	68



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1      แสดงคุณสมบัติของสารเซรามิก	18
ตารางผลการทดลองเมื่อยังไม่ได้ต่อ RLC เรโซแนนท์	68
ตารางผลการทดลองเมื่อต่อ RLC เรโซแนนท์	69



## บทที่ 1

### บทนำ

เทคโนโลยีในการทำความสะอาด กล่าวได้ว่าการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ในขณะเดียวกัน ความจำเป็นในการทำความสะอาด ก็กำลังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความสะอาดกลายเป็นสิ่งมุ่งเน้นที่สำคัญในหลายๆโรงงาน โดยที่ในอดีตที่ผ่านมาไม่เคยเป็นมาก่อน ในโรงงานต่างๆเช่น โรงงาน อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งให้ความสำคัญกับความสะอาดอยู่แล้วนั้น ก็ได้ให้ความสำคัญมากขึ้น เพื่อเป็นสิ่งสนับสนุน ให้เกิดความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ซึ่งเมื่อมองดูแล้วเหมือนกับว่า ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีนั้น ต้องการความใส่ใจในเรื่องความสะอาด อย่างมากขึ้นเรื่อยๆ และด้วยเหตุผลนี้เอง อุตสาหกรรมกรรมการทำความสะอาด ได้มีการเปลี่ยนแปลงทาง“นวัตกรรม”อย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้ความสะอาดที่ต้องการเป็นเวลาหลายปีที่ผ่านมา

อุตสาหกรรมกรรมการทำความสะอาด ได้พยายามที่จะกำจัดและหลีกเลี่ยง ไม่ให้เกิดมลภาวะเป็นพิษ เนื่องจากใช้สารละลายของ F และ CI ในการทำความสะอาด ด้วยทางเลือกที่ว่า “เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม”(environmentally) เทคโนโลยีหนึ่งที่ทันสมัย สอดคล้องกับจุดประสงค์ด้านสิ่งแวดล้อมอีกทั้งสะดวก รวดเร็วและมีประสิทธิภาพได้แก่เทคโนโลยีทาง ultrasonic cleaner

การทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เป็นกระบวนการทำความสะอาดประเภท จุ่มและล้างในของเหลว(immersion cleaning) ที่มีประสิทธิภาพ สามารถกำจัดสิ่งสกปรกได้หลายชนิด เช่น เศษผงของเครื่องจักร น้ำมัน อนุภาคสิ่งสกปรกเล็กๆ ได้เป็นอย่างดี

ระบบการทำความสะอาดด้วย คลื่นอัลตราโซนิก ประกอบด้วย ทรานสดิวเซอร์ (transducer) วงจรขับ แแทงค์ (tank) และตัวกลางของเหลว ตัวทรานสดิวเซอร์ จะแปลงพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดให้เป็นการสั่นสะเทือนจากพลังงานเสียง ซึ่งการสั่นสะเทือนนี้จะถูกส่งผ่านแพร่กระจายไปตามแทงค์ และจะผลิตฟองอากาศควิวเดชั่น (cavitation) ขึ้นมาในตัวกลางของเหลวภายในแทงค์บรรจุ ฟองอากาศเหล่านี้จะจัดวางตัว(formation) และยุบตัวลง (collapse) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการขัดถูขึ้น(scrubbing) ซึ่งจะใช้ในการกำจัดสิ่งสกปรกได้เป็นอย่างดี พลังงานที่ได้จากคลื่นอัลตราโซนิกนี้ จะทำให้อุณหภูมิของเหลวเพิ่มขึ้น ดังนั้นอุปกรณ์เสริมต่างๆเช่น เครื่องทำความร้อน (heater) , เทอร์โมสแตท (thermostat) ,คอยล์ระบายความร้อน (cooling coil) อาจจะเป็นจำเป็นต้องใช้เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของการทำงาน ให้อยู่ภายในอุณหภูมิที่กำหนด

การทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น โดยทั่วไปจะใช้ในกระบวนการที่มีหลายขั้นตอน อันประกอบด้วยขั้นตอนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ขั้นตอนการชำระล้าง

และ ขั้นตอนการเป่าแห้ง ซึ่งจะมีขั้นตอนปลีกย่อยต่างๆมากกว่านี้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งานนั้นๆ เช่นในขั้นตอนการทำความสะอาด อาจจะมีขั้นตอนการทำความสะอาดล่วงหน้าก่อน(pre wash) เพื่อทำความสะอาดที่หยาบหรือขนาดใหญ่ และจากนั้นอาจจะใช้ สเปรย์ ( spray ) ฝี คชำระล้างเพื่อ ถัดสิ่งสกปรกที่จะเข้ามาในแท่งค้ำระล้าง

กล่าวโดยสรุปแล้วโครงการนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค(ultrasonic cleaner) นี้ คือการอาศัยคุณลักษณะ และคุณประโยชน์ของคลื่นอุลตราโซนิค ( ultrasonic wave ) ทำให้เกิด กระบวนการควิเดชั่น ซึ่งเป็นขบวนการที่สำคัญในการทำความสะอาด โดยการกำเนิด คลื่นอุลตราโซนิค นั้น เราจะใช้ตัวทรานสดิวเซอร์ ( tranducer ) เป็นตัวกำเนิด



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการของเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่น อุลตราโซนิค

#### 2.1 ทฤษฎีคลื่นอุลตราโซนิค

##### 2.1.1 นิยามและความหมายของคลื่นอุลตราโซนิค(Ultrasonic)

คลื่นอุลตราโซนิค (Ultrasonic) คือคลื่นเสียงที่อยู่เหนือกว่าขีดจำกัดที่มนุษย์ สามารถได้ยินหรือรับฟังได้ ความถี่ของคลื่นเสียงนั้นเป็นสิ่งที่แสดงถึงระดับ (Pitch) หรือความสูงต่ำ (Tone) ของมันเอง โดยที่ความถี่ต่ำจะให้ระดับเสียงที่ต่ำ ( Bass Tone) ความถี่สูงจะให้ระดับเสียงที่สูง ( Treble Tone)

คลื่นเสียง Ultrasonic นั้นก็คือคลื่นเสียงที่มีระดับเสียงและความถี่สูงเกินกว่าความสามารถของมนุษย์จะรับฟังได้ด้วยหู ความถี่ที่สูงกว่า 18 kHz โดยทั่วไปจะพิจารณาให้เป็นคลื่น Ultrasonic สำหรับความถี่คลื่น Ultrasonic ที่ใช้สำหรับทำความสะอาดนั้นจะอยู่ในช่วง 20,000 รอบต่อวินาที หรือ 20 kHz ถึงเกินกว่า 100,000 kHz

ในการใช้งานทำความสะอาดทั่วไปส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมนั้น จะใช้ความถี่ในช่วง 20 kHz ถึง 50 kHz ความถี่ที่สูงกว่า 50 kHz จะใช้โดยทั่วไปในงานการทำความสะอาดขนาดเล็กที่ละเอียด คัดไต่ได้ เช่น ในร้านเพชรพลอย และร้านหมอพื้น

##### 2.1.2 ทฤษฎีคลื่น

เพื่อที่จะเข้าใจถึงกลไกการทำงานของคลื่น Ultrasonic ใต้นั้น จำเป็นต้องมีพื้นฐานความเข้าใจในเรื่องคลื่นเสียงว่ามันกำเนิดขึ้นได้อย่างไร และมันสามารถเดินทางผ่านตัวนำหรือตัวกลางได้อย่างไรด้วย

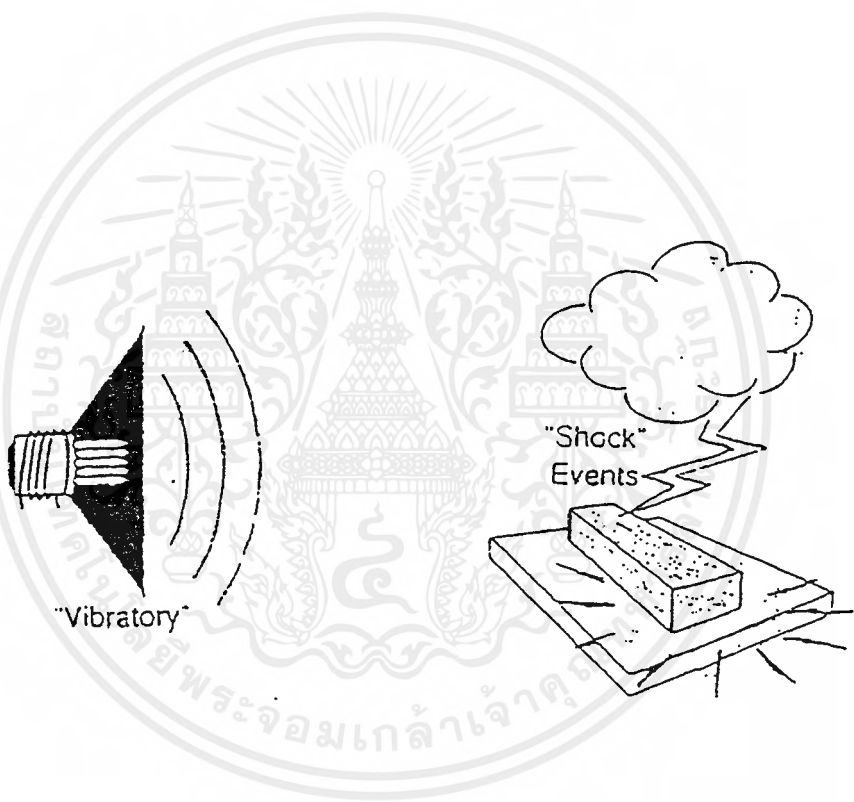
ในพจนานุกรมนั้นให้คำจำกัดความคลื่นเสียงว่าเป็นการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนส่งผ่านตัวกลางที่สามารถยืดหยุ่นได้ เช่น ของแข็ง ของเหลว หรืออากาศ

-การกำเนิดคลื่นเสียง คลื่นเสียงจะกำเนิดขึ้นใต้นั้น ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ของตัวกลางนำคลื่นเสียงที่เกิดซ้ำหลายๆ ครั้ง ( Repeat) หรือแค่ครั้งเดียว (Single) เช่น การเกิดฟ้าผ่า (Shock) หรือการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน (Vibratory)

การเคลื่อนที่ของอากาศที่บริเวณ Cone ของเครื่องกระจายเสียงวิทยุ (Radio Speaker) นั้นเป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับอธิบายการสั่นสะเทือน (Vibration) ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวทางกล ขณะที่ Cone ของ Speaker เคลื่อนที่ถอยหลังและเดินหน้านั้น อากาศทางด้านหน้าของ Cone จะถูกอัดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และขยายตัวเพื่อทำให้ได้คลื่นเสียงออกมา ซึ่งจะเดินทางตามอากาศมาเรื่อยๆ จนกระทั่งจะหายไป  
 ในที่สุด โดยส่วนมากเรามักจะรู้จักคลื่นเสียงว่าเป็นแบบชนิดนี้ซึ่งกำเนิดจากการเคลื่อนไหวทางกล  
 คลื่นเสียงอีกแบบที่กำเนิดจากปรากฏการณ์ ‘Shock’ เช่นฟ้าผ่า นั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลง  
 แปลงของปริมาณความจุของอากาศอย่างทันทีทันใดซึ่งเป็นผลมาจากการคายประจุไฟฟ้า  
 (Discharge) ในอากาศ (Lighting) ตัวอย่างอื่นของการ ‘Shock’ เช่น เสียงที่เกิดขึ้นตอนที่แผ่นไม้  
 ตกกระทบกับพื้นซีเมนต์ปรากฏการณ์ ‘Shock’ นี้ จะเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่น Single  
 Compression ที่แพร่กระจายออกไปจากแหล่งกำเนิด

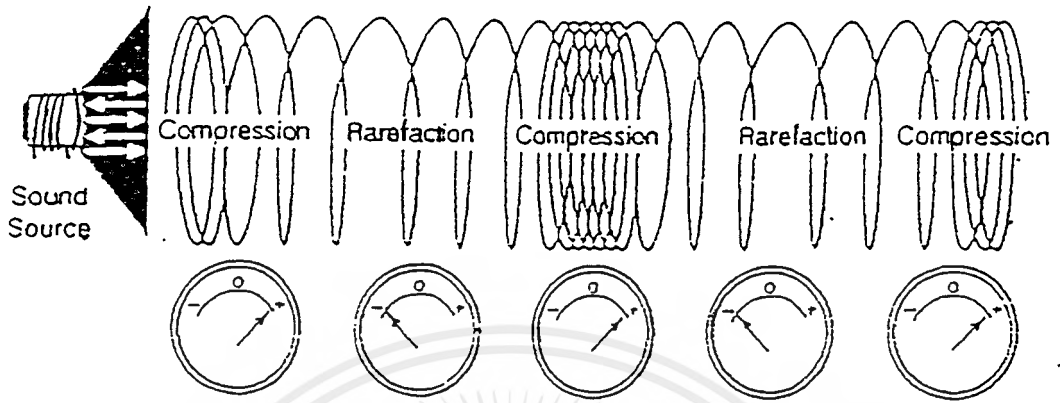


A

B

รูปที่ 2.1 แสดงประเภทของคลื่นเสียง A. จากการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน  
 B.จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

### 2.1.3 ธรรมชาติของคลื่นเสียง



รูปที่ 2.2 แสดงธรรมชาติของคลื่นเสียงที่มีช่วงอัดและขยาย

ตามรูปที่ 2.2 จะใช้ขดลวดสปริงเป็นสิ่งที่ใช้แทน เพื่อแสดงถึงแต่ละโมเลกุลของตัวกลางนำคลื่นเสียง โดยแต่ละโมเลกุลในตัวกลางนั้นจะได้รับอิทธิพลจากโมเลกุลเคียงข้างที่ติดๆกัน เช่นเดียวกันกับขดลวดของสปริงก็จะส่งผลกระทบต่อขดลวดอื่นที่อยู่ข้างเคียงด้วยเหมือนกัน

แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงตามแบบจำลองนั้นจะอยู่ทางด้านซ้าย การอัด (Compression) ที่ถูกสร้างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงจะเป็นเช่นเดียวกับการผลักกันของขดลวดที่อยู่ติดกัน สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ควรทราบคือ ถึงแม้ว่าคลื่นจะเดินทางจากปลายข้างหนึ่งของสปริงไปยังอีกข้างหนึ่งก็ตามแต่ละขดลวดก็จะยังคงรักษาค่าตำแหน่งเดิมของมัน ด้วยเหตุผลนี้ แต่ละขดลวดของสปริง ในส่วนแรกจะเกิดการอัดตัว (Compression) จากการผลักกันของขดลวดที่ติดกัน และต่อจากนั้นจะเป็นส่วนของการขยายตัว (Rarefaction) ซึ่งขดลวดที่ติดกันจะถอยออกห่างจากกัน

ณ ตำแหน่งใดๆก็ตามในตัวกลางนำคลื่นเสียง จะถูกทำให้มีการอัดตัว และจากนั้นจะขยายตัวสลับกันไป บริเวณที่มีการอัดตัวนั้น ความดันในตัวกลางจะเป็นบวก และบริเวณที่มีการขยายตัว ความดันของตัวกลางจะเป็นลบ

## 2.2 การใช้คลื่น Ultrasonic ทำความสะอาด

### 2.2.1 CAVITATION AND IMPLOSION

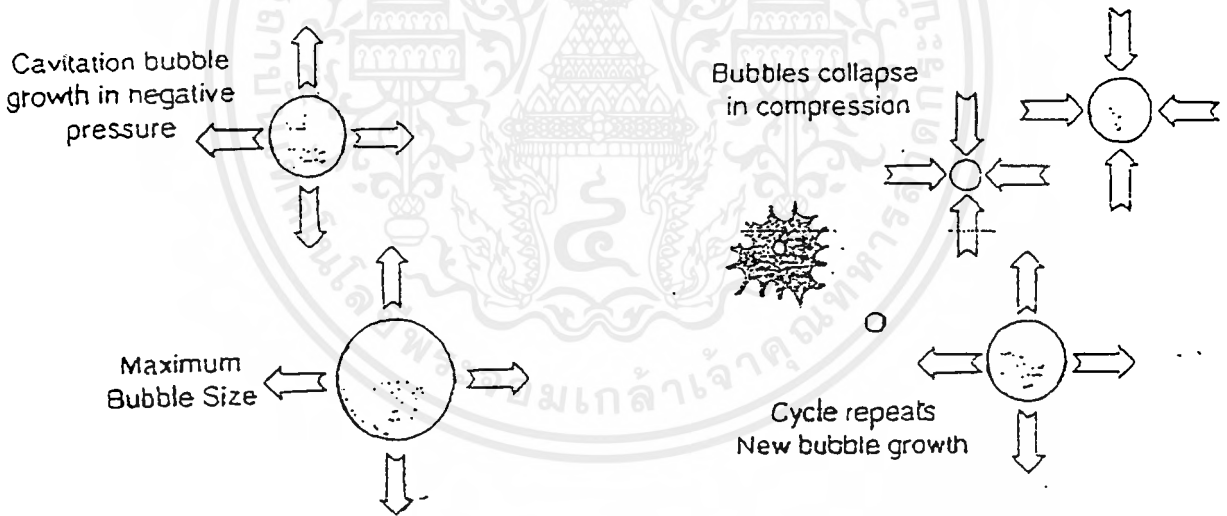
ในสื่อตัวกลางที่ขี้ดหยุ่น เช่น อากาศ และของแข็งเกือบทั้งหมดนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเกิดขึ้นในขณะที่คลื่นเสียงถูกส่งผ่าน ส่วนในตัวกลางที่ไม่ขี้ดหยุ่นเช่น น้ำหรือของเหลวทั่วไป จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่แอมพลิจูด หรือความดัง (Loudness) ของเสียงนั้นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่แอมพลิจูดของเสียงเพิ่มขึ้นนั้น ขนาดของความดันที่เป็นลบ (Negative Pressure) ในบริเวณที่คลื่นขยายตัว (Rarefaction) จะเป็นสาเหตุที่เพียงพอจะทำให้ของเหลวแตกตัวออกในที่สุด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า คาวิเดชั่น (Cavitation) ปรากฏการณ์ คาวิเดชั่น (ฟองอากาศ) จะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการขยายตัว ของเหลวจะแตกออกหรือฉีกขาดเนื่องจาก Negative Pressure ของคลื่นเสียงในของเหลว

ขณะที่คลื่นเสียงเดินทางไปข้างหน้า คาวิเดชั่น (Cavitation) จะแกว่ง (Oscillate) ภายใต้อิทธิพลของความดันที่เป็นบวก และจะโตขึ้นจนมีขนาดที่ไม่มีเสถียรภาพ ในที่สุดจะเกิดการยุบตัวลงอย่างรุนแรงของ Cavitation เป็นผลให้เกิดการ Implosion ซึ่งจะทำให้คลื่น Shock Wave แผ่กระจายออกไปจากบริเวณที่ยุบตัว (Collapse) การยุบตัว (Collapse) และการ Implosion ของคาวิเดชั่น ที่เกิดขึ้นจำนวนมากในของเหลวนั้นเป็นผลที่เกี่ยวข้องมาจากการกระตุ้นของคลื่น Ultrasonic นั้นเอง

ได้มีการคำนวณว่า บริเวณที่เกิด Implosion ของฟองอากาศคาวิเดชั่นนั้น จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า 10,000 องศาฟาเรนไฮต์ และมีความดันที่สูงกว่า 10,000 PSI

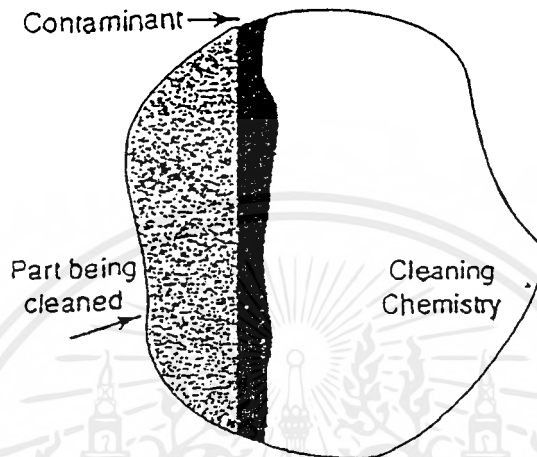


รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการการเกิด cavitation และ implosion

### 2.2.2 ประโยชน์ของคลื่น Ultrasonic ในกระบวนการทำความสะอาดและการชำระล้าง

ในการทำความสะอาดนั้น สิ่งสกปรกจะถูกกำจัดโดยการทำความสะอาดรวมตัว หรือโดยการเคลื่อนย้ายขจัดออกทิ้ง หรือทั้งสองอย่างเกิดขึ้นพร้อมกัน ขึ้นอยู่กับว่าสารละลายที่ใช้สามารถละลายสิ่งสกปรกเหล่านั้นได้หรือไม่ ผลที่เกิดทางกลเนื่องจากพลังงานของคลื่น Ultrasonic นั้นสามารถช่วยเพิ่มความเร็วของการรวมตัวหรือการขจัดออกทิ้งของสิ่งสกปรก ซึ่งจะเป็นประโยชน์

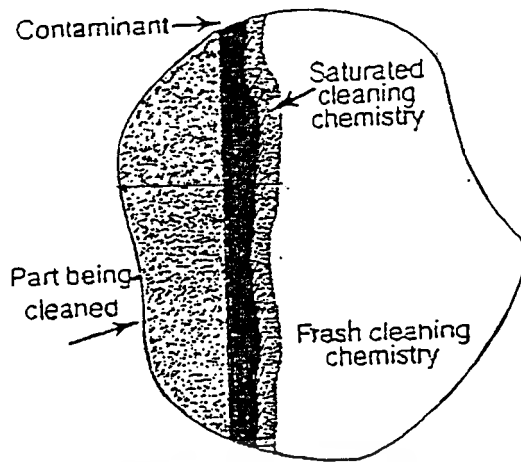
ในการทำควมสะอาดรวมทั้งกระบวนการชำระล้างด้วย สารเคมีที่หลุดตกค้างจากการทำความสะอาด จะถูกกำจัดออกอย่างรวดเร็ว โดยสิ้นเชิง ด้วยกระบวนการชำระล้างของ Ultrasonic



รูปที่ 2.4 หน้าสัมผัสของชิ้นงานที่มีคราบสกปรกติดอยู่ โดยชิ้นงานแช่อยู่ในน้ำยาทำความสะอาด

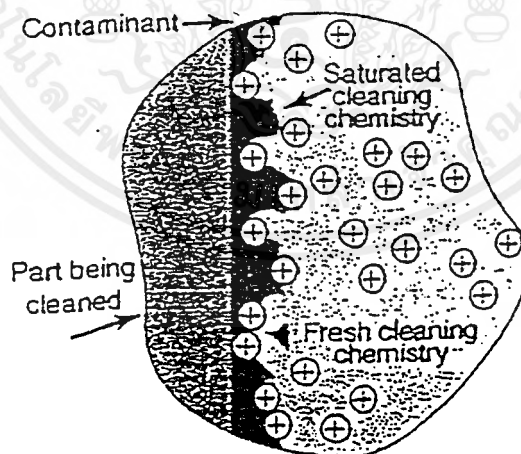
การขจัดสิ่งสกปรกออกด้วยการทำละลายรวมตัวนั้น สารเคมีที่เป็นตัวทำละลายต้องเข้าไปถึงสิ่งสกปรกและทำละลายสิ่งสกปรกออก กระบวนการทำความสะอาดจะเกิดบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างสารเคมีที่ทำความสะอาดกับสิ่งสกปรกเท่านั้น

ขณะที่ตัวทำละลายที่ใช้ทำความสะอาดกำลังรวมตัวทำละลายสิ่งสกปรกอยู่นั้น จะเกิดขึ้นของสารละลายที่อึดตัวที่ผิวสัมผัส ระหว่างตัวทำละลายกับสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ ทำให้กระบวนการทำความสะอาดหยุดลง ตัวทำละลายไม่สามารถจับตัวกับสิ่งสกปรกได้อีกเนื่องจากเกิดการอึดตัวของสารละลายที่ทำความสะอาด และยั้งกันไม่ให้ตัวทำละลายตัวใหม่ที่จะเข้ามาทำละลายสามารถเข้ามาได้



รูปที่ 2.5 แสดงน้ำยาที่ติดกับคราบสกปรกเกิดการอิมพัลชัน และแสดงให้เห็นว่าน้ำยาที่ยังไม่  
อิมพัลชันเข้าไม่ถึง

กระบวนการ Cavitation และ Implosion ของคลื่น Ultrasonic นั้นจะกำจัดชั้นที่อิมพัลชันออก  
ไปได้อย่างดี ทำให้สารทำความสะอาดใหม่ที่จะเข้ามาทำความสะอาดสามารถเข้ามาขจัดสิ่งสกปรกได้ต่อไป  
ซึ่งจะเป็นประโยชน์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อจะทำความสะอาดบริเวณพื้นผิวที่ไม่เรียบ

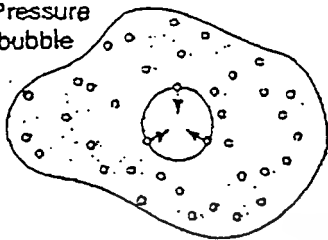


รูปที่ 2.6 กระบวนการ cavitation และ implosion ช่วยให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำยาทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

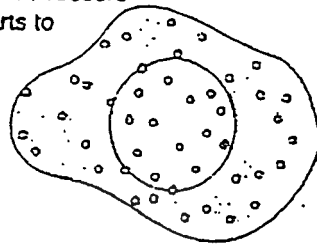
### 2.2.3 Importance of Minimizing Dissolved Gas

Negative Pressure  
cavitation bubble  
growing



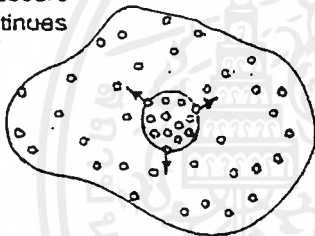
a

Atmospheric Pressure  
bubble starts to  
collapse



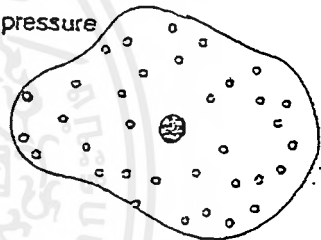
b

Positive pressure  
bubble continues  
to collapse



c

Maximum pressure



d

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของฟองก๊าซตั้งแต่เริ่มกระบวนการ cavitation จนถึงสิ้นสุด

ในระหว่างที่คลื่นเสียงมีความดันที่เป็นลบนั้น (Negative Pressure) ของเหลวจะแตกตัวออกและฟองอากาศวิเศษขึ้น ก็จะเริ่มมีการจัดวางตัว ขณะที่ Negative Pressure ภายในฟองอากาศเพิ่มขึ้นนั้น ก๊าซที่ถูกทำละลาย (Dissolved Gas) ในของเหลวที่มีความวิเศษนั้นจะเริ่มแพร่กระจายเข้ามาไปในฟองอากาศ ขณะที่ Negative Pressure ถูกลดลงในช่วงการขยายตัวของคลื่นเสียง และมีความดันสูงขึ้นจนถึงความดันบรรยากาศแล้วนั้น ฟองอากาศจะเริ่มยุบตัวลงเนื่องจากแรงดึงดูดของมันเองที่ตกลงมา

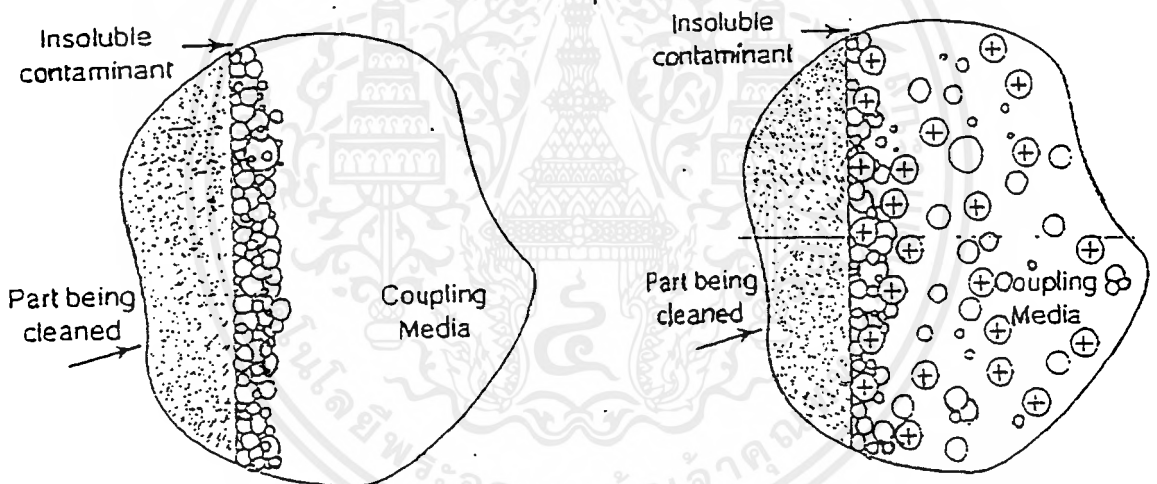
ในระหว่างช่วงการอัดตัวของคลื่นเสียง ก๊าซที่ฟุ้งกระจายอยู่ภายในฟองอากาศจะถูกอัดตัว และในที่สุดก็จะเริ่มแพร่กระจายเข้ามาในฟองอากาศอีกครั้ง อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ จะไม่สามารถสำเร็จได้จนกว่า ฟองอากาศจะบรรจุเต็มไปด้วยก๊าซ โดยตั้งแต่ที่ก๊าซยังไม่เริ่มแพร่เข้ามาในฟองอากาศ กระทั่งฟองอากาศถูกอัดตัว และเมื่อฟองอากาศถูกอัดตัวแล้ว พื้นผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบๆ ฟองอากาศที่ก๊าซสามารถแพร่เข้ามาได้จะถูกลด ด้วยเหตุผลนี้ ฟองอากาศควิเดชั่นที่บรรจุก๊าซอยู่ ซึ่งถูกจี้ควางตัวอยู่ในของเหลว จะไม่ยุบตัวลงให้เกิด Implosion แต่จะอยู่ในรูปก๊าซที่ถูกอัดตัวให้มีขนาดเล็กๆ ในของเหลวมากกว่า ปรากฏการณ์นี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการลดขนาดของก๊าซในของเหลวลง ฟองอากาศขนาดเล็กๆ ที่มีก๊าซอยู่ภายในจะรวมกลุ่มเข้าด้วยกัน จนกว่าจะเพียงพอให้มันลอยตัวขึ้นเหนือผิวหน้าของของเหลวในที่สุด

#### 2.2.4 ความเร็วของคลื่น Ultrasonic ในการทำความสะอาดโดยการทำให้ละลาย

สิ่งสกปรกบางชนิดจะประกอบด้วย อนุภาคของสารที่ไม่สามารถทำให้ละลายได้ ซึ่งจะเกาะติดกันอย่างหลวมๆ ด้วยแรงจากพันธะ Ionic และ Cohesive Force อนุภาคเหล่านี้สามารถกำจัดออกมาได้โดยเพียงแค่แยกแรงที่ดึงดูดมันเอาไว้ออกจากกัน



รูปที่ 2.8 แสดงอนุภาคที่ไม่ละลายในสารละลายซึ่งเกาะติดชิ้นงานอยู่

กระบวนการ Cavitation และ Implosion ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการใช้คลื่น Ultrasonic จะกำจัดและเคลื่อนย้ายสิ่งสกปรกที่เกาะติดอย่างหลวมๆ เช่น ฝุ่นละอองที่ติดอยู่บริเวณพื้นผิว เพื่อที่จะให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นนั้น ตัวกลาง Coupling Medium จำเป็นต้องสามารถทำให้อนุภาคเปียก เพื่อที่จะกำจัดออกไปได้

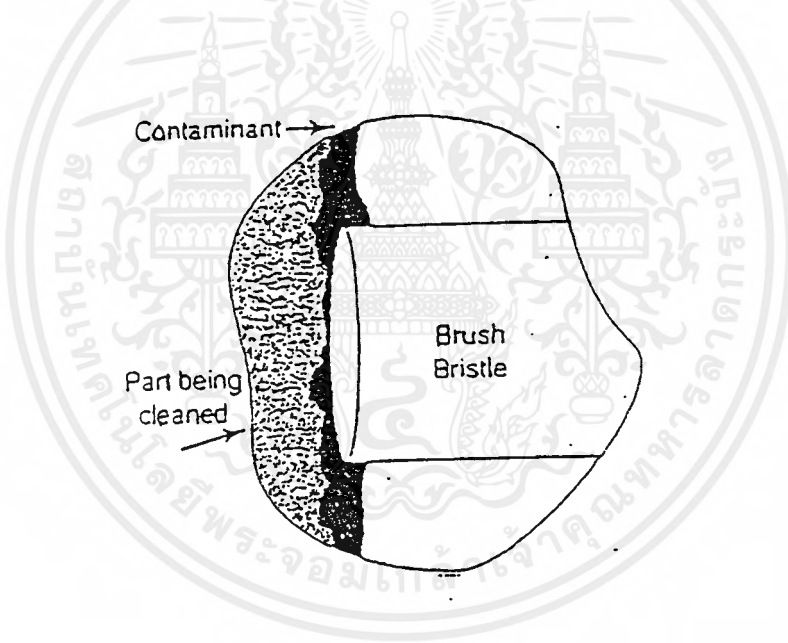
### 2.2.5 สิ่งสกปรกเชิงซ้อน (Complex Contaminant)

สิ่งสกปรกต่าง ๆ นั้น ตามธรรมชาติแล้วจะมีความซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยการรวมกันของส่วนที่สามารถทำละลายได้และส่วนที่ไม่ทำละลาย ผลที่ได้จากคลื่น Ultrasonic นั้นมีอย่างมากมาย เช่นในกรณีนี้ คือ

มันจะไปกระตุ้นกลไกการทำงาน ช่วยให้การทำละลายของสิ่งสกปรกที่ละลายได้ และการขจัดอนุภาคที่ไม่ทำละลายออกไป เกิดได้เร็วขึ้นกว่าเดิม

การทำงานของคลื่น Ultrasonic ยังแสดงให้เห็นว่า ช่วยเพิ่มความเร็วหรือช่วยส่งเสริมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายๆอย่างอีกด้วย และนี่เองอาจจะเป็นสาเหตุที่ ในบริเวณที่เกิด Implosion จะมีระดับพลังงานที่สูง ซึ่งจะทำให้เกิดอุณหภูมิจุดเดือดและความดันที่สูงมาก

### 2.2.6 A Superior Process



รูปที่ 2.9 แสดงการทำความสะอาดโดยใช้แปรง

ตามที่ได้อธิบายและแสดงมาแล้วทั้งหมดนั้น พื้นผิวของส่วนที่จะถูกทำความสะอาด ได้ถูกกำหนดให้เป็นพื้นราบ ซึ่งในความเป็นจริงเป็นไปได้ยากมาก ที่จะแบนราบ แต่จะประกอบไปด้วยเนิน หลุม ซึ่งขรุขระ ตามรูปจะแสดงให้เห็นว่า ทำไมพลังงานจากคลื่น Ultrasonic จึงมีประสิทธิภาพดีกว่า และทำไมจึงช่วยเสริมในการทำความสะอาดมากกว่าทางเลือกอื่นๆ เช่น การฉีดสเปรย์ทำความสะอาด การใช้แปรงขัด การใช้ดมเป่า หรือแม้แต่ Electro Cleaning ความช่วยเหลือของ

คลื่น Ultrasonic ในการทำความสะอาดพื้นผิวของส่วนที่เป็นเชิงซ้อน ( Complex Part) นั้นดีกว่า และเป็นเรื่องที่ควรจะสนใจเป็นอย่างยิ่งอีกด้วย

## 2.2.7 ประสิทธิภาพของการทำความสะอาด

ในการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิก ในการทำความสะอาดนั้น ประสิทธิภาพของการทำความสะอาดจะพิจารณาจากปัจจัยดังนี้

### 2.2.7.1 สารที่นำมาใช้เป็นสารทำความสะอาด

น้ำยาทำความสะอาดที่เราเลือกนำมาใช้ นับได้ว่าเป็นส่วนสำคัญซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพ ในกระบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

น้ำยาที่เลือกใช้นั้น ควรที่จะสอดคล้องและเหมาะสม กับวัสดุที่เราจะทำความสะอาดและไม่ทำอันตรายต่อ ตัวชิ้นงาน ตลอดจนส่วนประกอบต่างๆที่อยู่บนชิ้นงาน จึงจะมีประสิทธิภาพสูง ในการทำความสะอาด

โดยปกติน้ำยาทำความสะอาดแทบทุกชนิด มักจะสามารถนำมาใช้ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ควรจะหลีกเลี่ยง สารที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสารที่ใช้ในสเปรย์

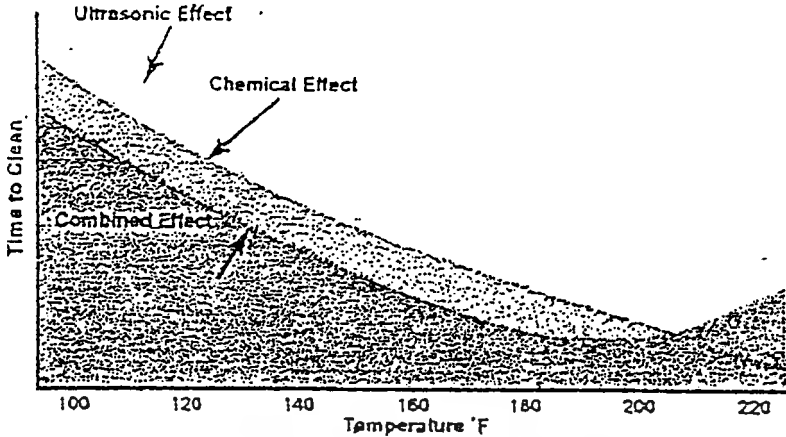
### 2.2.7.2 ความรุนแรงของกระบวนการ cavitation

ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดนั้น จะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของกระบวนการ cavitation ซึ่งการที่จะได้มาซึ่ง ความรุนแรงสูงสุดของกระบวนการ cavitation (maximizing cavitation) นั้นเราจะมีปัจจัยต่างๆที่จะต้องพิจารณาดังนี้

#### 2.2.7.2.1 อุณหภูมิ(temperature)

สารละลายแต่ละชนิดจะเกิดกระบวนการ cavitation ที่รุนแรงที่สุด(maximizing cavitation) ได้ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป เช่นน้ำบริสุทธิ์จะเกิด maximizing cavitation ที่อุณหภูมิประมาณ 160 องศาฟาเรนไฮด์

แต่ทว่าในการพิจารณาว่าเราจะใช้อุณหภูมิที่ค่าเท่าไรนั้น ต้องพิจารณาจากเงื่อนไขอื่นด้วย เช่นน้ำสะอาดมีอุณหภูมิที่ทำให้เกิด maximizing cavitation ที่ 160 องศาฟาเรนไฮด์ แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะใช้งานจะอยู่ที่ 180-190 องศาฟาเรนไฮด์ เพราะผลของปฏิกิริยาทางเคมีและกระบวนการ cavitation จะมีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.10 แสดงผลของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ

#### 2.2.7.2.2 ความหนืด (viscosity)

ความหนืด(viscosity)ของสารที่ใช้ ควรจะมีค่าให้น้อยที่สุด เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่ง maximizing cavitation เนื่องจากถ้าสารละลายมีความหนืดมาก มันจะไม่ตอบรับฟอง cavitation ได้เร็วพอ และการสั่นก็จะเกิดน้อยด้วย ซึ่งความหนืดของสารนี้ เราพบว่ามันจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

#### 2.2.7.2.3 จำนวนฟองก๊าซที่สามารถรวมกับของเหลว(dissolved gas)

สารที่นำมาใช้เป็นสารทำความสะอาด ควรจะมี dissolved gas น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อผลของประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากว่า dissolved gas นี้มันจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของกระบวนการ cavitation อีกทั้งยังไปลดความรุนแรงของปฏิกิริยา implosion

อัตราการแพร่ของ dissolved gas ในของเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าของเหลวที่อุณหภูมิสูงๆจะมี dissolved gasses น้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ

### 2.2.8 ข้อดีและข้อเสียของ ultrasonic cleaner

#### 2.2.8.1 ข้อดี(Benefit)

- ultrasonic cleaner สามารถทำการล้าง ทำความสะอาด ได้หลายระดับ
- ultrasonic cleaner สามารถทำความสะอาดด้วยประสิทธิภาพที่สูง โดยสามารถขจัดอนุภาคได้เล็กถึง 0.000005 meter
- เปรียบเทียบกับการทำงานทำความสะอาดประเภท จุ่มและชะล้าง (immerse and wash) ประเภท อื่นๆ ที่องค์ประกอบอย่างอื่นเหมือนกันแล้ว การทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.8.2 ข้อเสีย(disadvantage)

-ในการทำความสะอาดบางอย่าง เช่นการล้างคราบน้ำมัน เมื่อนำ ultrasonic cleaning ไปเปรียบเทียบกับวิธีอื่นแล้ว จะเห็นว่า ultrasonic cleaning จะมีขั้นตอนบางอย่างที่ยุ่งยากและ ไม่จำเป็น

-ลำบากและยุ่งยากในการเลือกสารที่จะนำมาใช้เป็นสารชะล้าง เนื่องจากต้องระวังไม่ให้สารที่เราเลือกเป็นสารที่จะทำอันตรายต่อชิ้นงานตลอดจนองค์ประกอบที่อยู่บนชิ้นงาน

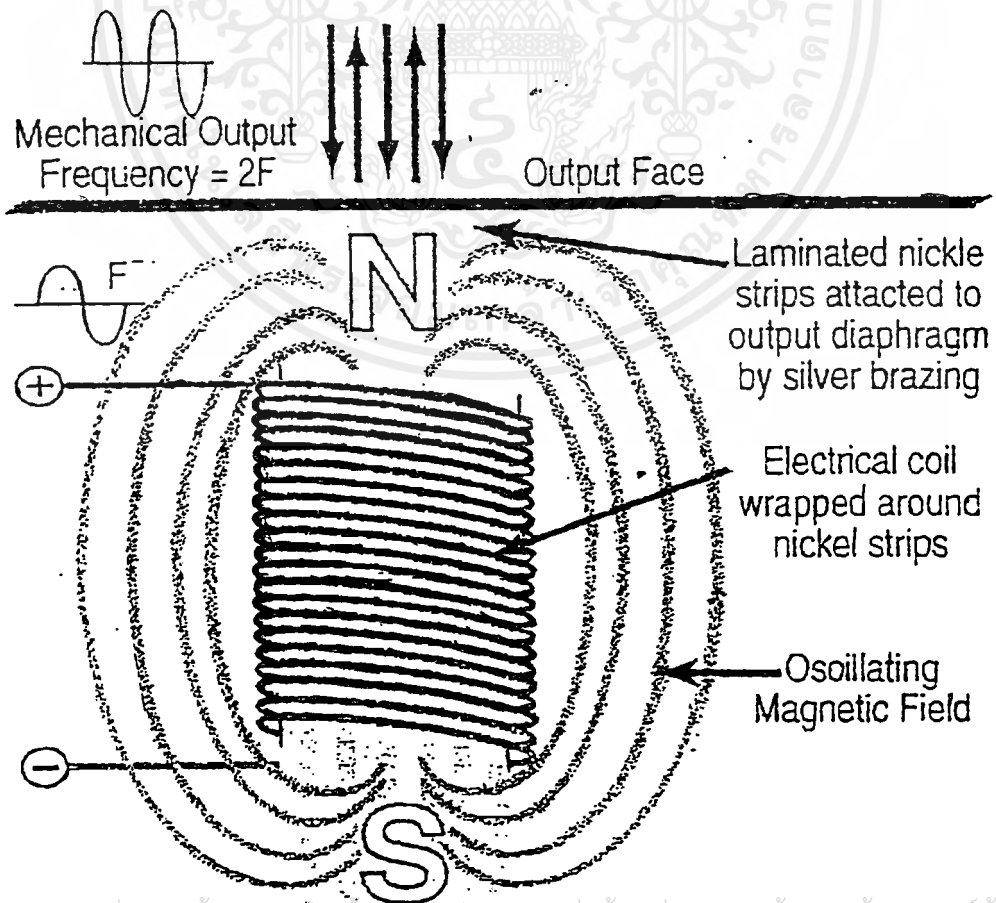
## 2.3 อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducers)

### 2.3.1 นิยาม

อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ซึ่งสามารถแปลงพลังงานกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิคกระจายไปในวัตถุตัวกลาง หรือจากพลังงานของคลื่นอุลตราโซนิค แปลงไปเป็นพลังงานกลซึ่งสามารถทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้จากตัวทรานสดิวเซอร์นั้น

ทรานสดิวเซอร์ที่ทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิคมี 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

#### 1. เมคคานิคัลทรานสดิวเซอร์ (Mechanical Transducers)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภารกิจการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 Mechanical Transducers

## 2. อิเล็กโตรเมคคานิคัลทรานสดิวเซอร์ (Electromechanical Transducers)

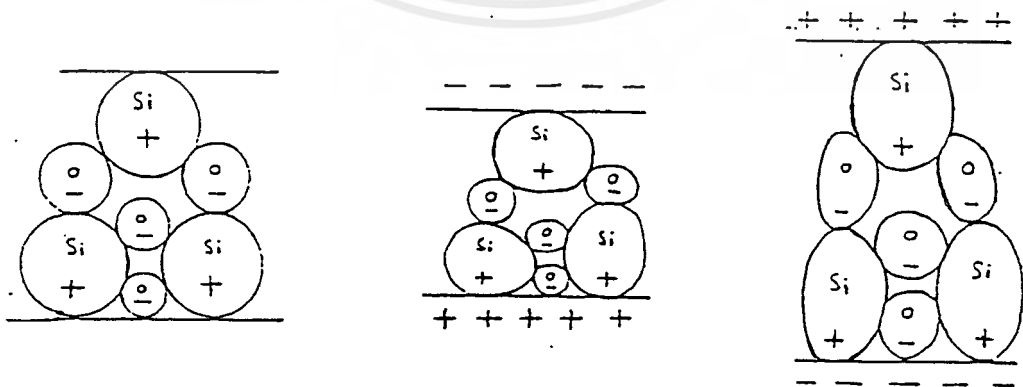
Electromechanical Transducers จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง ที่ใช้กันอยู่มี 4 ชนิด

1. แบบมูฟวี่งคอยล์ (Moving Coil)
2. แบบอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic)
3. แบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)
4. แบบเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

แบบ Moving Coil นั้นคล้ายๆกับ Moving Coil ของลำโพง มีประโยชน์มากในการเป็นตัวสั่น (Vibrator) ชนิดริบบอน (Ribbon) ทำด้วยอะลูมิเนียมบางๆ วางไว้ระหว่างขั้วทั้งสองของแม่เหล็ก มันทำตัวเสมือนเป็นขดลวดของมูฟวี่งคอยล์ ใช้ทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิค

แบบ Electrostatic ใช้หลักการที่ว่า ในระหว่าง Parallel Plate Capacitor เมื่อเราให้ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทั้งสองจะทำให้เกิดแรงขึ้น หลักรใหญ่ของมันจะใช้ทำเป็นลำโพงเสียงที่มีคุณภาพสูง แต่ก็ใช้ทำให้เกิดการสั่นแบบอุลตราโซนิคในของแข็ง

แบบ Piezoelectric และ Ferroelectric ในผลึกที่ประกอบด้วยโพล่าโมเลกุล (Polar Molecule) ซึ่งขาดจุดศูนย์กลางของความสมมาตร (Center of Symmetry) ถ้าตัดเอา Plate อันเนื่องมาจากผลึกนี้ แล้วทำให้เกิดการบิดงอ (Deform) ด้วยเครื่องมือกล จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างผิวหน้าทั้งสองของ Plate ปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่า โคเร็กเพียโซอิเล็กทริก เอฟเฟ็ค (Direct Piezoelectric Effect) ถ้าศักย์ระหว่างผิวหน้าทั้งสองของ Plate นี้เกิดบิดเบี้ยวไปได้เองเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า อินเวอร์เพียโซอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค (Inverse Piezoelectric Effect) ตัวอย่างเช่น ผลึกควอตซ์ดังรูปที่ 2.12 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ซึ่งอยู่ระหว่าง Plane ที่ขนานกัน



รูปที่ 2.12 (ก) เซลล์ที่ยังไม่ถูกแรงใดๆ (ข) เซลล์ที่ถูกอัด (ค) เซลล์ถูกยืด

รูปที่ 2.12 (ก) จะอยู่ในสภาวะปกติ จุดศูนย์กลางของประจุบวกของซิลิกอนกับประจุลบของออกซิเจนอยู่ที่เดียวกัน และจำนวนประจุไฟฟ้าทั้งสองเท่ากันจะไม่เกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้น ดังนั้นผลเนื่องจากการกระจายของประจุคกร้อมระนาบทั้งสองที่ขนานกันจึงเป็นศูนย์

รูปที่ 2.12 (ข) ถ้าเราทำให้มันเปลี่ยนรูปร่างไปจากเดิม โดยการจัดให้หดหรือดัดงอรูปที่ 2.12 (ค) จุดศูนย์กลางของประจุทั้งสองจะไม่อยู่ที่เดียวกัน ทำให้เกิดการกระจายของประจุขึ้นระหว่างระนาบทั้งสอง

การทำให้มันเปลี่ยนรูปร่างด้วยการอัดหรือหดตามรูปนั้น จะเป็นการแยกจุดศูนย์กลางผล จะทำให้เกิดประจุปรากฏบนระนาบทั้งสอง ในรูปแบบนี้เรียกว่า ไดอิเล็กทริกเฟส

สำหรับแบบอินเวอร์สเฟสไดอิเล็กทริกเฟสเฟส จะเกิดโดยให้สนามไฟฟ้าระหว่าง Plate ทั้งสอง ทำให้จุดศูนย์กลางของประจุทั้งสองเคลื่อนออกจากกันในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้เซลดเคลื่อนไปถ้ามีแผ่น ควอตซ์ซึ่งตัดมาจากผลึกควอตซ์ ในทิศทางที่จะทำให้เกิดสันสะท้อนขนานกับสนามไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อเราให้สนามไฟฟ้าสลับ Plate นี้จะขยายและหดตัวด้วยความถี่เดียวกันกับสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเหมือนกับลูกสูบ ดังนั้นมันจะเป็นตัวกำเนิดคลื่นเสียงได้

ปัจจุบันมีสารไม่กี่ชนิดที่จะให้ปรากฏการณ์เฟสไดอิเล็กทริก สารไดอิเล็กทริกทุกชนิดเป็นสารอิเล็กโทรสแตติก แต่ปกติแล้วผลนี้จะน้อยมาก แต่สารที่ให้ผลอย่างมากได้แก่ สารไททานเทท (Titanates) ซีคอนเทท (Zirconates) และไนกรีนิเช่นนี้เราเรียกว่า มันเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ปกติสารเหล่านี้จะอยู่ในรูปของส่วนผสมเซรามิก ซึ่งประกอบไปด้วยโดเมน (Domain) ที่มีขั้วอิสระรวมตัวกันมากๆ ถ้าเรานำสารแบบนี้มาสักหนึ่งชนิด เอาไปเผาให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเคอริก (Curie Temperature) ของมัน แล้วทำให้เย็นภายใต้สนามไฟฟ้าสูงๆ ทิศทางของขั้วของโดเมนต่างๆ จะวางตัวไปแนวเดียวกับสนามและจะยังคงอยู่ต่อไปเช่นนั้น แม้ว่าเราจะเอาสนามไฟฟ้าออกไปมันแสดงว่ามันแสดงคุณสมบัติ เช่น Permanent Electric บางทีมันจะเป็นสารเฟสไดอิเล็กทริก ถ้าหากว่ามันประพฤติตัวไปตามสมการของเฟสไดอิเล็กทริก

### 2.3.2 คุณสมบัติทั่วไปของทรานสดีวเซอร์

ทรานสดีวเซอร์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมจะมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีเฟสไดอิเล็กทริกเฟสเฟส และที่ใช้กันมากคือ ผลึกแร่ควอตซ์ (Quartz), แบเรียมไททานเทท (Barium titanate) และลีดซีคอนเทท (Lead zirconate titanate) สารเหล่านี้เมื่อนำมาทำทรานสดีวเซอร์ ยังแสดงคุณสมบัติเป็นคาปาซิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วย ค่าคาปาซิแตนซ์เป็นไมโครฟารัดจะได้สัดส่วนกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant,  $K$ ) ของวัสดุคูณด้วยพื้นที่ และหารด้วยความหนาโครงสร้างของทรานสดีวเซอร์มีความคล้ายคาปาซิเตอร์ที่ Electrode ที่อยู่สองข้างถูกแยกโดยช่องที่มีสารเซรามิกจากตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติบางประการของสารเซรามิกได้รับความร้อน จะทำให้ไดโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( dipole ) เคลื่อนไหวได้โดยเสรีและที่จุดนี้เมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้าเข้าไป ก็จะมีการจัดเรียงตัวและมีคุณสมบัติเปียโซอิเล็กทริก ถ้าภายหลังเซรามิกที่มีคุณสมบัตินี้ถูกเผาให้ร้อนถึงอุณหภูมิดังกล่าวอีก คุณสมบัติเปียโซอิเล็กทริกจะหมดไป ดังนั้นความร้อนจะสามารถทำลาย ทรานสดิวเซอร์ได้ โดยเฉพาะถ้าอุณหภูมิสูงเกินเคอริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่แสดงว่าทรานสดิวเซอร์ต้องการพลังงานไฟฟ้าเท่าใด จึงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ ทั้งแบบเหลี่ยมคี่ด้านเท่า และ สี่เหลี่ยมคี่ด้านเท่า มีประสิทธิภาพมากกว่าผลึกแร่ควอทซ์ 5-6 เท่า เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำมากและมีค่าคงที่ ( Coupling constant ) ต่ำมาก จึงไม่ค่อยได้นำควอทซ์มาใช้ในเครื่องอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน

2.3.3 คุณสมบัติทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์

ความถี่ของทรานสดิวเซอร์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเชิงกลและลักษณะทางรูปร่าง ตัวอย่างเช่นเซรามิกแท่งเหลี่ยมแบนจะมีความถี่เรโซแนนซ์ได้ 3 อย่าง คือ มีความยืดหดตามความหนา และรัศมี อย่างไรก็ตาม เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปก็สามารถทำให้ทรานสดิวเซอร์ยืดหดในแนวไหนก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้วไฟฟ้าที่ใช้ บริษัทที่ทำทรานสดิวเซอร์จะกำหนดความถี่ที่ต้องการสำหรับแต่ละแบบของการยืดหด

$$\text{Resonant frequency} = \frac{\text{constant}}{\text{thickness(inch)}}$$

Material	Curic Temperature	Q	Dielectric Constant ( K )	Coupling Coefficient ( K )
Quartz	550 ° C	Very high	4.5	0.09
Barium Titanate	100 ° C	400 - 700	1700	0.38
Lead Circonate Titanate	300 ° C	90 - 500	1450	0.51

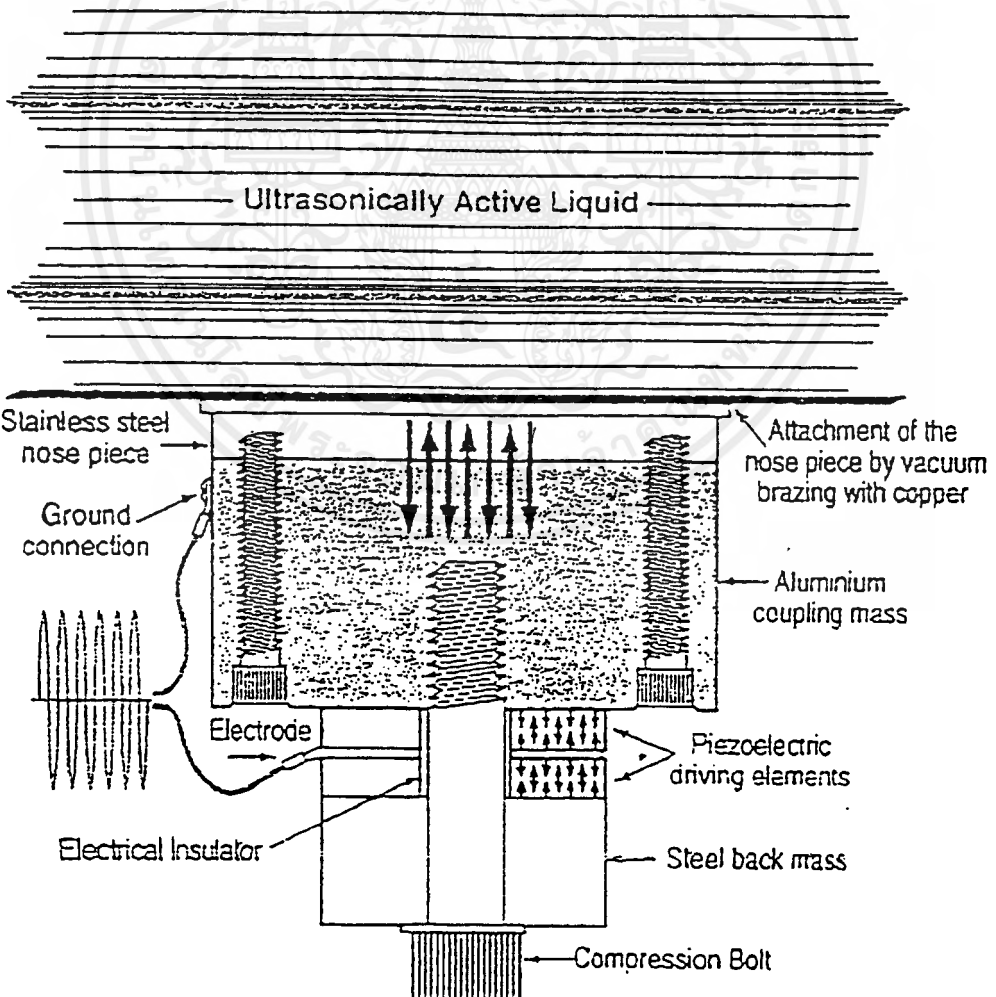
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติบางอย่างของสารเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 เปียโซทรานสดิวเซอร์ (Piezo Transducer)

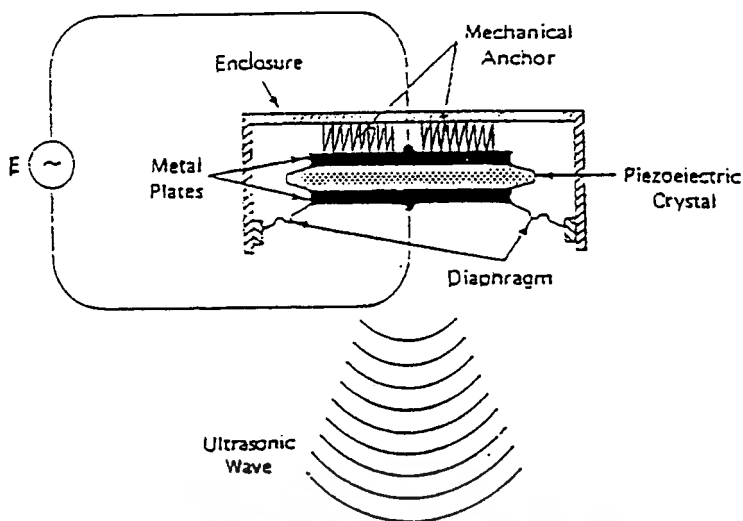
โครงสร้างภายในจะประกอบด้วย ชิ้นสารเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric element) ซึ่งสามารถทำได้จากสารหลายชนิด เช่น ผลึกแควอทซ์ (Quartz), แบเรียมติทานเนท (Barium titanate), เกลือร์อ็อคเซล (Rochelle salt) ฯลฯ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือชิ้นสารเปียโซอิเล็กทริกที่ทำมาจากแบเรียมติทานเนท ซึ่งได้จากการผสมสารติทานเนียมกับแบเรียมคาบอเนท ที่อุณหภูมิประมาณ  $1300 - 1400^{\circ}\text{C}$  และผลิดออกมาในรูปของชิ้นสารเซรามิกซึ่งจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยส่วนใหญ่

จากชิ้นเซรามิกนี้จะถูกประกบด้วยแผ่นเพลท 2 แผ่น ซึ่งส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นเงิน เพื่อต่อเป็นขาของอิเล็กทรอนิกส์ ด้านข้างหนึ่งของแผ่นเพลทจะถูกยึดเพื่อไม่ให้เกิดการสั่น ส่วนอีกด้านจะยึดกับแผ่นโคอะแฟรมซึ่งสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้ โดยแผ่นโคอะแฟรมนี้จะถูกสร้างให้มีลักษณะคล้ายเลนส์ เพื่อรวมคลื่นให้มีความเร็วสูงขึ้น



รูปที่ 2.14 เปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)

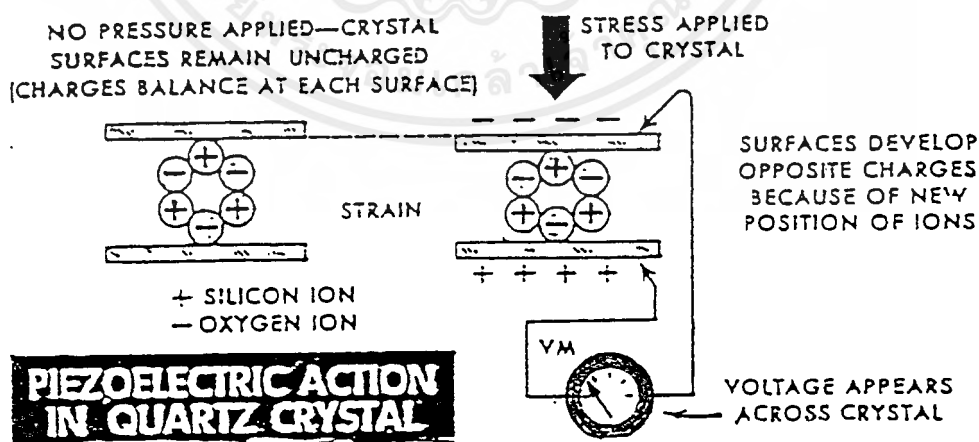
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในต่างๆ ไปของทรานสดิวเซอร์

2.3.5 เปียโซอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค

ปรากฏการณ์แบบเปียโซอิเล็กทริก สามารถอธิบายได้คือ เมื่อสภาวะปกติยังไม่มี ความดัน หรือคลื่นมาตกกระทบกับชิ้นสารเซรามิก ประจุไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายในชิ้นสารจะเกิดการสมดุล ทำให้แผ่นเพลทเงินที่ประกบอยู่มีศักย์ไฟฟ้าที่เท่าๆกัน ซึ่งผลรวมของประจุไฟฟ้าบนแผ่นเพลทมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อมีความดันหรือคลื่นเสียงมาตกกระทบชิ้นสารเซรามิก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นสารคือ เกิดมีประจุตรงข้ามขึ้นบนแผ่นเพลทที่ประกบชิ้นสารเซรามิกอยู่ ซึ่งผลของประจุไฟฟ้าตรงข้ามนี้ทำให้เกิดเป็นแรงดันตกคร่อมแผ่นเพลททั้งสอง ขนาดของแรงดันตกคร่อมนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของความดันหรือคลื่นที่มาตกกระทบชิ้นสารเซรามิกที่โค้งงอไปมา



รูปที่ 2.16 แสดงปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก โดยอธิบายในลักษณะที่ชิ้นสารทำจาก แร่ควอตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

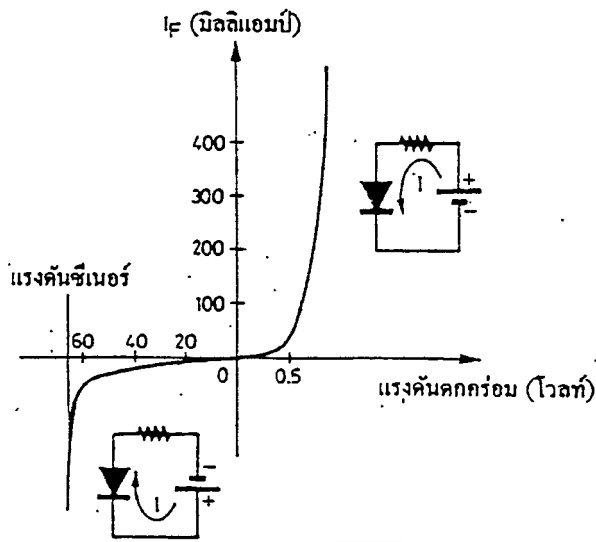
ทรานซิสเตอร์แบบบีโวลต์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างพลังงานกลกับพลังงานไฟฟ้า ในกรณีการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล คือ ตัวส่งคลื่นอุลตราโซนิกซึ่งการทำงานคือ เมื่อเราป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งอาจมีความถี่ในช่วง 20 – 100 kHz แรงดันที่ป้อนนี้จะทำให้ชั้นสารเซรามิกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยที่ด้านหนึ่งของชั้นสารเซรามิกจะถูกกดกับแผ่นไดอะแฟรม เมื่อชั้นสารเซรามิกเกิดการบิดตัวไปมาจะทำให้แผ่นไดอะแฟรมนี้อัดกับอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นความถี่เดียวกับสัญญาณที่ป้อนเข้า ซึ่งคลื่นที่ผลิตได้จะมีกำลังเอาต์พุตสูงสุดเมื่อความถี่ที่ป้อนเข้ามาตรงกับความถี่เรโซแนนท์ ซึ่งเป็นความถี่ทางกลตามธรรมชาติของชั้นสารเซรามิกชั้นนั้น ส่วนความถี่อื่นๆนอกเหนือจากนี้จะทำให้มีค่าลดลงกว่าความถี่เรโซแนนท์มาก

ในทางกลับกันการเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า คือ ตัวรับคลื่นอุลตราโซนิก เราสามารถที่จะมองได้ว่าเป็นแหล่งจ่ายหนึ่งๆ เพราะมันไม่ต้องการแหล่งจ่ายอื่นๆมาป้อนก็สามารถสร้างแรงดันออกมาได้ เพียงแต่มีขนาดแรงดันไม่สูงมากนัก โดยการทำงานของตัวรับคลื่นเกิดจาก เมื่อมีความดันมาตกกระทบแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งค่าความถี่ของคลื่นทำให้ชั้นสารเซรามิกถูกบีบไปมา ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์บีโวลต์อิเล็กทรอนิกส์บนชั้นสาร ทำให้สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เดียวกับคลื่นที่มาตกกระทบได้

## 2.4 ไดโอด , ซีเนอร์ไดโอด และ เพาเวอร์มอสเฟต

### 2.4.1 ไดโอด ( Diode )

ไดโอดเป็นอุปกรณ์พื้นฐานอย่างหนึ่งที่แพร่หลายในหมู่ผู้ออกแบบหรือผู้เกี่ยวข้องกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเป็นตัวนำกระแสได้ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง หรือกล่าวอย่างง่าย ๆ ว่าไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่ยอมให้กระแสไหลผ่านตัวมันเองได้ทิศทางเดียวเท่านั้น แต่อย่างไรก็ดี ในขณะที่ไดโอดนำกระแสจะมีค่าแรงดันตกคร่อมมันข้างหนึ่ง โดยทั่วไปสำหรับไดโอดซิลิกอน จะมีค่าอยู่ราว 0.7 โวลต์ เมื่อเป็นเช่นนี้ลักษณะสมบัติทั่วไปของไดโอดแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.17 ลักษณะสมบัติทั่วไปของไดโอด

โดยปกติการให้แรงดันกับไดโอดนั้น ถ้าให้แรงดันบวกอยู่ที่ขั้วอโนด และขั้วลบอยู่ที่ขั้วคาโทดซึ่งเราเรียกว่าการไบอัสตรง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอดได้และถ้าเราให้แรงดันกลับทิศกัน กระแสจะไหลไม่ได้ซึ่งเราเรียกว่าการไบอัสกลับ และถ้าให้แรงดันไบอัสกลับมากขึ้นๆมันจะนำกระแสได้ใหม่ จุดที่มันนำกระแสได้ใหม่นี้เราเรียกว่า แรงดันซีเนอร์

ขนาดของไดโอดแปรไปได้มากโดยมีไดโอดขนาดเล็กเพียงทนกระแสได้เป็นมิลลิแอมป์ จนถึงไดโอดที่ทนกระแสได้เป็นหลายร้อยแอมแปร์ที่ใช้ในงานทางด้านไฟฟ้ากำลังรูปร่างไดโอดแบบต่างๆแสดงให้เห็นดังรูป

จากลักษณะการทำงานของไดโอดในการเป็นสวิตช์ให้นำกระแสได้ด้านเดียว การใช้งานของไดโอดจึงต้องพิจารณาถึงสิ่งต่างๆเหล่านี้

- แรงดันตกคร่อมไดโอด แรงดันตกคร่อมไดโอดจะพิจารณากันในขณะที่ไดโอดนำกระแสไดโอดที่ใช้สารซิลิกอนจะมีค่าตกคร่อมโดยประมาณ 0.7 โวลต์ แต่ถ้าให้กระแสไหลมากขึ้นแรงดันตกคร่อมอาจมากขึ้นเป็น 1 โวลต์ก็ได้
- แรงดันซีเนอร์ หรือแรงดันพัง จะเป็นตัวบอกขนาดของแรงดันที่นำไปใช้ได้ ซึ่งถ้าเราไบอัสกลับด้วยค่าแรงดันนี้จะมีกระแสไหลกลับทางได้ และหากไม่มีการจำกัดกระแสไดโอดก็จะเสียหายได้ แต่ถ้ามีการจำกัดกระแสแรงดันตกคร่อมก็จะมีค่าเท่าแรงดันซีเนอร์ ทำให้เราเอาคุณสมบัติเหล่านี้ไปใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันได้
- กระแสใช้งานสูงสุด ในขณะที่ป้อนไบอัสตรงทำให้ไดโอดนำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านไดโอด กระแสส่วนนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นถ้าหากทำให้กระแสส่วนนี้มากๆเกินกว่าที่ไดโอดจะทนได้ ไดโอดก็จะเสียหายได้ ความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวไดโอดจะสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆดังนั้นในกรณีที่ใช้ไดโอดที่กระแสสูงจะต้องมีการระบายความร้อนด้วยแผ่นระบายความร้อนให้กับไดโอด

- ง. กระแสรั่วไหลขณะไบอัสกลับ เนื่องจากการทำงานของไดโอดมีลักษณะคล้าย สวิตช์และถ้าจะเหมือนสวิตช์ยิ่งขึ้น จะต้องใช้คุณสมบัติขณะไบอัสกลับให้มีกระแส ไหลน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติแล้วจะมีกระแสไหลได้นิดหน่อย กระแสส่วนนี้อาจมี ค่าอยู่ในช่วงของไมโครแอมแปร์ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสขณะไบอัสตรง

#### 2.4.2 ซีเนอร์ไดโอด (ZENER DIODES)

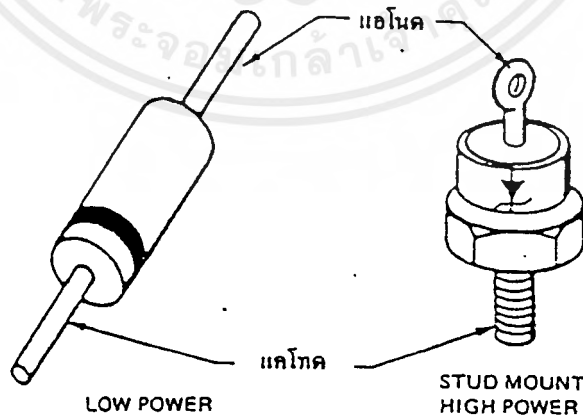
##### คุณสมบัติซีเนอร์ไดโอด

จากการที่มีการป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้ารีเวิร์คไบอัสให้กับ ไดโอดสูงเกินไปจะทำให้มีกระแส ไฟฟ้ารีเวิร์คสูง ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนเกินพิกัดของไดโอด ทำให้ไดโอดพังทลายได้ และแรง เคลื่อนไฟฟ้ารีเวิร์คที่จ่ายให้กับไดโอด แล้วทำให้ไดโอดพังทลายเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเบรค ดาวน์ (Break down voltage) หรือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด (Peak reverse voltage)

ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) เป็นไดโอดชนิดพิเศษ ซึ่งจะต่อใช้งานในแบบรีเวิร์คไบ อัส ซึ่งมักจะจะถูกออกแบบให้ทำงานที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงเกินกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์

เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้ารีเวิร์ค ไบอัสจ่ายให้ซีเนอร์ไดโอดสูงพอที่จะทำให้เกิดเบรคดาวน์ขึ้น จึงทำให้มีกระแสไฟฟ้ารีเวิร์ค ( $I_2$ ) ไหลสูง เพราะค่าความต้านทานของซีเนอร์ไดโอดลดลง

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเบรคดาวน์ ( $E_2$ ) ถูกหาได้โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานภายในของ ไดโอด ซึ่งค่าความต้านทานภายในของไดโอดจะถูกควบคุมได้ในขั้นตอนการสร้าง และความ สามารถในการกระจายกำลังไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดจะลดลงขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นค่าพิกัด การกระจายกำลังไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดแต่ละตัว จะถูกกำหนดให้ใช้ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง เท่านั้น



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างภายนอกของซีเนอร์ไดโอด

โครงสร้างภายนอกของซีเนอร์ไดโอดจะเหมือนกับ พี-เอ็น จังก์ชันไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งกำเนิดซีเนอร์ไดโอดแบบกำลังไฟฟ้าต่ำ ตัวถังมันจะทำด้วยแก้วหรืออีพอกซี และถ้าเป็นซีเนอร์ไดโอดแบบกำลังไฟฟ้าสูง ตัวถังมันจะทำด้วยโลหะและมีลักษณะการติดตั้งเป็นแบบนี้

และสำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้แทนซีเนอร์ไดโอดแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงสัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด

ค่าพิคคของซีเนอร์ไดโอด

ค่ากระแสไฟฟ้าซีเนอร์ไดโอด ( $I_{ZM}$ ) คือค่ากระแสไฟฟ้ารีเวิร์คสูงสุดที่สามารถไหลในซีเนอร์ไดโอด โดยที่จะไม่เกินพิคคของการกระจายกำลังไฟฟ้าที่ถูกกำหนดไว้ในซีเนอร์ไดโอดแต่ละตัว

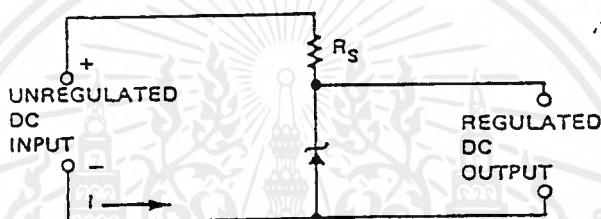
ค่ากระแสไฟฟ้ารีเวิร์ค ( $I_r$ ) จะแสดงกระแสไฟฟ้ารั่วไหลก่อนเกิดเบรคดาวน์ ซึ่งมันจะถูกกำหนดที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ารีเวิร์ค ( $E_z$ ) ถูกจ่ายอยู่ โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ารีเวิร์คจะมีค่าประมาณ 80% ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าซีเนอร์ ( $E_z$ )

ถ้าซีเนอร์ไดโอดมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ 5 โวลต์หรือมากกว่า มันจะมีสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิเป็นแบบบวก (Positive zener voltage-temperature coefficient) ซึ่งจะมีความหมายว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเบรคดาวน์ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

การชดเชยทางอุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอด (temperature-compensated zener diode) จะทำได้โดยการต่อซีเนอร์ไดโอดอนุกรมกับ พี-เอ็น จังก์ชัน โดยที่ พี-เอ็น จังก์ชันไดโอดจะเป็นฟอร์เวิร์คไบอัส และซีเนอร์ไดโอดจะเป็นรีเวิร์คไบอัส และควรระมัดระวังในการเลือกไดโอด โดยอาจจะเลือกไดโอดที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเดียวกันหรือตรงข้ามกัน

### การทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ด้วยซีเนอร์ไดโอด

จากรูปที่ 2.20 จะแสดงวงจรเรกกูเลเตอร์ด้วยซีเนอร์ไดโอด จากในรูปซีเนอร์ไดโอดจะถูกต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน ( $R_s$ ) ซึ่งทำหน้าที่จำกัดกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอต่อการทำงานของซีเนอร์ไดโอด และแรงเคลื่อนไฟฟ้า DC อินพุต จะต้องสูงกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเบรคดาวน์ของซีเนอร์ไดโอด

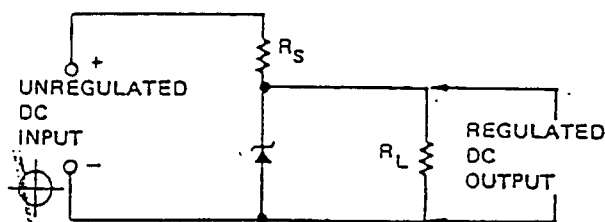


รูปที่ 2.20 แสดงวงจรเรกกูเลเตอร์ด้วยซีเนอร์ไดโอด

และสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด จะเท่ากับค่าพิคคแรงเคลื่อนของซีเนอร์ไดโอด ซึ่งซีเนอร์ไดโอดถูกสร้างให้มีพิคคแรงเคลื่อนไฟฟ้าเบรคดาวน์ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น ซึ่งค่านี้จะเรียกว่าค่าพิคคแรงเคลื่อนไฟฟ้าซีเนอร์ของไดโอด ( $V_z$ ) และค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานจะทำกับผลต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าซีเนอร์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุต

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุตเพิ่มขึ้นหรือลดลง จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุต แต่แรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุตต้องไม่น้อยกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของซีเนอร์

เมื่อต่อโหลดตัวต้านทานเข้าไปในวงจรเรกกูเลเตอร์ ดังแสดงในรูป 2.21 จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลด ( $I_L$ ) โดยจะหาได้จากค่าโหลด ความต้านทานโหลด และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุต และสำหรับกระแสไฟฟ้าซีเนอร์จะไหลผ่านตัวต้านทานอนุกรมของวงจรเรกกูเลเตอร์ ซึ่งตัวต้านทานอนุกรมนี้ จะต้องถูกเลือกเพื่อว่ามีกระแสไฟฟ้าซีเนอร์พอเพียงต่อการเกิดเบรคดาวน์ของซีเนอร์ไดโอด เพื่อให้มีกระแสไหลผ่านตัวมัน



รูปที่ 2.21 แสดงวงจรเรกกูเลเตอร์เมื่อต่อโหลด

เมื่อโหลดมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น จะทำให้กระแสไฟฟ้าของโหลดลดลง ดังนั้นแรงเคลื่อนตกคร่อมโหลดควรจะเพิ่ม แต่ซีเนอร์ไดโอดจะไม่ขจัดขวางให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง โดยมันจะนำกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพื่อให้ผลรวมของกระแสซีเนอร์ กับกระแสโหลดที่ผ่านตัวต้านทานอนุกรมยังคงเท่าเดิม ซึ่งก็จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานอนุกรมเท่าเดิม

ในการทำงานเดียวกันเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้น กระแสซีเนอร์ก็จะลดลงและแรงเคลื่อนไฟฟ้ายังคงที่เหมือนเดิม

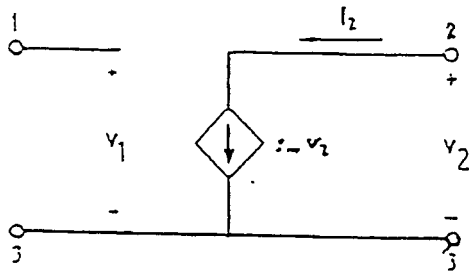
### 2.4.3 เพาเวอร์มอสเฟต

#### 1. นิยามและความหมาย

มอสเฟต ( MOSFET ) ซ่อมมาจาก Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transister โดยมอสเฟตเป็นอุปกรณ์ประเภทควบคุมแหล่งจ่ายด้วยแรงดัน ( Voltage controlled source ) ซึ่งสามารถเขียนวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 1. และมีความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$I_2 = g_m * v_1 \quad (2-1)$$

โดยที่  $g_m$  คือ ค่าความจุถ่ายโอน ( Transconductor ) หรือ Mutual conductance

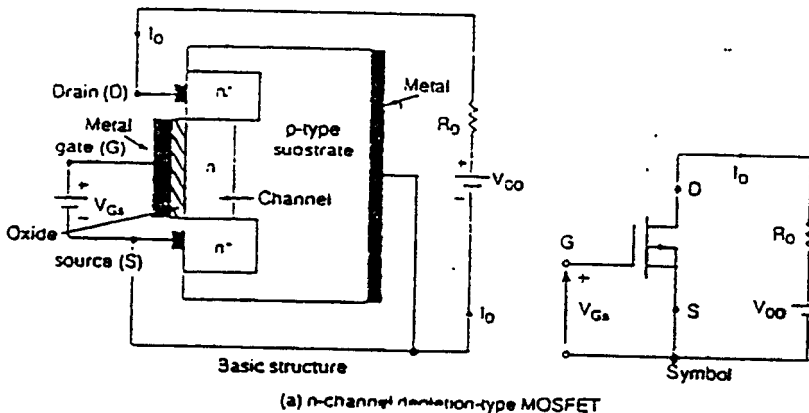
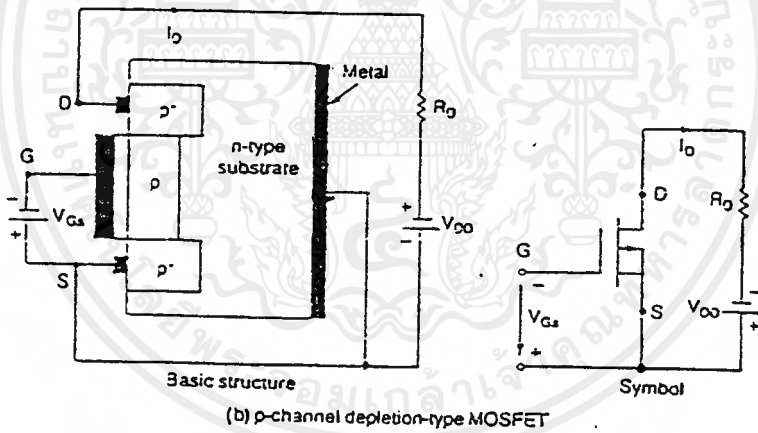


รูปที่ 2.22 วงจรเทียบเคียง หรือ อุปกรณ์ประกอบการควบคุมแหล่งจ่ายด้วยแรงดัน

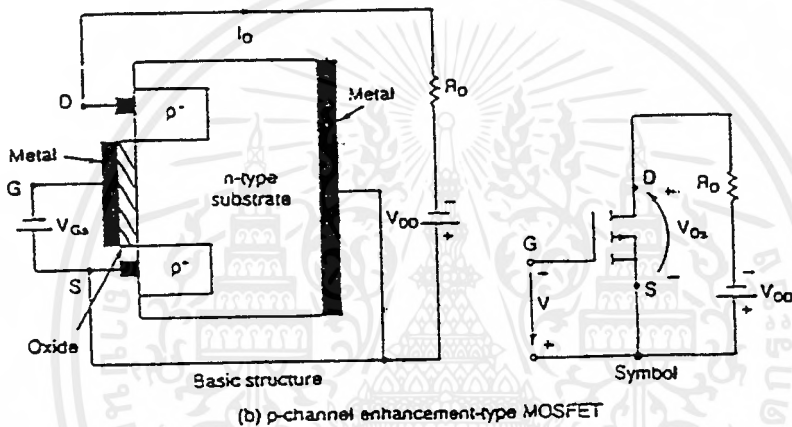
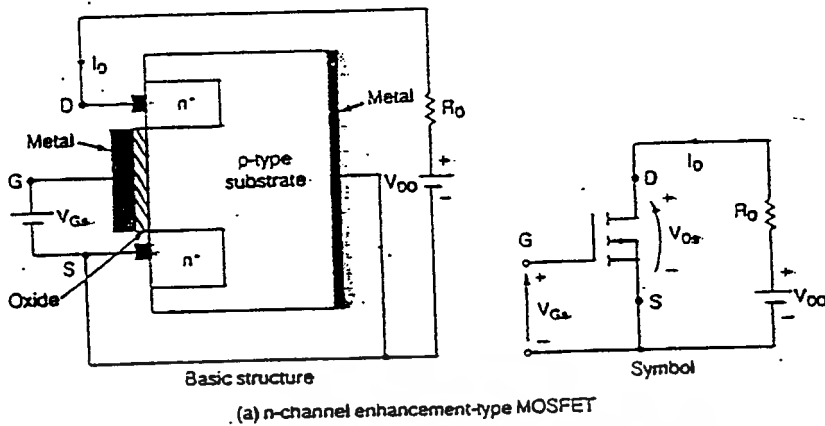
มอสเฟตแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ มอสเฟตแบบดีพลีชัน ( Depletion MOSFET ) และ มอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ ( Enhancement MOSFET ) แต่ละชนิดแบ่งได้เป็น พีมอส ( PMOS ) และ เอ็นมอส ( NMOS ) ซึ่งจะกล่าวถึงส่วนประกอบดังในรูปที่ 2.23 พิจารณาตามรูปที่ 2.23 จะมีสารเอ็นอยู่ 2 บริเวณที่มาต่อเป็นขาท ( Gate ) วางอยู่ในแท่ง ที่ต่อออกเป็นขาเดรน ( Drain ) และ ขอส ( Source ) ส่วนช่องว่างระหว่างสารเอ็นเรียกว่า แชนแนล ( Channel ) จะถูกเคลือบด้วยแผ่นบางๆ ของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

( Silicon dioxide layer ) และเกตจะสร้างโดยชั้นโลหะวางบนชั้นของออกไซด์ ( Oxide ) ดังนั้นลักษณะภายนอกของมอสเฟตจึงมีสามขา คือ เกต , เดรน , ขอส และเขียนสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่

2.24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)

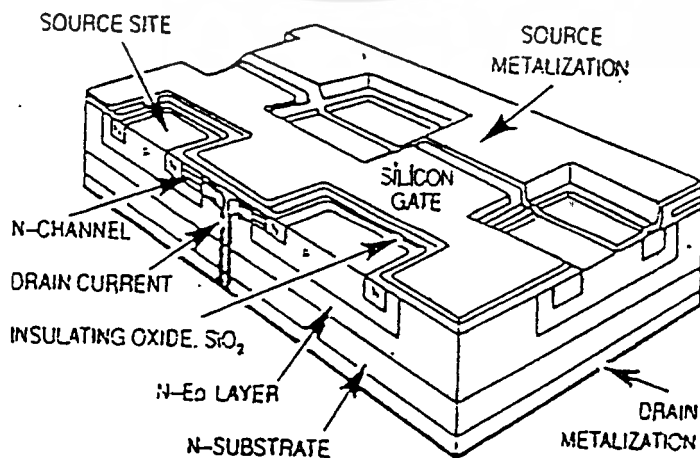
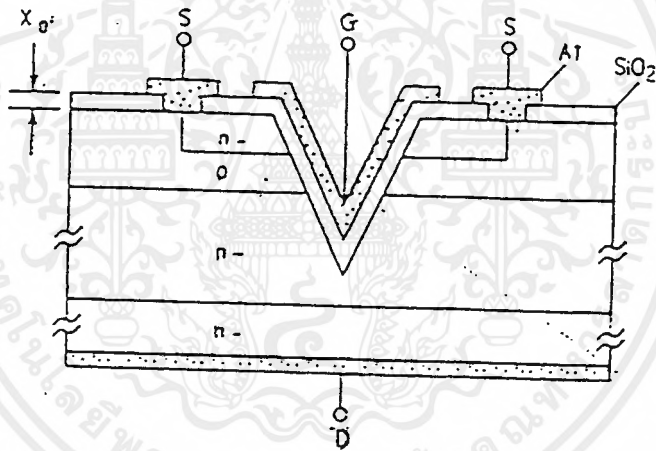
รูปที่ 2.23 (ก) ลักษณะโครงสร้างของมอสเฟตแบบ ดีพีเอ็นทั้งแบบเอ็นและแบบพี  
(ข) ลักษณะโครงสร้างของมอสเฟตแบบอนฮานซ์เมนต์ทั้งแบบเอ็นและแบบพี

## 2. โครงสร้าง

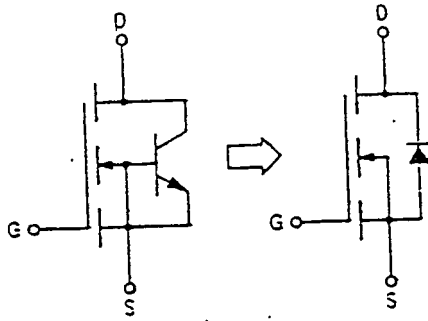
เพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะเป็นแบบเอ็นแชนแนลที่ทำงานในโหมดอนฮานซ์เมนต์ ซึ่งมีโครงสร้างและสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.24 (ก) และ 2.24 (ข) เพาเวอร์มอสเฟตแต่ละตัวจะประกอบไปด้วย มอสเฟตขนาดเล็กนับพันตัว ซึ่งอยู่บนชิปเดียวกันต่อขนานกัน โดยที่กระแสในทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กแต่ละตัวมีทิศทางการไหลในแนวตั้งของเพาเวอร์มอสเฟตจะมี N<sup>-</sup> type epitaxial layer บางๆคั่นอยู่ข้างบน ในการทำมอสเฟตแต่ละตัวจะมีการกระจายของ P และ N<sup>+</sup> region ลงบน N<sup>-</sup> type epitaxial layer จากนั้นจะเป็นการทำทกกับ epitaxial layer ภายใต้อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับครนของมอสเฟตนั้นทำได้โดยการฉาบอะลูมิเนียมที่  $N^+$  และ  $N^-$  ส่วน  
 ซอสจะทำได้โดยการฉาบอะลูมิเนียมลงบนชั้นของ P และ  $N^+$  ได้จากการแพร่กระจาย ( Diffuse )  
 จากลักษณะการทำซอสดังกล่าว ทำให้เกิดเป็นไดโอดที่อยู่กับซอสและคาโทด คือชั้น  $N^+$  และ  
 $N^-$  ต่ออยู่กับครนดังแสดงในรูปสัญลักษณ์ของมอสเฟต ในรูปที่ 2.24 ( ข ) ในสภาวะปกติถ้าเรา  
 ให้แรงดันของครนเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอสแล้วมอสเฟตจะไม่สามารถนำกระแสได้เนื่องจากชั้น  
 $N^-$  และ P จะถูกไบแอสกลับแต่ถ้าเราใส่แรงดันบวกระหว่างเกทกับซอส แรงดันบวกจะทำให้เกิด  
 อิเล็กตรอนมาออกันที่ชั้น P ภายใต้อุณหภูมิเป็นเอ็นแชนแนล เชื่อมระหว่างชั้น  $N^+$  และ  $N^-$  เกิดเป็น  
 กระแสที่เกิดจากครนไปยังซอส เนื่องจากการนำกระแสของมอสเฟตชนิดนี้เกิดจากการไหลของ  
 อิเล็กตรอนผ่านเอ็นแชนแนล ที่ทำงานในมอสเฟตโหมคเอนฮานซ์เมนต์ ตัวเล็ก ๆ แต่ละตัวสามารถ  
 ทำงานได้อย่างอิสระ แต่มอสเฟตเหล่านี้จะถูกต่อขนานกันโดยการฉาบอะลูมิเนียมที่ซอส



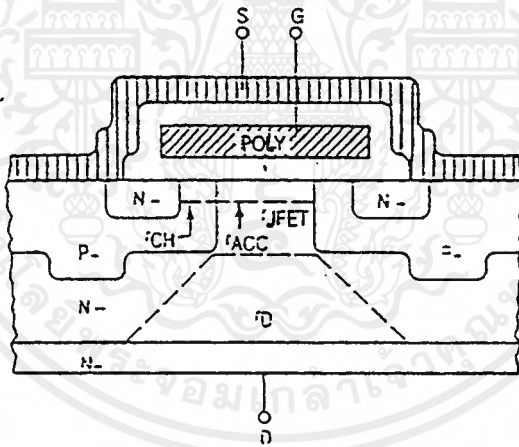
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต

### 3. การทำงานของมอสเฟต

เมื่อป้อนแรงดันให้มีศักดาไฟฟ้าที่เหมาะสม Polysilicon gate จะเหนี่ยวนำชั้นตรงกันข้ามของ diffuse channel region ซึ่งแสดงโดย  $r_{ch}$  ในรูปที่ 2.25 จะทำให้กระแสไหลจากเดรนไปยังซอสสำหรับแรงดันค่าน้อยๆที่ป้อนให้เดรนและซอส กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นอย่างถีนีร์เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น กระแสเดรนจะอิ่มตัวเป็นสัดส่วนกำลังสองของแรงดันเกตกับซอส ( $V_{GS}$ )

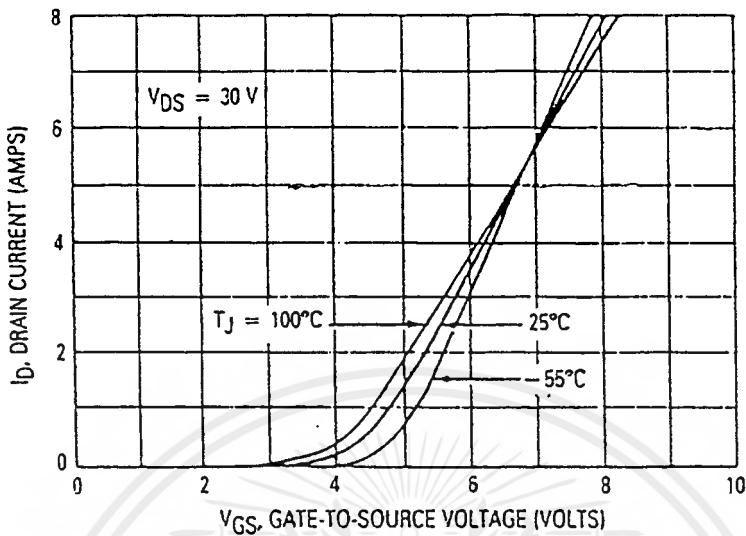


รูปที่ 2.25 แสดงการทำงานของมอสเฟต

### 4. พารามิเตอร์เทอเวอร์มอสเฟต

ค่าความจุไอออนย้าย เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอสเฟตเมื่อทำงานในสภาวะ แอคทีฟ ( Active ) โดยนิยามว่าเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันของกระแสเกต ( $g_m = dI_D / dV_{GS}$ ) ค่าความนำไอออนย้ายจะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

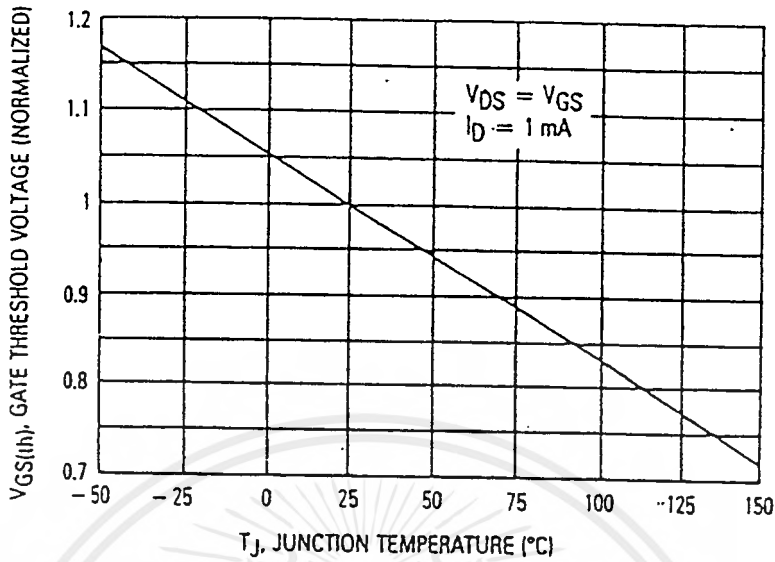


รูปที่ 2.26 คุณลักษณะการ โอนย้ายของมอสเฟตเบอร์ MTP 5N40

สำหรับการทำงานเป็นสวิตช์ซึ่งจะทำงานระหว่างสภาวะเปิด (on) และปิด (off) ค่าความนำตอนเปิดจะไม่ถูกนำมาใช้เนื่องจากมอสเฟตนำกระแสเต็มที่ทำงานอยู่ในช่วงโอห์มมิก (ohmic region) เมื่อแรงดันเกตมีค่าสูงในช่วงการทำงานนี้ การเพิ่มแรงดันเกตจะมีผลน้อยมากต่อกระแสเดรน ดังนั้น  $g_m$  จึงค่ามีใกล้ศูนย์

#### 5. แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage, $V_{GH(th)}$ )

แรงดันขีดเริ่ม คือแรงดันเกตต่ำสุดที่ทำให้กระแสเดรนเริ่มไหล โดยทั่วไปจะกำหนดค่าของแรงดันขีดเริ่ม ที่ 1A ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบสามารถควบคุมค่าของแรงดันขีดเริ่มมีค่าต่ำทำให้ความเร็วในการสวิตช์สูงขึ้นเพราะว่ากระแสน้อยๆ เพื่อประจุ (charge) ให้ตัวเก็บประจุแผ่นด้านอินพุต แต่ถ้าแรงดันขีดเริ่ม มีค่าต่ำเกินไปทำให้เกิดสัญญาณรบกวน สามารถจุดมอสเฟตได้เช่นเดียวกับแรงดันทรานเซียนท์ (Transient Voltage) สามารถส่งผ่าน (Couple) ไปยังเกตได้ซึ่งสามารถทำให้มอสเฟตนำกระแสได้เอง แรงดันขีดเริ่มต้นจะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของรอยต่อ (Junction temperature) จากรูปที่ 2.27 จะพบว่ามอสเฟตมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ (Negative temperature coefficient)

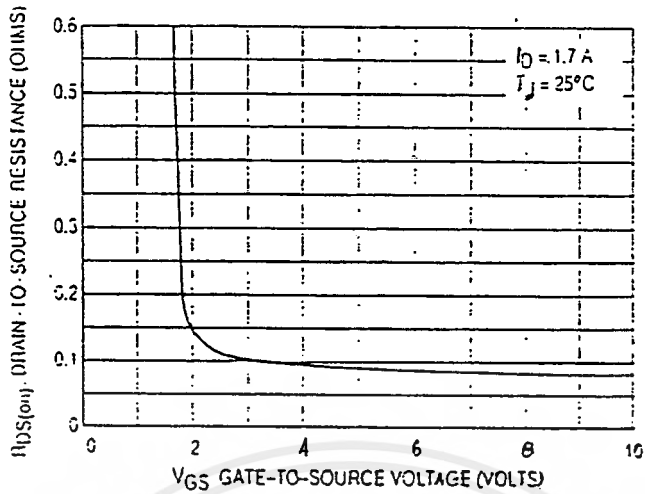


รูปที่ 2.27 แรงดันขีดเริ่มแปรไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

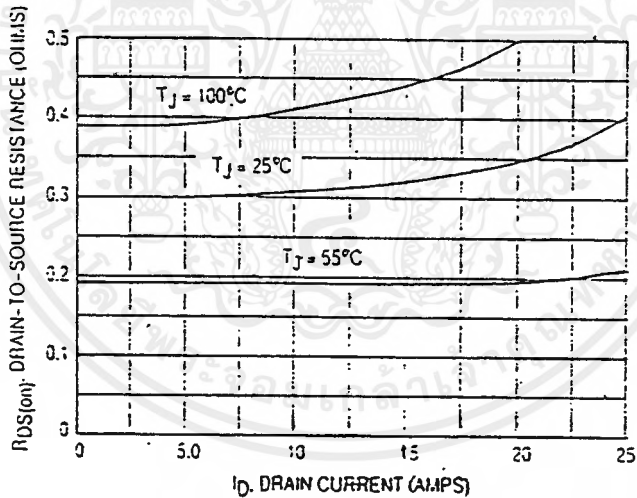
#### 6. ความต้านทานขณะนำกระแส (On-resistance, $r_{DS(on)}$ )

ค่าความต้านทานขณะนำกระแสของเพาเวอร์ MOSFET มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดจำนวนกระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ MOSFET โดยไม่ทำให้เกิดการแพร่กระจายกำลัง (Power dissipation) ที่มากเกินไปเมื่อมีการสวิตช์จากสภาวะไม่นำกระแส ไปสู่สภาวะนำกระแส ค่าของความต้านทานขณะนำกระแสจะลดลง จากค่าที่สูงมากไปสู่ค่าที่ต่ำมาก ในการลดค่าของความต้านทานขณะนำกระแสให้มีค่าต่ำสุดนั้นจะต้องให้ค่าของแรงดันเกตมีค่าต่ำพอเพื่อให้กระแสเดรนมากพอที่จะทำให้ MOSFET ทำงานในช่วงโอห์มมิก

จากรูปที่ 2.28 (ก) แสดงให้เห็นการเพิ่มแรงดันเกตกับซอส ให้มีค่ามากกว่า 2 โวลต์จะไม่มีผลทำให้ ค่าความต้านทานขณะนำกระแสมีค่าต่ำลง และการเพิ่มแรงดันเกตกับซอสให้สูงขึ้นทำให้เกิดแรงดันสไปค์ (Spike) การเพิ่มแรงดันระหว่างเกตกับซอสมากเกินไปจะเพิ่มเวลาในช่วงเริ่มหยุดนำกระแส (Turn off time) เนื่องจากมีประจุสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุด้านอินพุตมากเกินไป และจากรูปที่ 2.28 (ข) จะพบว่าเมื่อกระแสเดรนสูงขึ้นค่าของความต้านทานขณะนำกระแส จะสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญชี้ให้เห็นว่า พารามิเตอร์ตัวอื่นก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเช่นเดียวกัน อันเป็นผลกระทบมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขณะนำกระแส



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขณะนำกระแส

( ก ) แรงดันกัทับขอส และ กระแสเดรน

( ข ) กระแสเดรนและอุณหภูมิ

## 7. ตัวเก็บประจุในมอสเฟต

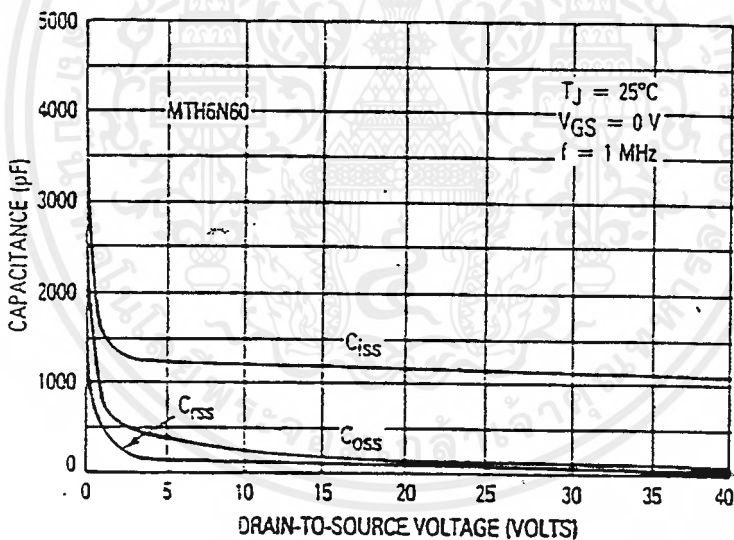
จากโครงสร้างของมอสเฟตจะทำให้เกิดตัวเก็บประจุระหว่างขั้วโลหะของเกรน และซอสกับเกตซึ่งเป็น Polision จะทำให้ตัวเก็บประจุระหว่างเกตกับเกรน  $C_{gd}$  และเกตกับซอส  $C_{gs}$  และหัวต่อ P-N ระหว่างเกรนกับซอสจะทำให้เกิดตัวเก็บประจุด้านขาเข้า ( Common source input capacitance ,  $C_{iss}$  ) และตัวเก็บประจุไอออนย้ายกลับ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

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

$$C_{oss} = C_{gs} + C_{ds} \quad (2-3)$$

$$C_{rss} = C_{gd} \quad (2-4)$$

ตัวเก็บประจุเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงระหว่างเกรนกับซอส แรงดันระหว่างเกรนกับซอส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่แรงดันระหว่างเกรนกับซอสมีค่าต่ำๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 แต่ตัวเก็บประจุเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก



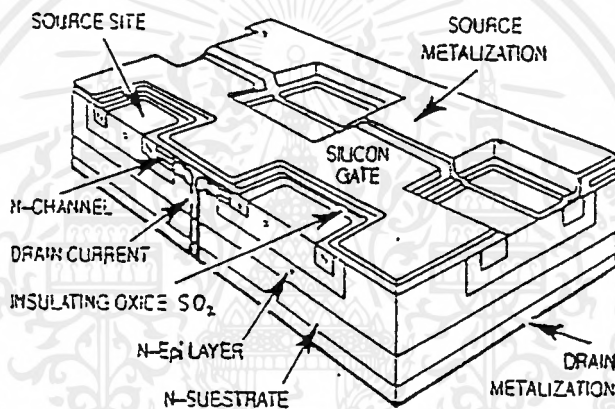
รูปที่ 2.29 ตัวเก็บประจุในมอสเฟต

ในการใช้งานมอสเฟตค่า  $C_{iss}$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งที่ตัวเก็บประจุจะถูกอัดประจุและคายประจุโดยวงจรขับ ( Drive circuit ) ซึ่งมีผลต่อการสวิทช์ค่าอิมพีแดนซ์ ( Impedance ) ของวงจรขับ จะมีผลอย่างมากต่อความเร็วในการสวิทช์ การเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบเล็กน้อยต่อค่าประจุต่างๆ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลเล็กน้อยต่อค่าเวลาในการสวิทช์ของมอสเฟตด้วย

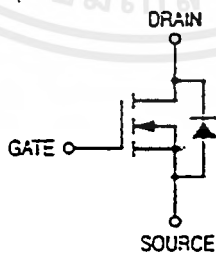
## 8. ไดโอดระหว่างเดรนกับซอส

ในตัวแทนเวอรั่มอสเฟตทุกตัวจะมีไดโอดแอบแฝงอยู่ระหว่างเดรนกับซอส ในรูปที่ 2.30 ( ก ) แสดงรูปหน้าตัดของ TMOS ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารอยต่อ P-N เกิดขึ้นจากชั้น P และชั้น N-epitaxial และเหตุที่พื้นที่หน้าตัดตรงรอยต่อมีขนาดกว้าง ดังนั้นค่าอัตรากระแส ( Current rating ) ของไดโอดจึงมีค่าเท่ากับของมอสเฟต ไม่ว่าจะ เป็นแบบต่อเนื่องหรือเป็นพัลส์

ในรูปที่ 2.30 ( ข ) จะพบว่าไดโอดถูกไบอัสตรง ( Forward bias ) ถ้าซอสมีศักดาเป็นบวกเมื่อเทียบกับเดรน เนื่องจากไดโอดเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญ จึงได้มีการกำหนดค่า Forward on Voltage , Forward turn-on time และ Reverse recovery time ไว้ดังในรูปที่ 2.31



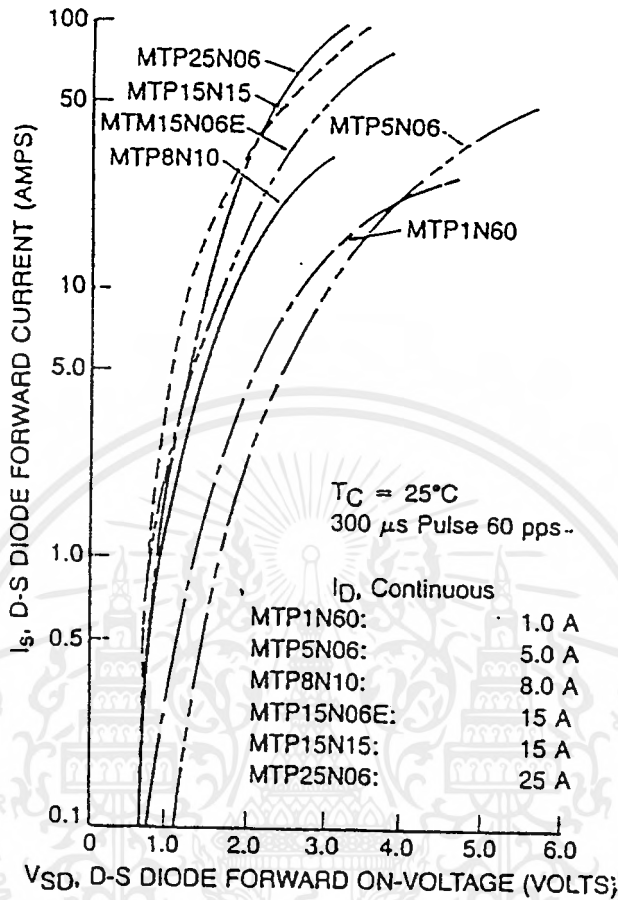
( ก )



( ข )

## รูปที่ 2.30 ( ก ) แสดงรูปหน้าตัดของมอสเฟต

( ข ) สัญลักษณ์ของมอสเฟตโคจรวมเดรนและซอสไดโอดไว้ด้วยกัน



รูปที่ 2.31 คุณสมบัติทางฟอร์เวิร์คของครนซอสไดโอด

### 9. การจับเกทของมอสเฟต

ลักษณะสมบัติทางด้านขาเข้าของมอสเฟตนั้นจะมีความแตกต่างกับคุณลักษณะทางด้านขาเข้าของบีเจที กล่าวคือกระแสขาออกของบีเจที (BJT) จะควบคุมด้วยกระแสส่วนกระแสออกของมอสเฟตนั้นจะถูกควบคุมด้วยแรงดันของเกท นอกจากนั้นแล้วความต้านทานขาเข้าของมอสเฟตจะมีค่าสูงมาก คืออยู่ในช่วงจิกะโอห์ม (Gigaohms) ซึ่งทำให้กระแสมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับบีเจทีขนาดเดียวกัน ดังนั้นการควบคุมมอสเฟตจึงใช้กำลังต่ำกว่าบีเจทีมาก คุณสมบัติอันนี้นับว่าเป็นข้อได้เปรียบของมอสเฟต เมื่อเทียบกับบีเจที

ในสภาวะอยู่ตัวนั้นกระแสที่ใช้ในการจับเกทของมอสเฟตจะมีค่าน้อยมาก คืออยู่ในช่วงนาโนแอมป์ (Nanoampere) เนื่องจากความต้านทานขาเข้าของมอสเฟตมีค่าสูงขึ้นถึงจิกะโอห์ม ซึ่งทำให้ดูเหมือนกับว่าเราสามารถจับเกทของเพนเวอร์มอสเฟตได้ โดยวงจรจับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถจ่ายกระแสออกได้เป็นนาโนแอมป์ แต่ในความจริงแล้วการนำกระแสหรือหยุดนำกระแส เทาเวอร์มอสเฟตนั้นเราจะต้องชาร์จ หรือ ดิสชาร์จ ตัวเก็บประจุด้านขาเข้าของเทาเวอร์มอสเฟตคือ  $C_{in}$  หรือ  $C_{gs}$  จากแรงดันระดับหนึ่งไปสู่แรงดันอีกระดับหนึ่ง ซึ่งความเร็วในการนำกระแส ด้านขาเข้าของมอสเฟต ถ้าเราต้องการให้การให้การสวิตช์มอสเฟตเป็นไปอย่างรวดเร็ว เราจะ ต้องใช้วงจรขับที่มีความต้านทานขาออกต่ำที่สามารถจ่ายหรือรับกระแสในคอนสวิตซ์ได้สูง ทั้งนี้ความเร็วในการสวิตช์ของมอสเฟตจะลดลงตามความต้านทานขาออกของวงจรถับเกท

เนื่องจากเกทของมอสเฟตจะถูกแยกออกจากช่องนำกระแสด้วยชั้นบางๆ ของซิลิกอน ซึ่งฉนวนระหว่างเกทกับซอสซึ่งมีค่าสูงเกิน ไปอาจทำให้ฉนวนนั้นทะลุและทำให้มอสเฟต เสียหายได้ ดังนั้นผู้ผลิตมักจะบอกแรงดันเกทกับซอสสูงสุดของมอสเฟตมาให้ซึ่ง โดยทั่วไปมัก จะมีค่า 20 โวลต์ และในวงจรถับเกทโดยทั่วๆ ไปจะมีการจำกัดแรงดันเกทกับซอสโดยใช้ซีเนอร์ ไดโอด (Zener diode) ขนาด 20 โวลต์ สองตัวมาต่ออนุกรมกันโดยต่ออาโนดกับคาโทดเข้าด้วยกันและต่อคร่อมเกทกับซอสเพื่อจำกัดเกทกับซอสไม่ให้เกิน 20 โวลต์ นอกจากนี้แล้วบางครั้ง จะมีการต่อคร่อมความต้านทานเชื่อมระหว่างเกทกับซอสเพื่อป้องกันการนำกระแสของมอสเฟต โดยไม่เจตนาทั้งนี้เราปิดวงจรเอาไว้ตัวเก็บประจุด้านขาเข้าของมอสเฟตอาจจะถูกชาร์จโดยกระแสรั่วไหล (Leakage current) ทำให้แรงดันระหว่างเกทกับซอสมีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่มซึ่งทำให้ มอสเฟตนำกระแสได้ ความต้านทานระหว่างเกทกับซอสจะเป็นทางผ่านของกระแสรั่วไหล และ รักษาไม่ให้แรงดันระหว่างเกทกับซอสสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม

#### 10. ลักษณะสมบัติของการสวิตช์มอสเฟต

เนื่องจากพาหะข้างมาก (Majority carrier) จึงทำให้ไม่มี Storage time ในคอน หยุดนำกระแส ดังนั้นความเร็วในการสวิตช์ของมอสเฟตจึงสูงกว่าความเร็วในการสวิตช์ของ BJT มาก แต่อย่างไรก็ดีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกทกับซอส และแรงดันคร่อมกับซอส ยังต้องใช้ เวลาในการชาร์จหรือดิสชาร์จตัวเก็บประจุที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นเวลาในการสวิตช์ของมอส เฟตขึ้นอยู่กับกระแสที่ใช้แน่นอน ในรูปที่ 2.32 แสดงรูปคลื่นของกระแสเกท แรงดันเกทกับ ซอส กระแสเดรนและแรงดันคร่อมกับซอส ในระหว่างการนำกระแสของและหยุดนำกระแส มอสเฟต ซึ่งเราสามารถแบ่งช่วงเวลาออกได้ตามสภาพการประจุของตัวเก็บประจุด้านขาเข้า ได้ ดังนี้

ในระหว่างการนำกระแส เราสามารถแบ่งช่วงเวลาออกได้เป็น 4 ช่วงดังนี้ คือ

$T_1$  คือช่วงเวลาที่  $C_{in}$  ถูกชาร์จจนกระทั่งมีแรงดันเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม มอสเฟตจะยัง อยู่ในสภาพปิดกั้นกระแส  $T_1$  นี้จะมีค่าเท่ากับช่วงเวลาการนำกระแส (Turn on delay time,  $t_d$ )

(on) ) คือนับเวลาจากที่แรงดันแกทกับขอสมีค่าประมาณ 10 % ของค่าสูงสุด ถึงเวลาที่แรงดัน  
 ทรนกับขอสลดลง 10% จากแรงดันในสภาวะหยุดนำกระแส

$T_2$  คือช่วงเวลาที่มอสเฟตเริ่มนำกระแสและแรงดันทรนกับขอสลดลงอย่างรวดเร็ว  $C_{iss}$   
 มีค่าน้อยในช่วงนี้ แรงดันแกทมีค่าค่อนข้างคงที่  $T_2$  นี้มีค่าประมาณเท่าเวลไ้ขึ้น (Rise time,  $t_r$ )

$T_3$  คือเวลาที่แรงดันทรนกับขอสและความต้านทานขณะนำกระแส ลดลงอย่างช้าๆ  
 กระแสทรนจะมีค่าใกล้เคียงเท่ากับค่าสูงสุด และกำลังสูญเสียยังคงมีค่ามากเนื่องจากแรงดันทรน  
 กับขอสยังมีค่ามากกว่าแรงดันทรนกับขอสขณะนำกระแสมาก ในช่วงเวลานี้  $C_{iss}$  จะมีค่าสูงสุด  
 และถูกชารจ์ให้มีแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

$T_4$  คือช่วงที่มอสเฟตนำกระแสเกือบจะเต็มที่ แต่  $C_{iss}$  ยังคงถูกชารจ์จนกระทั่งแรงดัน  
 ทรนกับขอส มีค่าเท่ากับแรงดันทรนกับขอสต่ำสุด และกระแสจะลดลงจนมีค่าเล็กน้อยในระหว่าง  
 การหยุดนำกระแส เราสามารถแบ่งเวลาออกเป็น 4 ช่วงคือ

$T_5$  มอสเฟตยังคงนำกระแสเต็มที่ ประจุส่วนเกินใน  $C_{iss}$  ถูกชารจ์เรียบร้อยแล้ว

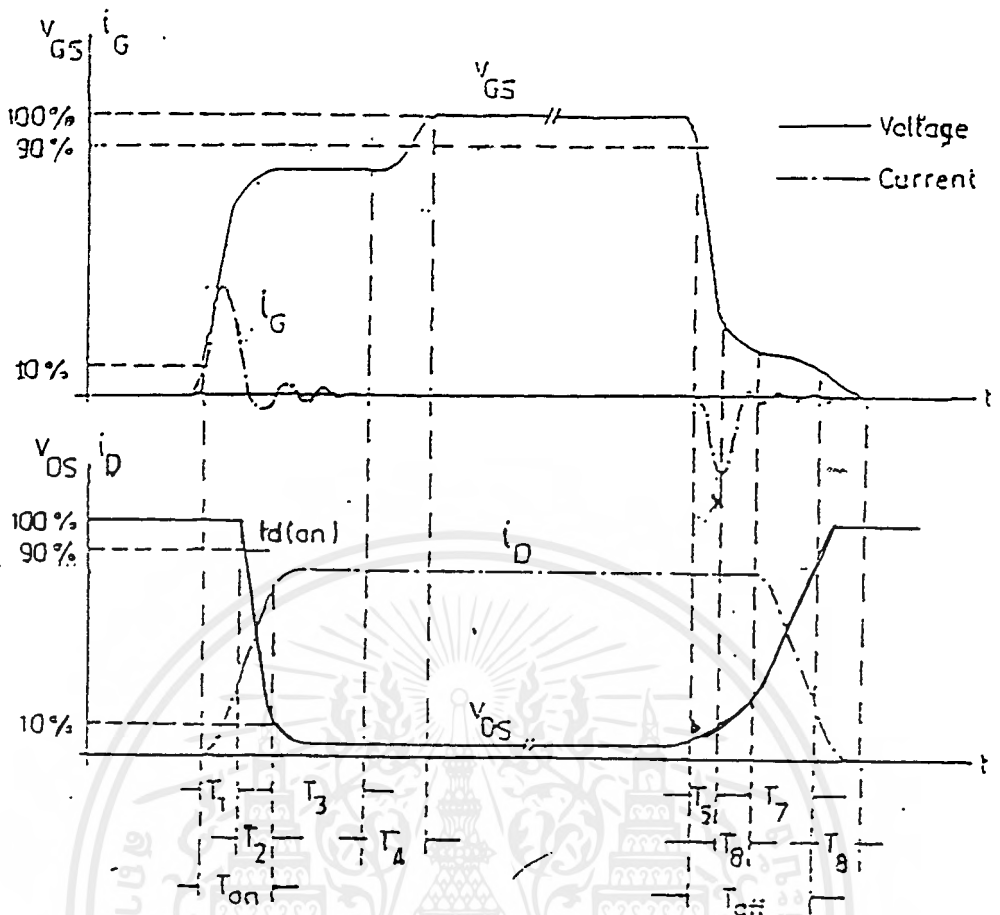
$T_6$  แรงดันทรนกับขอสเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ กระแสทรนลดลงเล็กน้อย  $C_{iss}$  จะมีค่าสูง  
 และถูกชารจ์ให้มีแรงดันลดลงอย่างช้าๆ

$T_7$  แรงดันทรนกับขอสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมอสเฟตเริ่มเปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะ  
 หยุดนำกระแส เมื่อแรงดันแกทกับขอส, กระแสทรน,  $C_{iss}$  จะมีค่าลดลง

$T_8$  มอสเฟตหยุดนำกระแสแต่  $C_{iss}$  ยังถูกชารจ์ต่อไปจนกระทั่งแรงดันเป็นศูนย์

Turn off time delay ( $t_{off}$ ) จะมีค่าปรากฏใน  $T_5 + T_6$  และช่วงเวลาหยุดนำ  
 กระแสจะมีค่าประมาณเท่ากับ  $T_7$

ในการสวิตช์มอสเฟตนั้นเราให้ค่าจำกัดความของ เวล่านำกระแส และเวลาหยุดนำ  
 กระแส เช่นเดียวกับกับในกรณีของ BJT



รูปที่ 2.32 รูปของการสวิตช์มอสเฟตโดยแสดงรูปคลื่นของแรงดันเกตกับขอส, กระแสเดรน, แรงดันเดรนกับขอส, กระแสเกต ทั้งในระหว่างช่วงการนำกระแสและช่วงการหยุดนำกระแส

### 11. ข้อพิจารณาในการเลือกใช้งานเพาเวอร์มอสเฟต

สำหรับเพาเวอร์มอสเฟต การเกิด Secondary breakdown เช่น ใน BJT จะไม่เกิดขึ้น เพราะค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอสขณะนำกระแสของมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าน้อยลง ต่างจากกรณีของ BJT ขณะเกิด Secondary breakdown เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกระแสมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเกิดการพังเสียหายได้อย่างรวดเร็ว เพาเวอร์มอสเฟตจึงมีพิสัยความปลอดภัยในกราฟ SOA กว้างกว่าเมื่อเทียบกับ BJT และเนื่องจากเพาเวอร์มอสเฟตไม่เกิด Secondary breakdown อัตราทนกำลังสูงสุดของมันจะถูกจำกัดด้วยค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อภายในตัวมันเท่านั้น

### 11.1 พิกัดปลอดภัยฟอร์เวิร์ดไบอัส (Forward Bias Operating Area) FBSOA

แบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะดังนี้ คือ

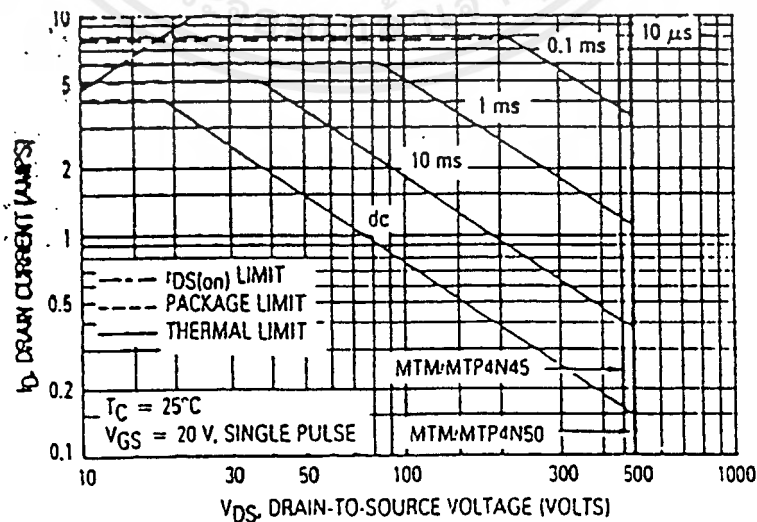
1. ข้อจำกัดแรงดันคั่นคร่อมครนและขอสสูงสุดที่สามารถทนได้ ( Maximum Drain Source Voltage)
2. ค่ากระแสครนสูงสุดที่สามารถไหลผ่านได้ และไม่ทำให้โครงสร้างภายในเสียหาย (Thermal Limit)
3. ข้อจำกัดเนื่องจากความต้านทานขณะนำกระแส
4. ข้อจำกัดการระบายความร้อนของตัวถัง (Package Limit)

ตัวอย่างกราฟ FBSOA แสดงไว้ในรูป 2.33 ก) การระวังไม่ให้เกิดเงื่อนไขที่ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานภายนอกพิกัดของกราฟ FBSOA เป็นสิ่งสำคัญ ต้องให้ความสนใจก่อนเลือกนำมาใช้งานทุกครั้ง

### 11.2 พิกัดปลอดภัยสวิทช์ริงของเพาเวอร์มอสเฟต ( Switching Safe Operating Area),SSOA

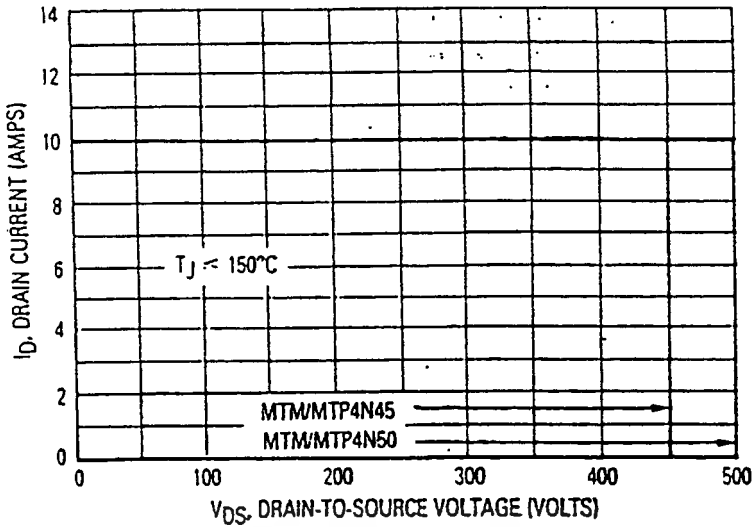
SSOA เป็นกราฟแสดงพิกัดกระแสและแรงดันใช้งานที่ปลอดภัยของเพาเวอร์มอสเฟตขณะเปลี่ยนสถานะ การใช้ SSOA สามารถใช้ได้ทั้งในการพิจารณาพิกัดปลอดภัยทั้งในเวลาชว่นนำกระแส และช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

ตัวอย่างกราฟ SSOA แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ข) เมื่อเทียบกับ RBSOA ของ BJT แล้วจะเห็นว่า SSOA จะมีพื้นที่ที่ปลอดภัยมากกว่า และขีดจำกัดกำลังจะอยู่ที่แรงดันคั่นคร่อมครนกับขอสสูงสุดและกระแสครนสูงสุดเท่านั้น



ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



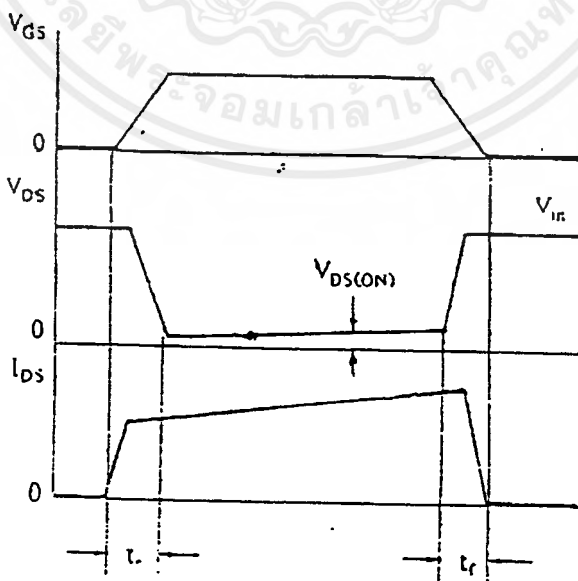
ข)

รูปที่ 2.33 ก) แสดง FBSOA

ข) แสดง SSOA

## 12. กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของเพาเวอร์มอสเฟต

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์มอสเฟตในขณะที่ทำงานจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเบตึ้นสถานะ และกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส แต่สำหรับเพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลาดำเนินการนำกระแส และหยุดนำกระแสสั้นกว่า BJT มาก เพราะจะไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้น จึงไม่มีปัญหาหน้าเคี้ยวกับ BJT เกิดขึ้น แต่มอสเฟตจะมีความต้านทานขณะนำกระแสค่อนข้างสูง การสูญเสียขณะนำกระแสจึงสูงกว่า BJT รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะการตอบสนองของมอสเฟตเมื่อทำงานเป็นสวิตช์



รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันคิกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อเริ่มนำกระแส และเริ่มหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าช่วงเวลานำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสของมอสเฟตจะค่อนข้างสั้น แต่โดยทั่วไปมักจะใช้งานที่ความถี่สูง การใช้งานที่ความถี่สูงกว่า 20 kHz การคิดค่าความสูญเสียขณะทำงานต้องนำค่าความสูญเสียจากการเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากเวลาขณะเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสของมอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน จึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลาด้วย ดังนั้นกำลังงานสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน ( $P_D$ ) จะมีค่า

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
	$R_{DS(on(T))}$	คือ ค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอส ที่อุณหภูมิรอยต่อสูงสุดขณะทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต
	$t_r$	คือ ช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
	$t_f$	คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

### 13. ข้อได้เปรียบจากการใช้มอสเฟต

#### ด้านความเร็ว

มอสเฟตกำลังมีความสามารถในการสวิตช์ด้วยความเร็วโดยปราศจากการสะสมประจุอย่าง BJT จึงไม่ต้องคิดเวลาสะสม จึงทำให้ขนาดและน้ำหนักเบา ทำให้มอสเฟตมีความเร็วมากกว่า ทรานซิสเตอร์สวิตช์ซึ่งมาก ความเร็วของมอสเฟตนั้น ขึ้นอยู่กับบาร์อ็อคและคาบประจุของการเก็บประจุของมอสเฟตเองโดยจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิลักษณะของอินพุท

ขาเกตของมอสเฟตนั้นจะถูกแยกจากแหล่งจ่ายด้วยชั้นออกไซด์ที่ทำให้เกิดความต้านทานกระแสตรงประมาณ 40 เมกกะโอห์ม มอสเฟตจะถูกไบอัสด้วยแรงดัน 10 โวลต์ ด้วยแรงดันขนาดนี้จึงสามารถขับมอสเฟตด้วย ไอซี ซิมอส หรือ TTL ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงกระแสของโหลด ทำให้ลดความยุ่งยากของวงจรขับ ทำให้ประหยัดยิ่งขึ้น ย่นทำงานตลอดทั้ง

การใช้งานเกินพิกัดอาจทำให้มอสเฟตพังได้ แต่สำหรับมอสเฟตแล้วบางที่อาจไม่ต้องใช้วงจรขับเบอร์ก็ได้ หรือใช้ค่าตัวเก็บประจุน้อยๆได้ ขอบเขตของย่าน

ปลอดภัยจะถูกกำหนดด้วยพิกัดกระแสสูงสุด แรงดันเบรคความรั และความจุของอุปกรณ์ ขอบเขตย่านปลอดภัยจะกว้าง เนื่องจากไม่เกิด Secondary breakdown แรงดัน

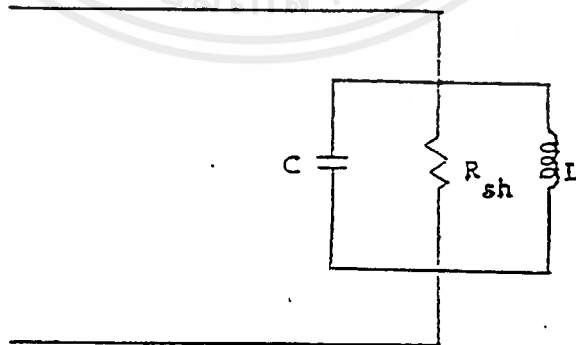
แรงดันต่ำสุดของมอสเฟต หาได้จากความต้านทานของอุปกรณ์ ( $R_{DS}$ ) สำหรับอุปกรณ์แรงต่ำ ค่า  $R_{DS}$  ต้องมีค่าต่ำที่สุด สำหรับอุปกรณ์แรงสูง ค่า  $R_{DS}$  ต้องมีค่า สูงขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ  $R_{DS}$  เป็นบวก สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิในตัวมอสเฟตสูงขึ้น กระแสเดรนจะมีค่าลดลง ดังนั้นการทำงานของ มอสเฟตจึงไม่มีเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่ม Thermal runaway ของอุณหภูมิ เพิ่มกำลังได้

สามารถเพิ่มกำลังของการสวิทชิงได้โดยการนำมอสเฟตมาต่อขนานกันหลายๆตัว อย่างไรก็ตาม มอสเฟตก็มีข้อเสียเช่นกัน คือ ค่าความต้านทาน ขณะนำกระแสในมอสเฟตจะสูงกว่าใน BJT ดังนั้นการใช้งานที่ความถี่ต่ำ ซึ่ง ความสูญเสียขณะนำกระแสในอุปกรณ์สวิทชิงกำลังเป็นสิ่งสำคัญ จึงไม่ควรใช้ เพาเวอร์มอสเฟต

## 2.5 LC Resonant

วงจร Resonant จะประกอบด้วย Inductance (L) , Capacitance (C) และ Shunt Resistant ( $R_{sh}$ ) โดยที่ Shunt Resistant เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียในวงจร วงจร Resonant แสดงได้ดังรูป ที่ 2.35



รูปที่ 2.35 วงจร Parallel Resonant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ Resonant ( $f_0$ ) ของวงจรรูปที่ 2.35 สามารถหาได้จากสูตร

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$f_0$  : ความถี่ Resonant (Hz)

$L$  : ค่า Inductance (Henry)

$C$  : ค่า Capacitance (Farad)

ที่ความถี่สูงๆค่า  $C, L$  ในสมการที่ 1 จะมีค่าน้อยมาก และจะเกิด Capacitance ขึ้นใน Inductor ได้

ในการทำงานเดียวกันก็จะมี Inductance ขึ้นใน Capacitor เช่นกัน การสูญเสียวงจรที่แสดง โดย  $R$  ก็จะมีผลมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบวงจร Resonant โดยใช้ Lumped - element ที่ความถี่สูงๆ

ดังนั้นในการออกแบบวงจร Resonant ที่ความถี่สูงๆ โดยการใช้ Cavity Resonator ซึ่งมีลักษณะเป็น Distributed-element จะสามารถออกแบบได้ง่ายกว่าการใช้ Lumped-element

#### Skin Depth

ในวงจรที่เป็นกระแสดตรง การสูญเสียของตัวนำจะมีค่าเท่ากับ  $I^2R$  โดยที่  $I$  คือค่ากระแสในตัวนำ และ  $R$  คือความต้านทานของตัวนำ ในวงจรกระแสดตรง กระแสที่ไหลในวงจรจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ แต่ในวงจรกระแสดสลับกระแสจะไหลในส่วนบริเวณใกล้กับผิวของตัวนำมากกว่าข้างในตัวนำ ซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานของตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น

ดังนั้น ความหนาแน่นของกระแส จะหนาแน่นมากที่สุดที่ผิวของตัวนำ และลดลงมาอย่าง Exponential กับความลึกจากผิวของตัวนำ ที่ความลึกที่ค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าเท่ากับ  $1/e$  (ประมาณ 37 %) ของความหนาแน่นของกระแสที่ผิวตัวนำ จะเรียกว่า Skin Depth

ค่า Skin Depth นี้หาได้จากสูตร

$$\delta = \frac{1\sqrt{\lambda\rho}}{2\pi\sqrt{30\mu}} \quad \text{---(2)}$$

โดยที่

$\delta$  : Skin Depth (cm)

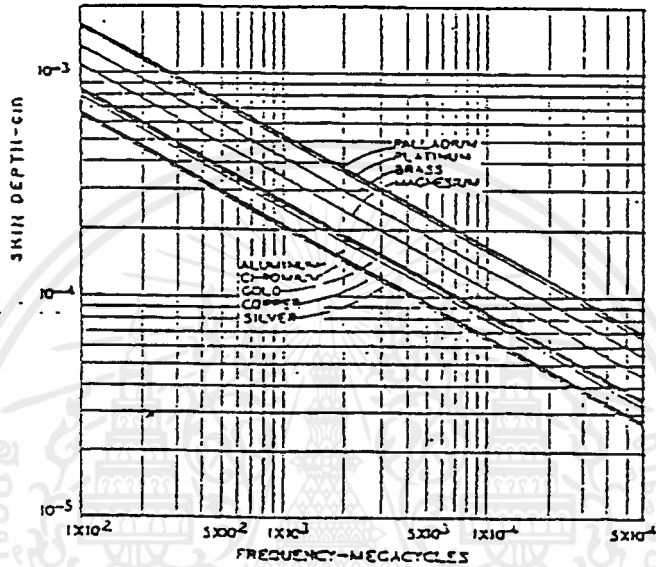
$\lambda$  : ความยาวคลื่น (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\rho$  : Resistivity (ohm-cm)

$\mu$  : Relative permeability

กราฟรูปที่ 8.2 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Skin Depth และความถี่ต่างๆของตัวนำแต่ละชนิด ซึ่งได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2



รูปที่ 2.36 กราฟ Skin Depth กับความถี่ต่างๆของตัวนำแต่ละชนิด

### Q-Factor

Q - Factor ของ Cavity เป็นส่วนที่สำคัญมาก สำหรับวงจร Resonator ที่ความถี่ Resonant ค่า  $Q/2$  คืออัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานที่สะสมมากที่สุดต่อ ค่ากำลังงานที่สูญเสีย ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Q = 2 \pi f \frac{\text{maximum energy storage}}{\text{Power loss}} \quad \text{---(3)}$$

ค่ากำลังงานที่สูญเสียใน Cavity เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสที่ไหลที่ผนังของ Cavity และคุณสมบัติของ Skin depth ตามสมการ 2 พลังงานที่สะสมใน Cavity ขึ้นอยู่กับลักษณะของ Cavity ซึ่งค่า Q โดยประมาณของ Cavity แสดงได้ดังสมการ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q \approx \frac{V}{A\delta} \quad \text{---(4)}$$

โดยที่  $V$  : คือปริมาณของ Cavity  
 $A$  : คือพื้นที่ผิวของ Cavity  
 $\delta$  : คือค่า Skin depth

เมื่อ Coupling มาต่ออยู่กับ Cavity ค่า  $Q$  ที่ปรากฏจะมีค่าลดต่ำลงดังนั้นค่า  $Q$  ของ Cavity จึงแตกต่างกันระหว่าง  $Q$  ที่มีโหลด และ  $Q$  ที่ไม่มีโหลด ซึ่งค่า  $Q$  ของ Cavity ที่มี โหลดแสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_U} + \frac{1}{Q_{E1}} + \frac{1}{Q_{E2}} \quad \text{---(5)}$$

โดยที่  $Q_L$  :  $Q$  ของ Cavity ที่มีโหลด  
 $Q_U$  :  $Q$  ของ Cavity ที่ไม่มีโหลด  
 $Q_{E1}$  :  $Q$  ภายนอกของวงจร Input  
 $Q_{E2}$  :  $Q$  ภายนอกของวงจร Output

### บทที่ 3

## การคำนวณและการสร้างวงจรขับมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์

### 3.1 วงจรควบคุม (Control Circuit)

วงจรควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์จะมีหน้าที่ในการทำให้มอเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์เปิดเพื่อทำให้เกิดความถี่สูงตามที่ต้องการที่โหลด วงจรส่วนเพาเวอร์เป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพราะฉะนั้นจึงต้องสร้างวงจรขึ้นมายับมอเตอร์ให้สลับกันสวิตช์ วงจรที่สร้างสัญญาณพัลส์ได้ใช้ IC เบอร์ TL494 กำหนดสัญญาณที่มีความถี่ 28 kHz ค่าเดดไทม์เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวงจรใช้วิธีการต่อหม้อแปลงในการขับนำมอเตอร์ของมอเตอร์

#### 3.1.1 IC เบอร์ TL494 สำหรับโหมดควบคุมจากแรงดัน

IC เบอร์ TL494 ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดทำงานควบคุมจากโหมดแรงดัน ซึ่งจะได้นำมาเป็นวงจรสร้างพัลส์ที่ความถี่ 28 kHz โครงสร้างภายในและการจัดขาของ TL494 แสดงในรูปที่ 6.1 การทำงานของ IC จะเป็นดังนี้

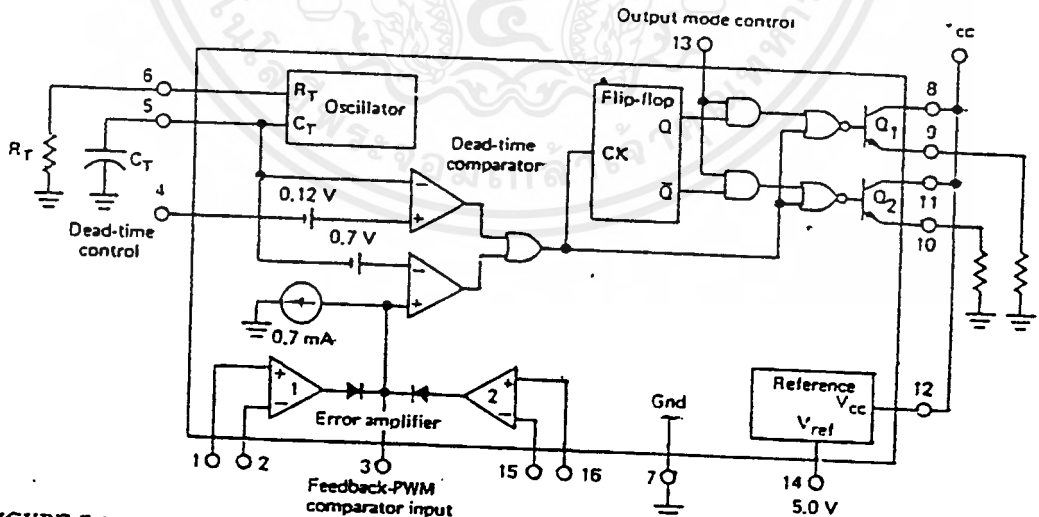


FIGURE 7-4 Internal block diagram of the TL494 PWM controller. (Courtesy of Motorola Semiconductor Products, Inc.)

### รูปที่ 3.1 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของ IC TL494

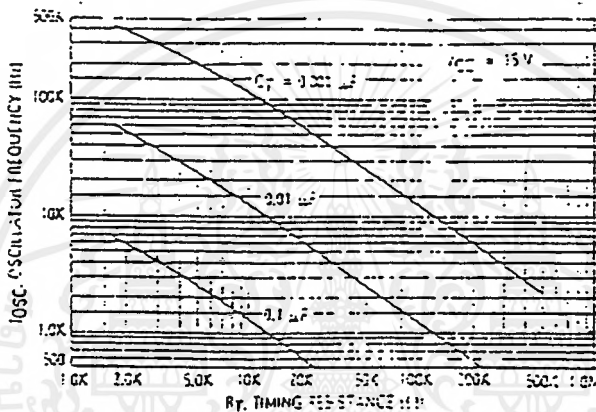
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.1 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

วงจรของ TL494 เป็น PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์ กำหนดได้โดยค่าของ  $R_T$  และ  $C_T$  จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของ IC ค่าคาบเวลาของการทำงานหาได้จาก

$$T = R_T C_T / 1.1 \quad (3.1)$$

$$F = 1.1 / R_T C_T \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $R_T C_T$  ในการกำหนดความถี่

ที่ความถี่การทำงาน 28 kHz

$$R_T = 3928.57 \ \Omega$$

$$C_T = 0.01 \ \mu\text{F}$$

### 3.1.1.2 การทำงานของ IC ในการคงค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์

ความกว้างเอาต์พุตของ IC จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 6 กับแรงดันที่ได้จากขายความแตกต่าง (Error Amp) ทั้ง 2 ตัวที่ PWM Comparator ส่วน NOR เกทที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาต์พุต  $Q_1$  และ  $Q_2$  ซึ่งจะทำงานก็ต่อเมื่อขา  $C_x$  ของฟลิปฟล็อป อยู่ในสถานะ low เท่านั้น ซึ่ง  $C_x$  จะเป็น low ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจากขายความแตกต่างทั้ง 2 นั่นคือแรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ หากมีค่าสูงขึ้นความกว้างเอาต์พุตของ IC จะลดลง ในทางกลับกันแรงดันที่ป้อนหากมีค่าลดลง ความกว้างเอาต์พุตของ IC จะเพิ่มขึ้น

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีสามารถให้มีค่ามากที่สุด หรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วย การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 โวลต์ จนถึง 3.5 โวลต์ ส่วนวงจร

ขยขความแตกต่างทั้ง 2 ตัวจะมีช่วงของอินพุตคอมมอนโหมด ตั้งแต่  $-0.3$  ถึง  $(V_{cc}-2)$  โวลต์ และสามารถใช้ตรวจจับแรงดันหรือกระแสที่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ได้วงจรขยขความแตกต่างทั้ง 2 ตัวจะให้เอาท์พุทในลักษณะให้สถานะ High (Active high) โดยต่อกันอยู่ในลักษณะ OR ที่ขา non-inverting ของ PWM Comparator การต่อกันในลักษณะนี้วงจรขยขความแตกต่างที่ทำให้เกิดความกว้างเอาท์พุทพัลส์ต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างเอาท์พุทของ IC

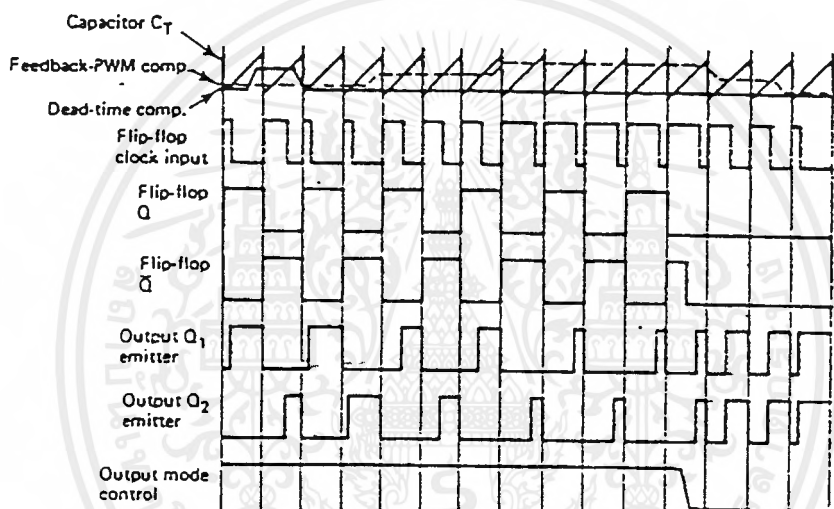


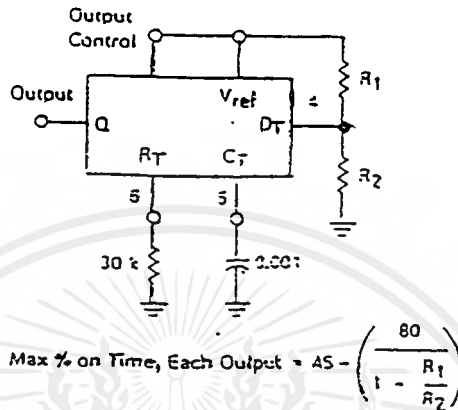
FIGURE 7-5 Timing diagram waveforms of the TL494 PWM controller. (Courtesy of Motorola Semiconductor Products, Inc.)

### รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL494

#### 3.1.1.3 การกำหนดค่าเวลาเมื่อ $t_D$ (Dead Time)

TL494 สามารถให้ผู้ใช้กำหนดค่าเวลาเมื่อ  $t_D$  ของวงจรได้เอง ด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ที่ขา 4 ของไอซี อย่างไรก็ตาม หากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาเมื่อต่ำสุดของไอซี จะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120 มิลลิโวลต์ต่ออยู่ภายใน ดังนั้นช่วงเวลา  $t_{Dmax}$  สูงสุดของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซีจะเท่ากับ 48 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 (Output control) เข้ากับขา 14 ( $+5 V_{cc}$ ) และมีค่าเท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรการต่อเคดไทม์

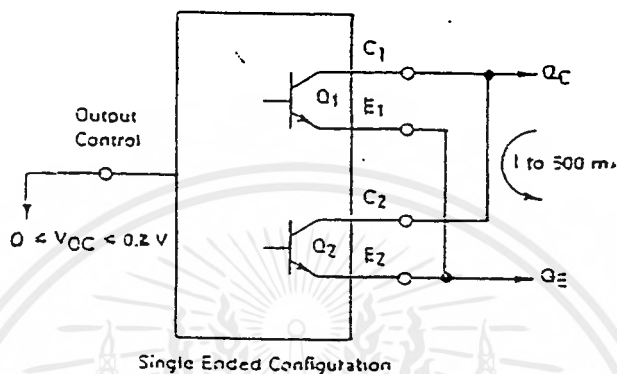
#### 3.1.1.4 การเลือกใช้ $Q_1$ และ $Q_2$ ที่เอาต์พุตของไอซี

เอาต์พุต  $Q_1$  และ  $Q_2$  ของไอซีสามารถทำงานได้ 2 โหมด คือ ทำงานพร้อมกัน หรือ สลับกันทำงาน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 (output control) โดยในขณะที่  $C_T$  ดิซชาร์จ เอาต์พุตของ Dead-time Comparator จะให้พัลส์ออกมา  $C_T$  จะมีสถานะเป็น High และหยุดการทำงานของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  ถ้ากำหนดขา 13 ให้มีสถานะเป็น High โดยการต่อเข้ากับขา 4 (+5 V<sub>cc</sub>)  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะสลับกันทำงานตามจังหวะของฟลิปฟล็อปเพื่อใช้ขับอินเวอร์ตแบบพุช-พูล ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะเป็น 2 เท่าของค่าคาบเวลาสัญญาณพื้นฐานของไอซี แต่ถ้ากำหนดขา 13 มีสถานะเป็น Low โดยการต่อลงกราวด์ (ขกเลิกฟลิปฟล็อป)  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะทำงานพร้อมกันและสามารถขนาน  $Q_1$  และ  $Q_2$  เข้าด้วยกันได้ ถ้าต้องการให้นำกระแสรวมได้ขึ้น ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับค่าคาบเวลาของสัญญาณพื้นฐานของไอซี (ช่วงนำกระแสสูงสุดเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลา)

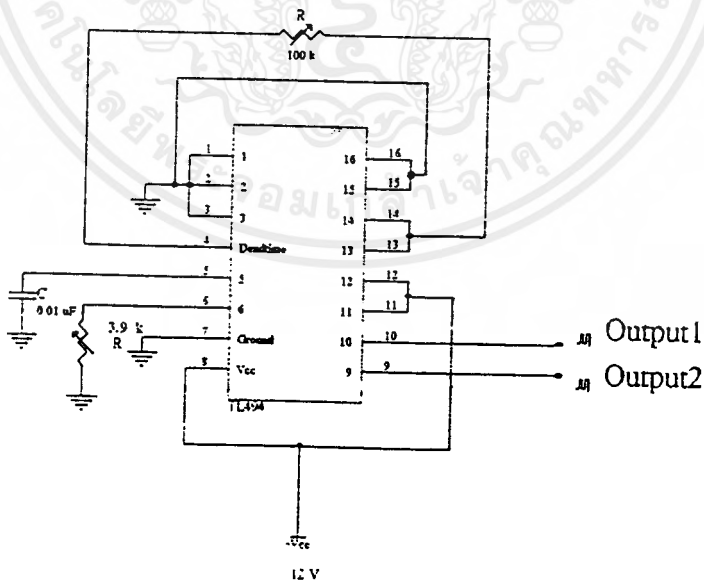
TL494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง  $V_{cc} = 7$  ถึง 40 โวลต์ มีแรงดันอ้างอิงภายใน และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 10 มิลลิแอมป์ เพื่อใช้กับวงจรภายนอกได้ โดยมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถูกต้อง  $\pm 1.5\%$  ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์  
เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการเลือกใช้อาห์พุทของ TL494

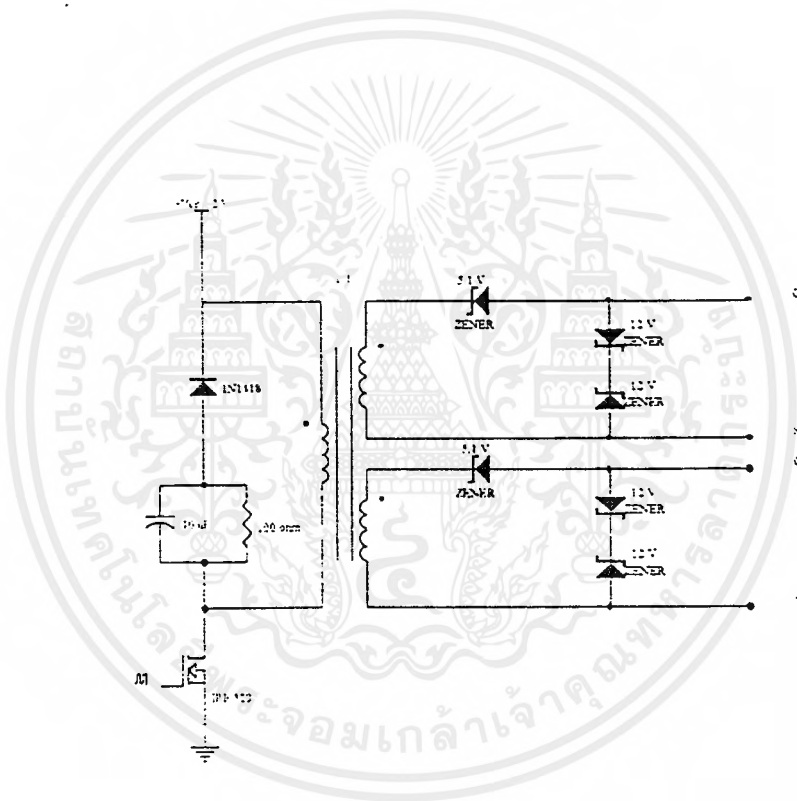


รูปที่ 3.6.1 การต่อวงจรสร้างพัลส์ความถี่ 28 kHz ของ TL494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 วงจรขับเกทของเพาเวอร์มอสเฟต

ในส่วนของวงจรขับเกทของเพาเวอร์มอสเฟตนั้นจะใช้วงจรขับด้วยหม้อแปลง โดยจะต่อมอสเฟตให้ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ เพื่อช่วยในการขยายกระแสไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น โดยผ่านหม้อแปลงที่มีอัตราส่วน 1:1 จากนั้นจะต่อขานานด้วยซีเนอร์ไดโอดเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ โดยค่าความต้านทานที่ต่อขานานด้านทุติยภูมิไว้เพื่อแบ่งกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดตรงรูปวงจรแสดงดังนี้



รูปที่ 3.7 วงจรขับเกทของเพาเวอร์มอสเฟต

### 3.1.3 วงจรสแน็บเบอร์ (Snubber Circuit)

วงจรสแน็บเบอร์เป็นส่วนหนึ่งที่เพิ่มขึ้นมาในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อลดกำลังงานสูญเสียและป้องกันการเกิดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรขณะทำงานปกติ วงจร สแน็บเบอร์ในที่นี้แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ วงจรสแน็บเบอร์ช่วงหยุดนำ

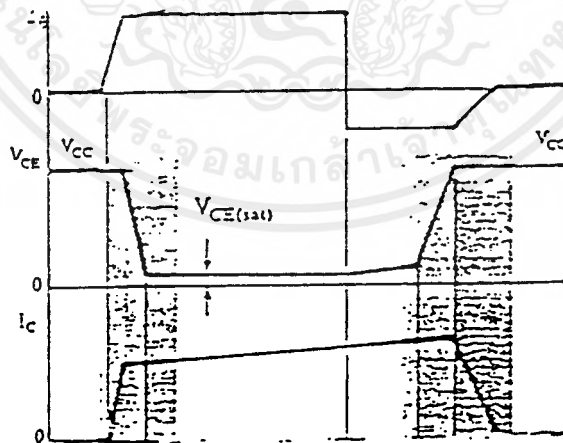
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส (turn off snubber) และวงจรสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกิน (clame snubber) วงจรสับเบอ์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และไดโอด บางครั้งจึงเรียกว่า RCD สับเบอ์

### 3.1.3.1 วงจรสับเบอ์ช่วงหยุดนำกระแส

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะเป็นไปได้สูงขณะเปลี่ยนสถานะการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแส ก่อนที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะหยุดนำกระแส นั้น กระแสจะลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นสู่ค่าแรงดันอินพุทอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.8 กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนในช่วงนี้จึงเกิดขึ้นสูง

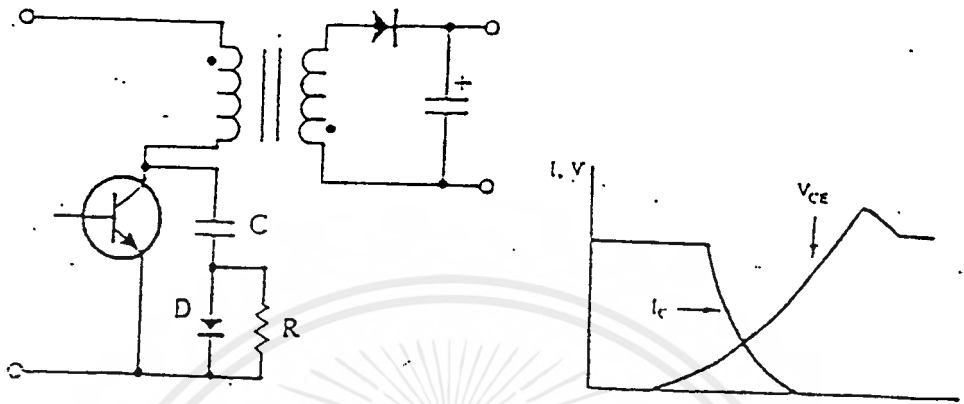
เพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสียในช่วงนี้อาจทำได้โดยการต่อวงจรสับเบอ์เข้ากับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงได้ทันกัน ซึ่งจะช่วยให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ ลักษณะการต่อวงจรสับเบอ์อาจทำได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะการลดลงของกระแสและการเพิ่มของแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์

ทรานซิสเตอร์ ขณะเริ่มหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการต่อวงจร snubber ช่วงหยุดนำกระแสเพื่อหน่วงแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

การทำงานของวงจร RCD snubber ช่วงเริ่มหยุดนำกระแสจะเป็นดังนี้คือ เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  เริ่มหยุดนำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีกระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_1$  และไดโอด  $D_1$  ของวงจร snubber ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $C_1$  ด้วย แรงดันที่ตกคร่อม  $C_1$  จะทำให้แรงดันที่คอลเล็กเตอร์ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นถ้าให้  $C_1$  มีค่ามากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์จะถูกหน่วงออกไปเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงจนมีค่าน้อยๆ ได้ทันที

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

$$C = 0.5(I_{R(pk)} * t_{off}) / V_{in} \quad (3.4)$$

$$R_1 = t_{on}(Min) / 3C_1 \quad (3.5)$$

- เมื่อ  $I_{R(PK)}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหุคนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  
 $V_m$  คือ ค่าแรงดันอินพุทของอินเวอร์เตอร์  
 $t_{on}$  คือ ช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  
 $t_{off}$  คือ ช่วงเวลาหุคนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

การคายประจุของ  $C_1$  จะทำให้เกิดความสูญเสียในตัว  $R_1$  สูง ตัวต้านทานจะต้องทนกำลังได้สูง โดยค่ากำลังงานสูญเสียใน  $R_1$  หาได้จาก

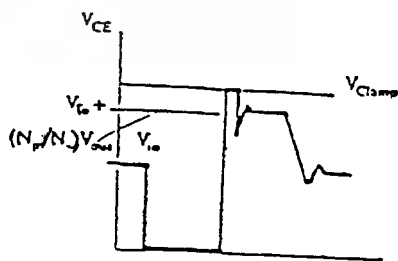
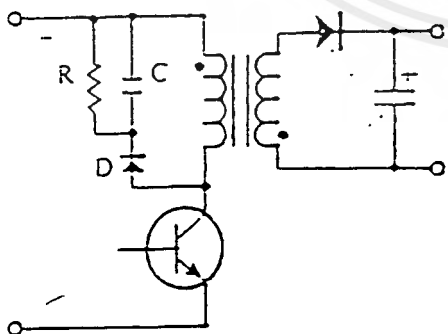
$$P_o = C_1(2V_m)^2 / 2T \quad (3.6)$$

เมื่อ  $T$  คือ ค่าคาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

### 3.1.3.2 วงจรสับเบออร์ป้องกันแรงดันเกิน

ปกติการเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะทำงาน มักมีสาเหตุหลักจากการทำงาน

เกิน RBSOA แรงดันสไปค์ขณะหุคนำกระแส มักจะทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหุคนำกระแสมีค่าสูงเกินค่าแรงดันสูงสุดที่มันสามารถทนได้ และเกิดการพังเสียหายขึ้น วงจรสับเบออร์ป้องกันแรงดันเกินจึงมีหน้าที่ป้องกันแรงดันสไปค์ที่เกิดขึ้นไม่ให้เกินค่าปลอดภัยของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ การต่อวงจร RCD สับเบออร์เพื่อป้องกันแรงดันเกินอาจทำได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะการต่อวงจรสับเบออร์ป้องกันแรงดันเกินเพื่อจำกัดค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะหุคนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจกล่าวได้ว่า วงจรสับเบรอร์ป้องกันแรงดันเกินนั้นทำงานโดยการถ่ายเทพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันสไปค์ไปไว้ที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  แทนนั้นคือ

$$\frac{1}{2}(C_1 V_C^2) = \frac{1}{2}(L_1 I_{\text{PK}}^2) \quad (3.7)$$

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

$$C = L_1 I_{\text{PK}}^2 / (V_{\text{CEO}} - V_{\text{clamp}}) \quad (3.8)$$

เมื่อ  $L_1$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากฟลักซ์รั่วของขด Primary  
 $I_{\text{PK}}^2$  คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหุคนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  
 $V_{\text{CEO}}$  คือ อัตราการทนแรงดันตกคร่อมสูงสุดของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  
 $V_{\text{clamp}}$  คือ ค่าแรงดันสูงสุดที่ขอมให้เกิดขึ้นได้เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มหุคนำกระแส

ค่าของ  $R_1$  อาจหาได้จาก

$$R_1 = t_{\text{off}}(\text{Min}) / 3C_1 \quad (3.9)$$

กำลังงานสูญเสียใน  $R_1$  จะมีค่าเท่ากับ

$$P_o = 0.5L_1 I_{\text{PK}}^2 / T \quad (3.10)$$

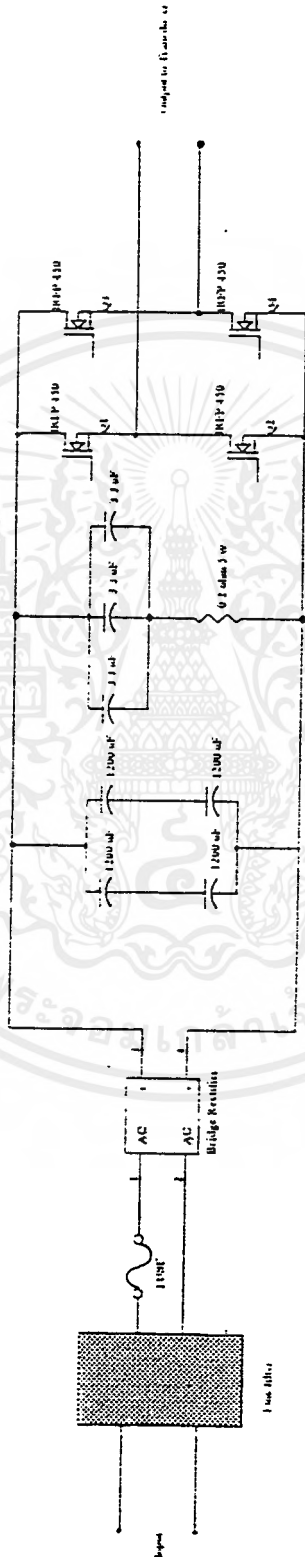
เมื่อ

$T$  คือ คาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

$t_{\text{off}}$  คือ ช่วงเวลาหุคนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์



### 3.2 วงจรกำลัง (Power Circuit)

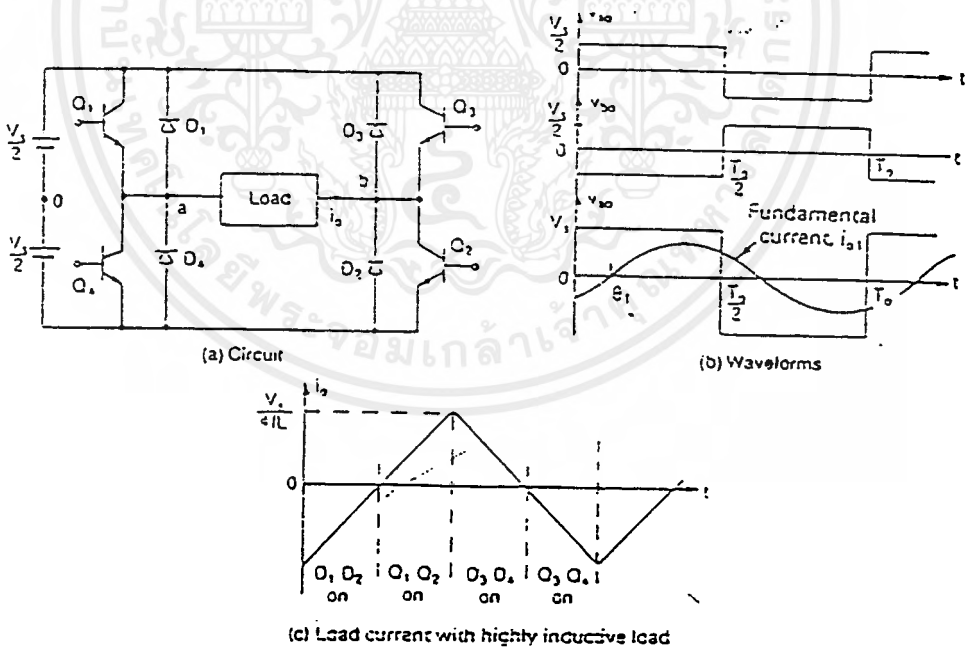


รูปที่ 3.12 แสดงวงจรกำลัง (Power circuit) ที่ใช้ในการขับหัวออกตัวโหนดทรานซิสต์วีเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าวงจรกำลังนี้เป็นวงจรที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge Inverter Circuit) ซึ่งจะใช้มอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว ทำงานโดยนำกระแส และ หายุนำกระแสสลับกันเป็นคู่ๆ ในแต่ละครึ่งคาบเวลา  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะนำกระแสพร้อมกันใน ครึ่งคาบเวลา และเมื่อหายุนำกระแส  $Q_3$  และ  $Q_4$  จะนำกระแสต่อพร้อมกันในครึ่งคาบเวลาที่ เหลือสลับกันเช่นนี้เรื่อยไป

ลักษณะการทำงานของวงจรที่ได้จึงเป็นเช่นเดียวกับฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ยกเว้น แรงดันตกคร่อมขด Primary จะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - 2V_{CE(SAT)}$  ดังนั้นผลของการทำงานของวงจรจึง เหมือนผลจาก ทูตฟูลอินเวอร์เตอร์นั่นเอง จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อม  $Q_1$  และ  $Q_2$  ขณะ หายุนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{CEQ(SAT)}$  และ  $V_{in} - V_{CEQ(SAT)}$  ตามลำดับ ส่วนแรงดันที่ตก คร่อม  $Q_3$  และ  $Q_4$  ขณะหายุนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{CE2(SAT)}$  และ  $V_{in} - V_{CE2(SAT)}$  ตาม ลำดับเช่นเดียวกัน ส่วนไดโอด  $D_1$  ถึง  $D_4$  ทำหน้าที่เป็นคอมมิวเตตติ้งไดโอดให้กับวงจรเพื่อป้อง กัน  $Q_1$  ถึง  $Q_4$



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

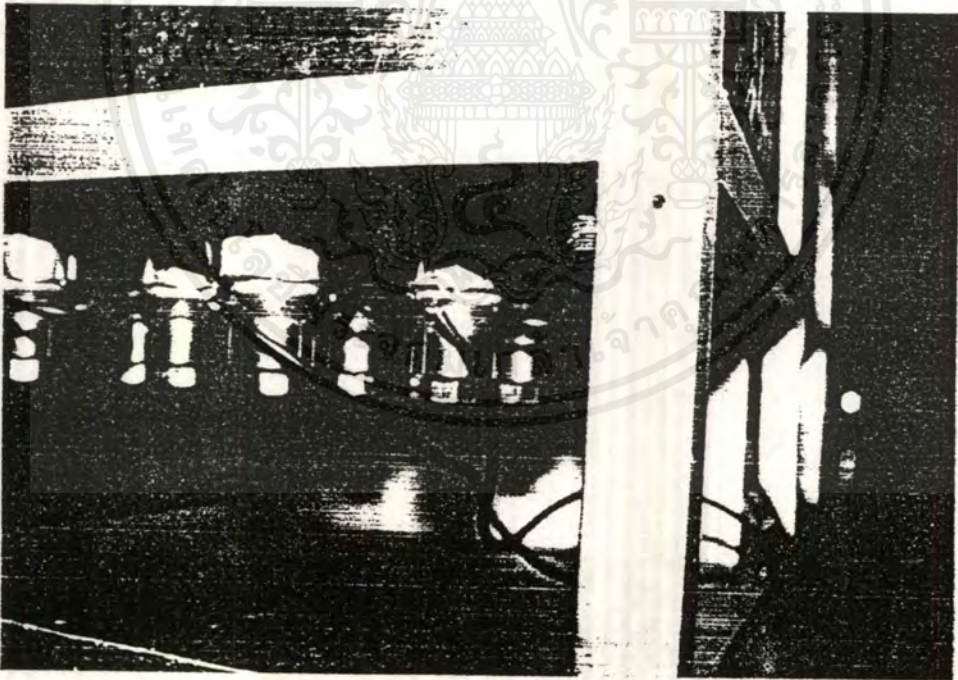
## บทที่ 4

### การสร้างเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค การนำไปใช้งาน และผลการทดลอง

เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคจะประกอบไปด้วยโครงสร้างส่วนที่เป็นตัวถัง และส่วนที่เป็นวงจรทางไฟฟ้า โดยรายละเอียดส่วนต่างๆมีดังนี้

#### 4.1 โครงสร้างส่วนที่เป็นตัวถัง

โครงสร้างตัวถังทำจากเหล็ก มีช่องว่างสำหรับใส่ถังที่ติดตัวทรานสดิวเซอร์ (Tranducers) ลงไป ขณะที่ทำการเดินเครื่องทำความสะอาดนี้ จะมีการเติมสารละลายที่ใช้ทำความสะอาดลงไป ในถังส่วนที่มีหัวทรานสดิวเซอร์ติดอยู่ นำชิ้นงานที่ต้องการจะล้างใส่ลงไปในถังนี้ แล้วจึงทำการเปิดเครื่อง รูปตัวทรานสดิวเซอร์ที่ติดกับโครงสร้างของตัวถังแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวทรานสดิวเซอร์

## 4.2 วงจรทางไฟฟ้า

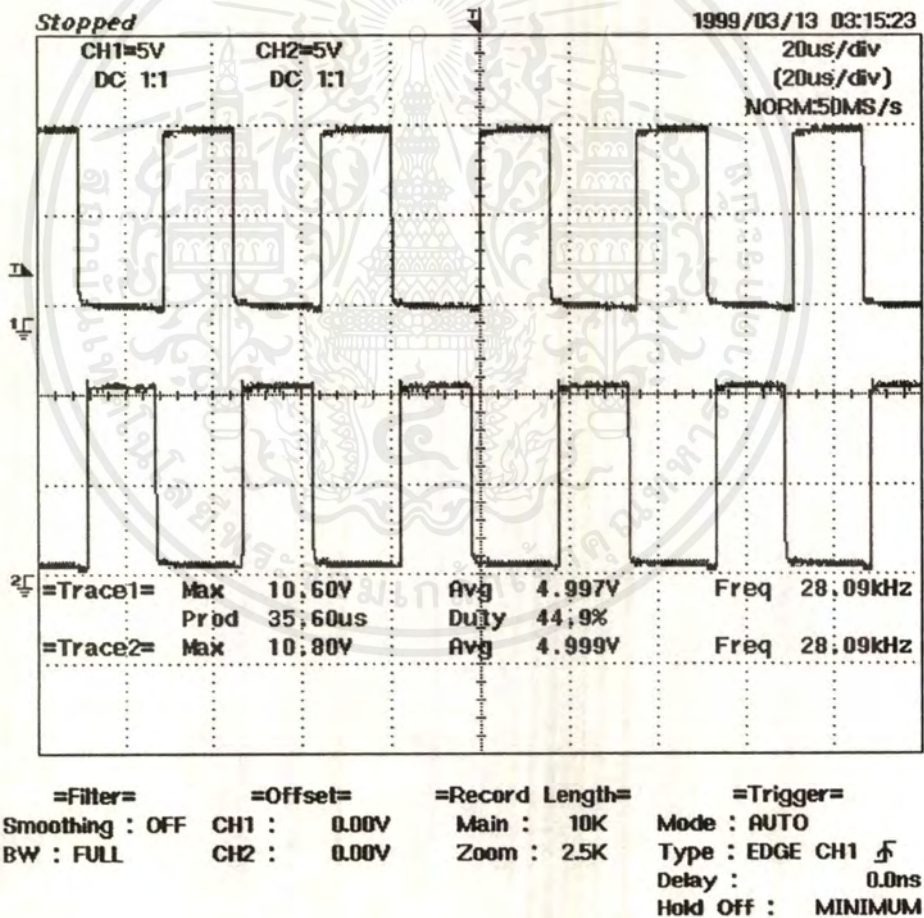
ประกอบด้วยวงจรต่างๆดังนี้

### 4.2.1 วงจรโวลเตจเรกูเลเตอร์ (Voltage Regulator Circuit)

วงจรเรกูเลเตอร์ เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการสร้างโวลท์ที่มีค่า +12 V เพื่อจ่ายให้กับไอซี TL494 ในวงจรกำเนิดความถี่ และจ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนด้วย

### 4.2.2 วงจรกำเนิดความถี่ (Oscillator Circuit)

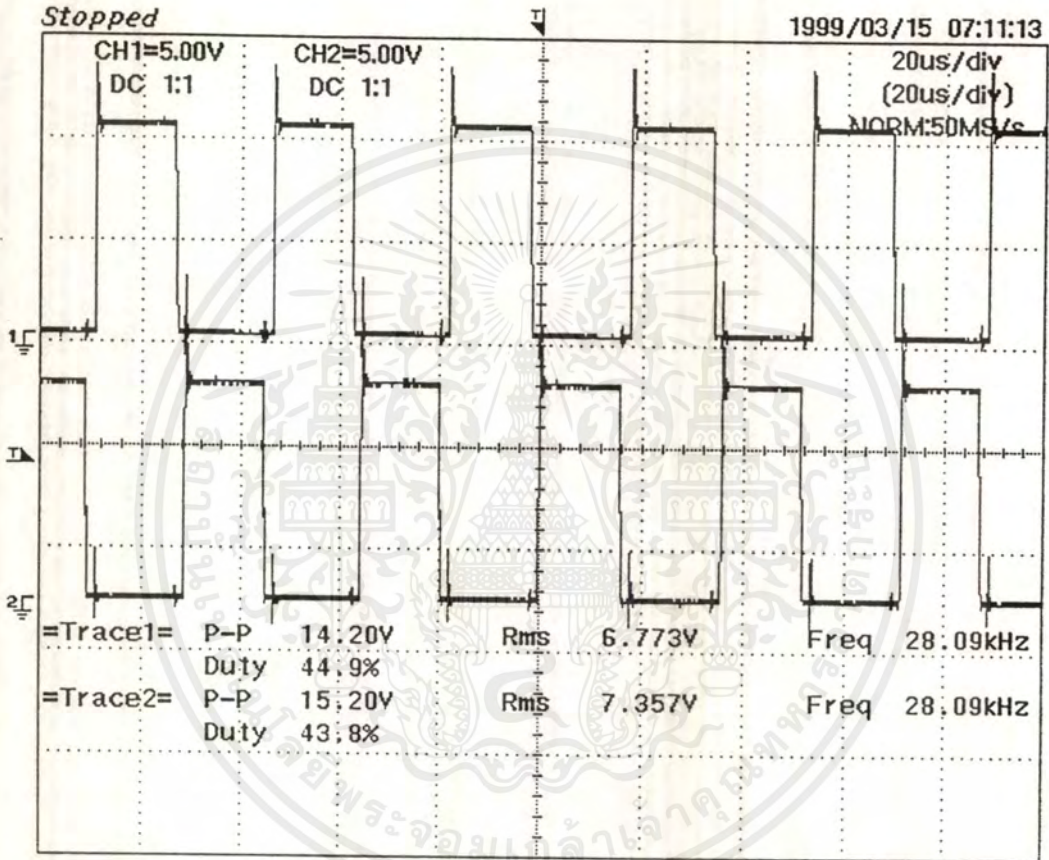
เป็นวงจรที่ใช้กำเนิดพัลส์ (Pulse) ความถี่ 28 kHz โดยวงจรจะมีไอซี TL 494 เป็นตัวกำเนิดความถี่ และได้สัญญาณออกมามาดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงรูปสัญญาณที่ได้ออกมาจากวงจรกำเนิดความถี่

### 4.2.3 วงจรขับเกท

วงจรขับเกทเป็นวงจรที่รับสัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่ แล้วผ่านหม้อแปลงเพื่อทำการแยกกราวด์ แล้วนำสัญญาณที่ได้ส่งไปที่ขาเกทและขาซอสของมอสเฟต เพื่อให้มอสเฟตทำงาน โดยสัญญาณที่ได้ออกมาแสดงดังรูปที่ 4.3

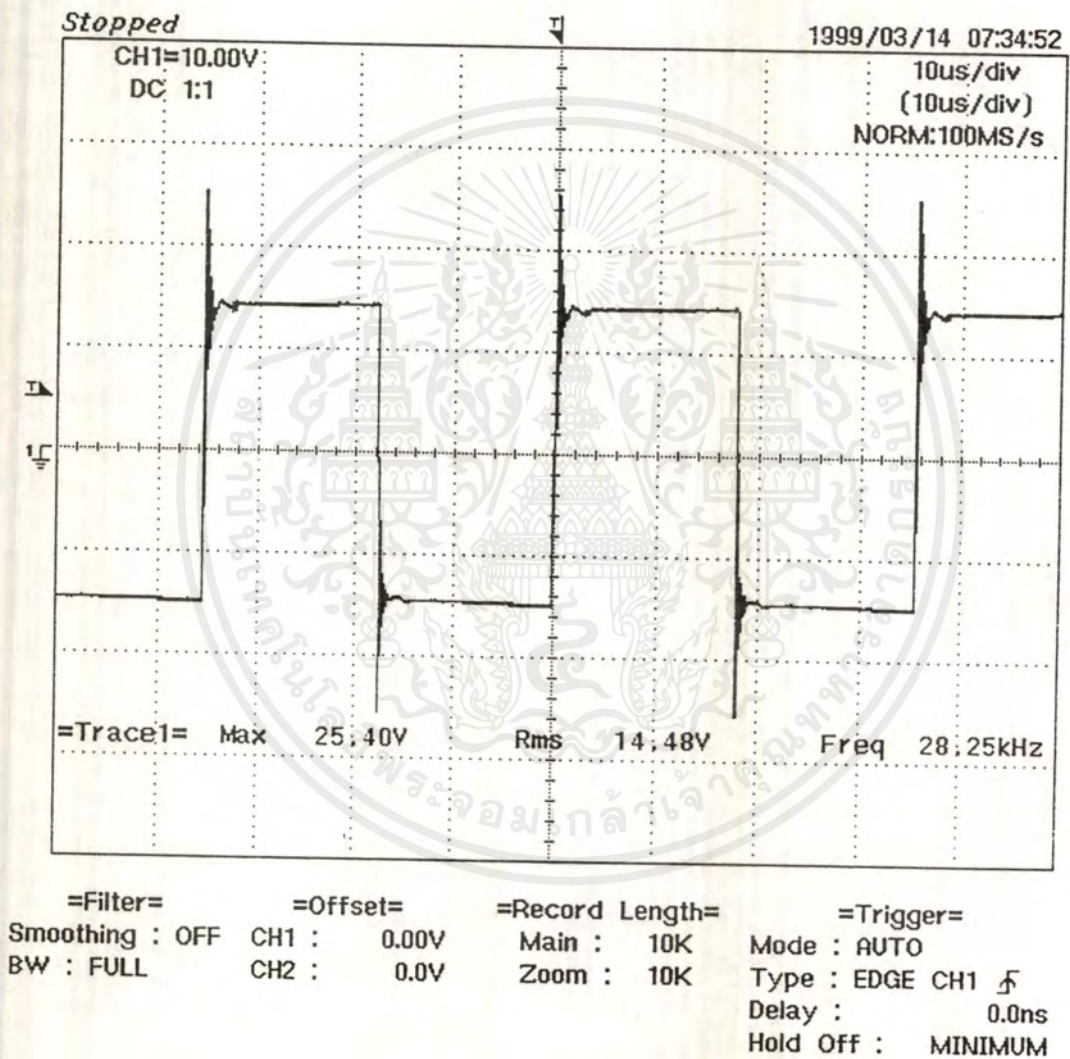


=Filter=                      =Offset=                      =Record Length=                      =Trigger=  
Smoothing : OFF      CH1 : 0.00V                      Main : 10K                      Mode : AUTO  
BW : FULL              CH2 : 0.00V                      Zoom : 10K                      Type : EDGE CH2   
Delay : 0.0ns  
Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณที่ได้ออกมาจากวงจรถับเกท

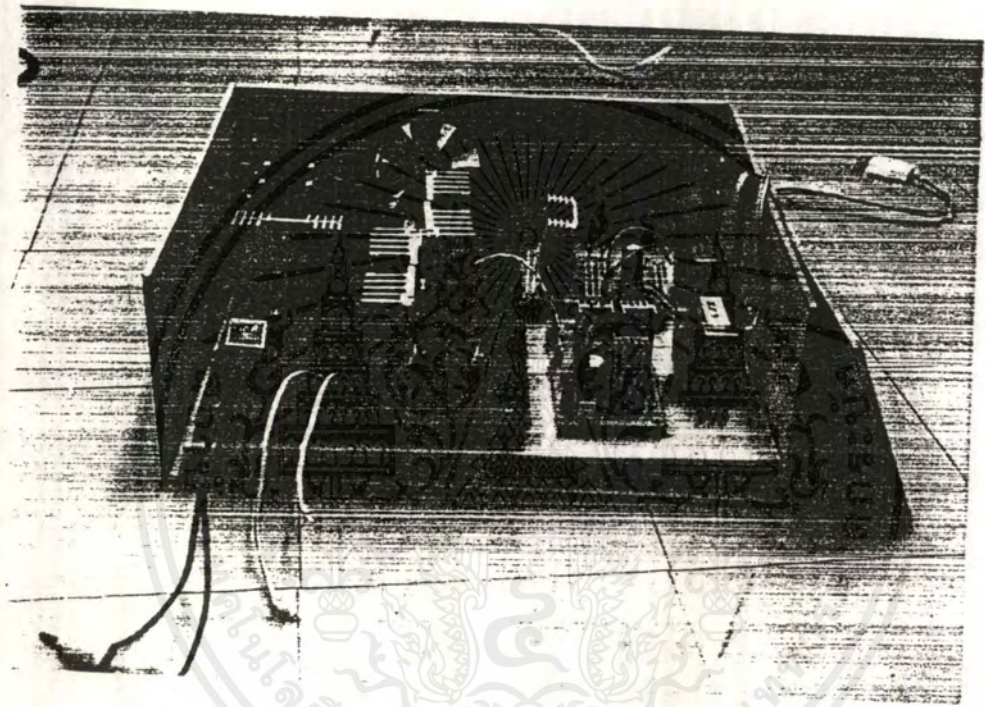
## 4.2.4 วงจรกำลัง

ในวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญคือ มอสเฟต โดยเมื่อมอสเฟตได้รับสัญญาณจากวงจรขับเคลื่อน กระแสจะสามารถไหลผ่านระหว่างขาคอนและขาซอสของมอสเฟตได้ สัญญาณที่ได้ออกจากมอสเฟตขณะไม่มีโหลดเป็นดังรูปที่ 4.4



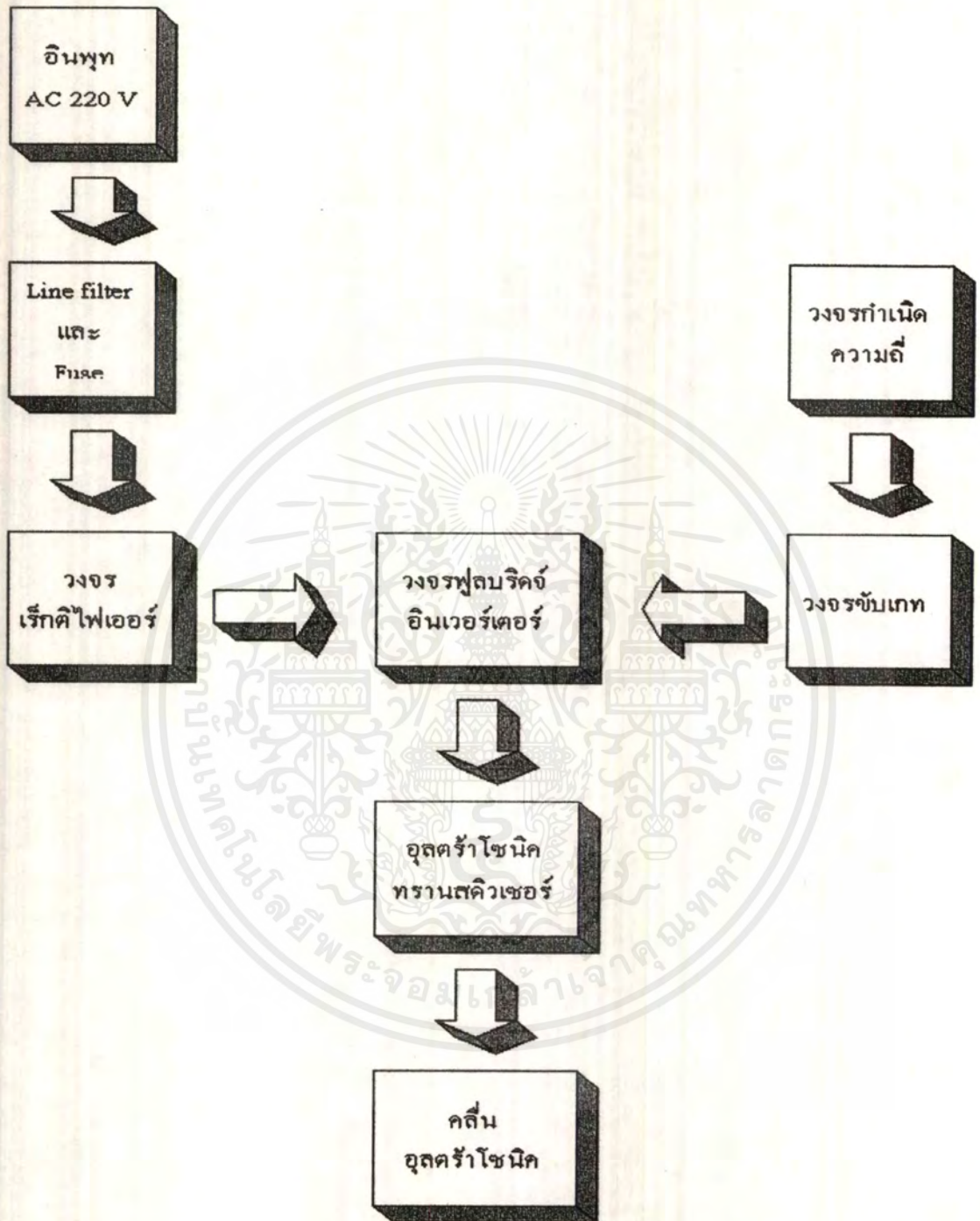
รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณออกจากวงจรกำลังขณะไม่มีโหลด และ Probe \* 10 ที่ 100 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



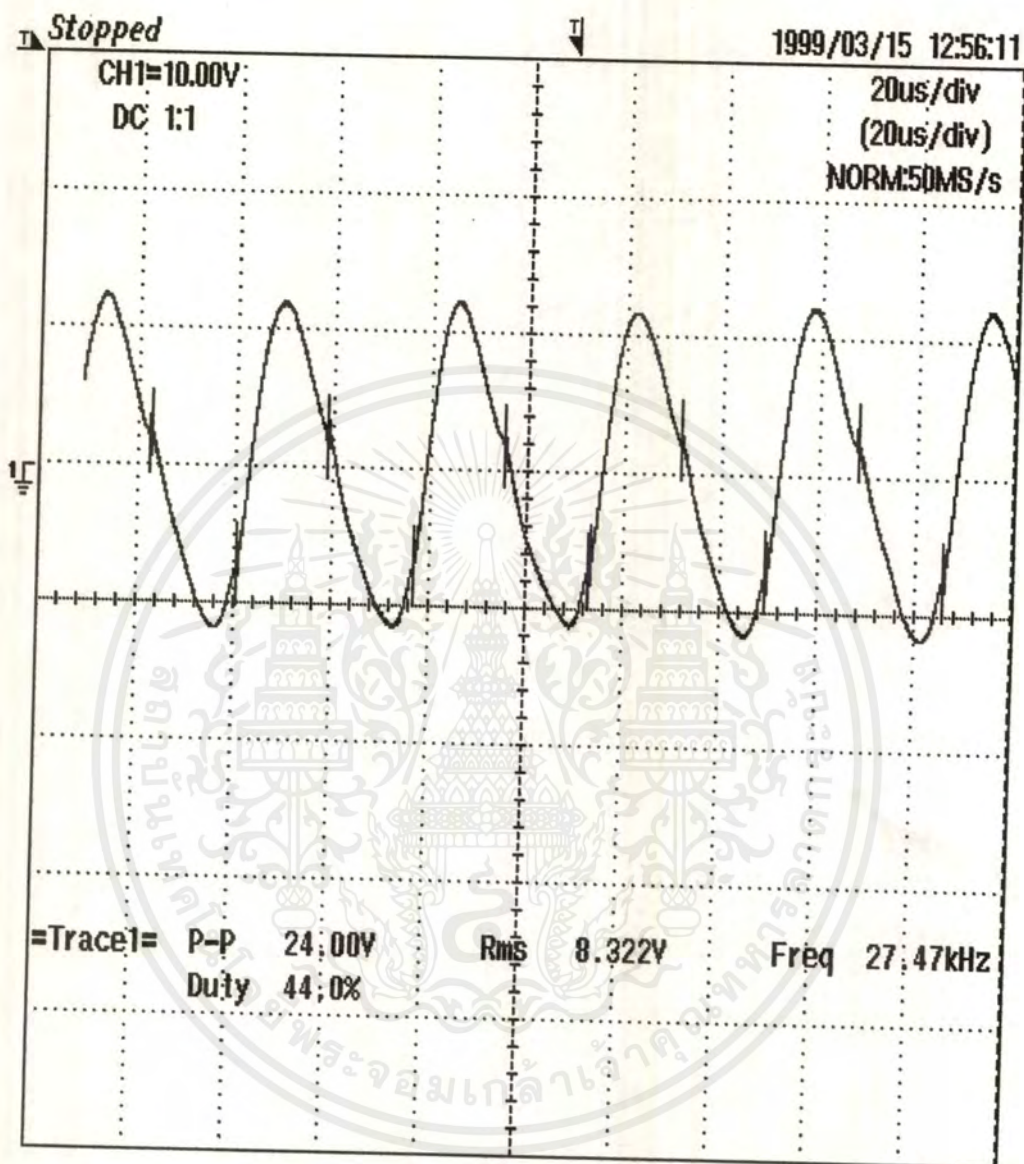
รูปที่ 4.5 แสดงการต่อวงจรกำเนิดความถี่กับวงจรขับเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรขับทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

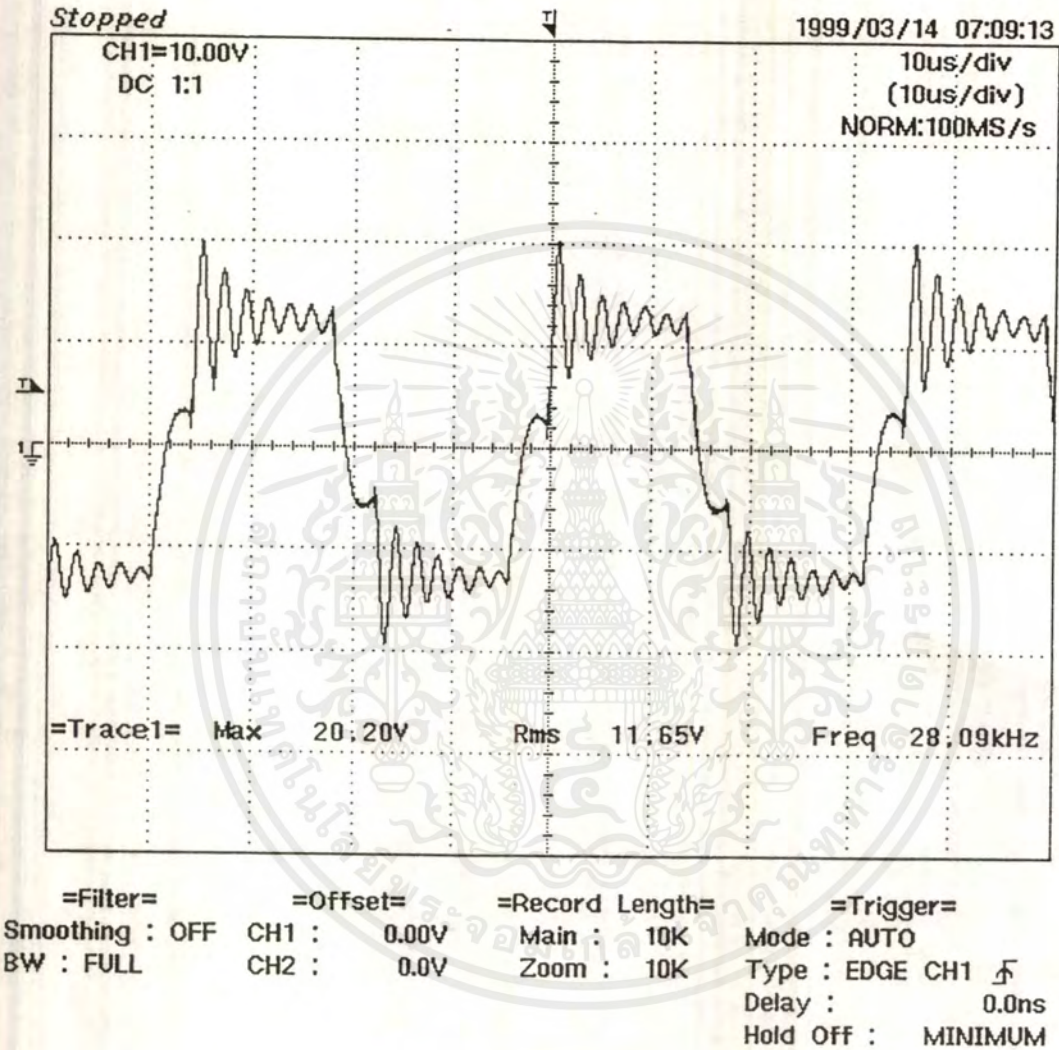


=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
Smoothing : OFF      CH1 : 0.00V      Main : 10K      Mode : AUTO  
BW : FULL      CH2 : 0.00V      Zoom : 10K      Type : EDGE CH2  $\updownarrow$   
Delay : 0.0ns  
Hold OFF : MINIMUM

รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณ โวลท์ที่เอาท์พุทขณะที่จับ โหลดและต่อ LC เรโซแนนซ์ที่เอาท์พุท

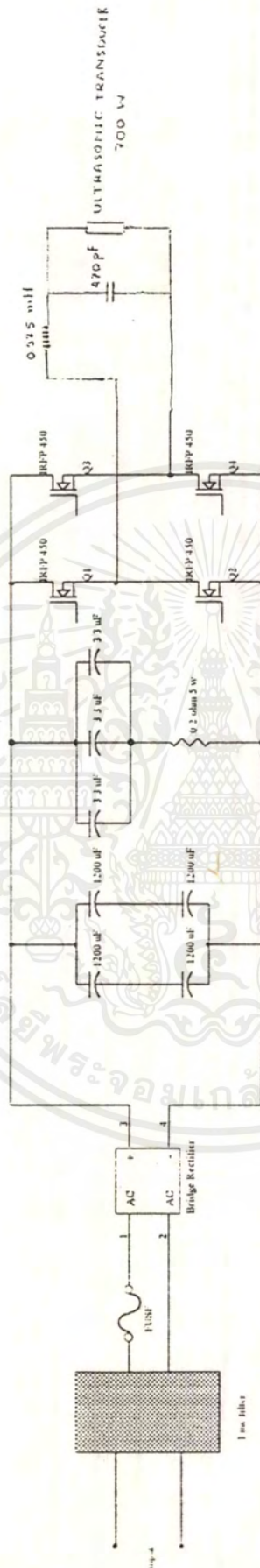
Probe\*10 ( $V_m = 50 \text{ V}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



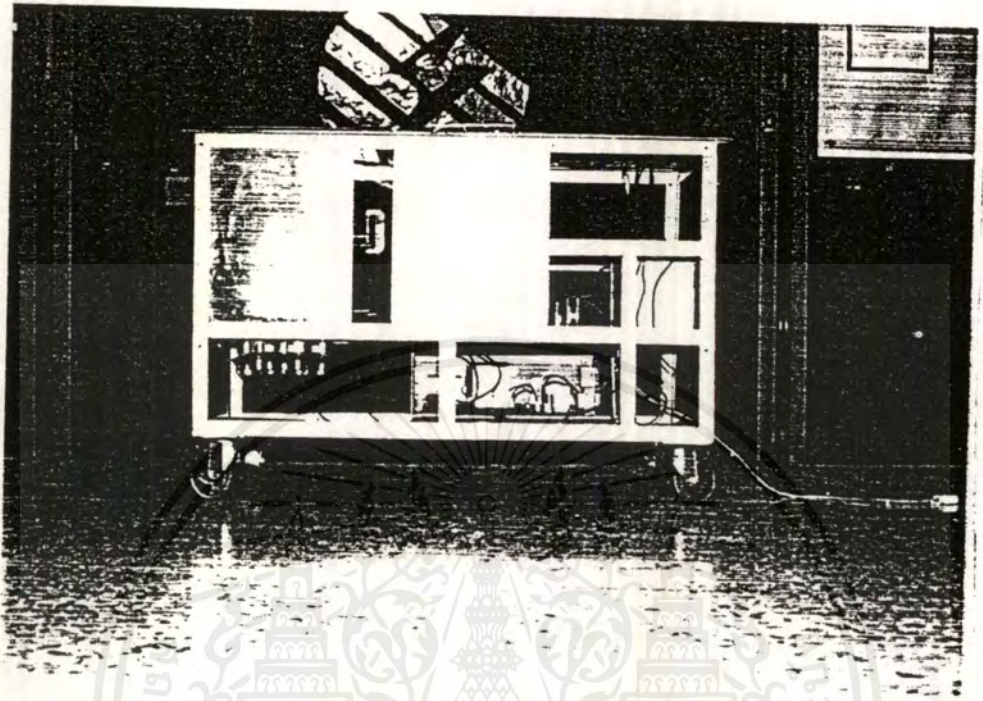
รูปที่ 4.8 แสดงคลื่นเอาต์พุตขณะที่ยังไม่ได้ต่อวงจร RLC เรโซแนนท์ (Probe \* 10,  $V_{in} = 100$  V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงการต่อวงจรกึ่งกึ่งวงจร RLC เรโซแนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงรูปโครงสร้างโครงการที่เสร็จสมบูรณ์

ผลการทดลองเมื่อยังไม่ได้ต่อ RLC เรโซแนนซ์

$V_{in}$	$I_{in}$	PF.	$Watt_{in}$	$V_{out}$	$I_{out}$	PF.	$Watt_{out}$	%Eff
50	1.22	0.72	44.10	61.6	0.68	0.59	24.7	56.83
100	2.82	0.71	200.5	117.2	1.62	0.57	108.27	54.88
150	3.49	0.72	377.83	180.8	2.13	0.52	200.25	53.02
200	3.69	0.70	532.61	230.8	2.44	0.50	276.96	52.18
220	4.48	0.70	689.92	266.3	2.82	0.48	360.46	52.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลการทดลองเมื่อต่อ RLC เรโซแนนซ์

$V_{in}$	$I_{in}$	PF.	$Watt_{in}$	$V_{out}$	$I_{out}$	PF.	$Watt_{out}$	%Eff
50	1.18	0.72	42.82	82.88	0.52	0.78	33.5	78.22
100	3.04	0.71	216.25	162.65	1.04	0.77	169.13	78.21
150	2.95	0.72	319.43	232.8	1.38	0.77	247.37	77.44
200	3.76	0.71	534.14	322.51	1.69	0.76	414.23	77.55
220	4.47	0.70	682.65	369.22	1.91	0.76	536.39	77.89

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.1) ที่ได้เมื่อยังไม่ได้ต่อวงจร RLC เรโซแนนซ์ วัตต์ (Watt) ที่ได้ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (power Factor, PF) ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากโวลท์เอ๊าท์พุทที่ได้เป็นรูปคลื่นสแควร์ (Square Wave) ดังรูปที่ 4.8 ดังนั้นจึงได้ทำการต่อวงจร RLC เรโซแนนซ์ เพื่อให้ได้รูปคลื่นเอ๊าท์พุทออกมาเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave) เพื่อที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์จะได้ดีขึ้นและทำให้ค่าวัตต์ที่ได้สูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.7 และจากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.2) จะพบว่าค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์และค่าวัตต์ที่ได้มีค่าสูงขึ้นด้วย รูปแสดงการต่อ RLC เรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 4.9

#### สรุปผลการทดลอง

เราสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 28 kHz โดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นตัวสวิตช์ ซึ่งสัญญาณการสวิตช์จะใช้ไอซี TL 494 เป็นตัวกำเนิดซึ่งสัญญาณที่ได้จะต้องผ่านวงจรแยกแอมป์แรงดันก่อนเข้าไปขับเพาเวอร์มอสเฟต เอ๊าท์พุทที่ได้จะมีเพาเวอร์แฟคเตอร์และกำลังงานต่ำ ซึ่งเราสามารถแก้ไขได้โดยใช้หลักการของ RLC เรโซแนนซ์ รูปสัญญาณและผลการทดลองต่างๆ ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์

สำหรับหลักการการทำงานของเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner) นี้ มันจะทำงานก็ต่อเมื่อ ป้อนสัญญาณรูป sine , สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมหรือสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของหัวอุลตราโซนิก เข้าไปที่หัวทรานส์ดิวเซอร์ ก็จะทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิกซึ่งเป็นคลื่นความถี่สูงขึ้นมา และคลื่นอุลตราโซนิกนี้จะถูกส่งผ่านตัวถังน้ำ หรือน้ำยาที่ใช้ในการทำความสะอาด คลื่นอุลตราโซนิกที่ได้จะมีความถี่คงที่และเป็นตัวที่กระตุ้นปฏิกิริยาควิเตชันและอิมโพลชันทำให้เกิดระลอกคลื่น ไปกระทบผิวของวัตถุที่จะทำความสะอาดด้วยแรงที่คงที่ และทำให้อนุภาคของสิ่งสกปรกที่มีขนาดเล็ก ( ประมาณ 5 micron ) ที่เกาะที่ผิววัตถุหลุดออกไปทำให้วัตถุนั้นสะอาดได้ ส่วนในขณะที่ทำการทำความสะอาดอยู่นั้นจะเกิดเสียงดังขึ้นเนื่องจากตัวถังเกิดการสั่นสะเทือนด้วย นอกจากนี้ยังมีพัดลมคอยเป่าเพื่อให้อุณหภูมิผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วแห้งเร็วขึ้น

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าหัวอุลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์จะมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ส่วนแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคตคือ จะสร้างเครื่องนี้ให้สามารถปรับความแรงของการส่งคลื่นอุลตราโซนิกเพื่อใช้ในการทำความสะอาดได้หลายระดับตามวัตถุที่จะนำมาทำความสะอาด โดยใช้ออกไซด์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเรกติไฟเออร์และผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อป้อนให้อุลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ต่อไป และควรติดตั้งสายดินเพื่อความปลอดภัยด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# ボルト締めランジュバン型振動子

ボルト締めランジュバン型振動子は、超音波の応用機器である超音波洗浄機、超音波加工機、プラスチックウェルダなど、強力超音波と呼ばれている分野で数多く使用されています。

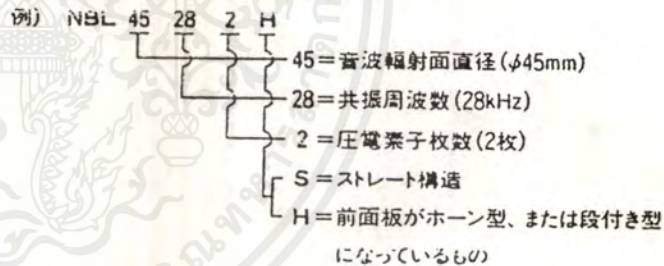
TOKINでは、このボルト締めランジュバン型振動子として高性能のネックN-61材を使用、TOKIN独自の設計により他社にないすぐれたものになっています。

## 特長

- 大振幅における機械的Qが高いため、電気音響変換効率が高い。
- 圧電素子を機械的に組み込んだ構造により振動速度が大幅に向上、大振幅で使用可能です。
- 耐熱性にすぐれたN-61材を用いて使用温度範囲を拡大したため、振幅の直線性が良好です。
- ボルトによって装置に取り付けることができるため、装着の信頼性にすぐれ、また取り付けも容易です。

## 型名

製品呼称記号は、次のように分類されています。



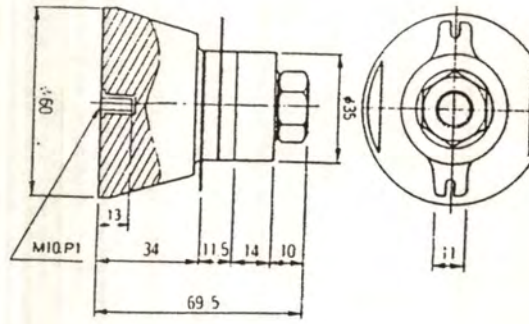
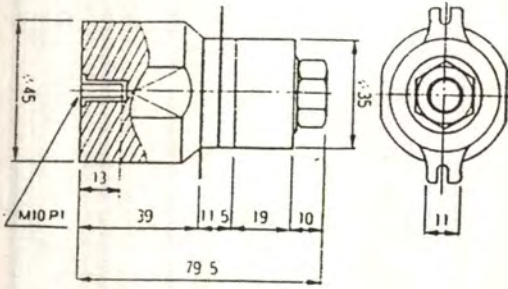
## 標準仕様

表2-1

項目	型名					
	45282H	60282H	45372H	45402H	38502H	15602S
共振周波数 $f_0$ (kHz)	28.0	28.2	37.0	40.2	53.0	60.0
自由アドミタンス $Y_0$ (mΩ)	40	30	30	15	15	20
機械的Q $Q_m$	500	500	500	500	500	500
静電容量 $C$ (pF)	4000	4000	3000	4000	2900	800
最大許容速度 $V$ (cm/s)	40	25	30	50	40	50
最大許容入力 $P$ (W)	70	70	45	70	45	8

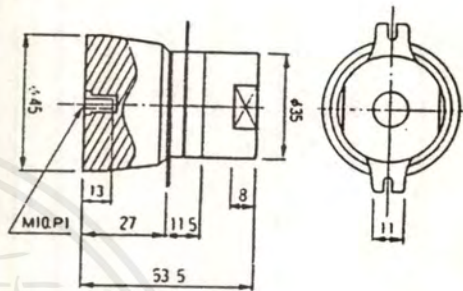
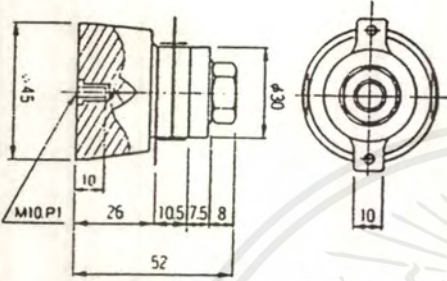
最大許容入力は、1本使用の場合、片面水負荷時、

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



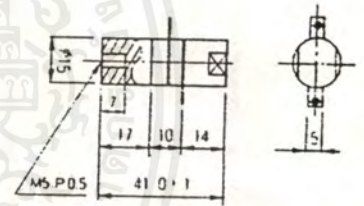
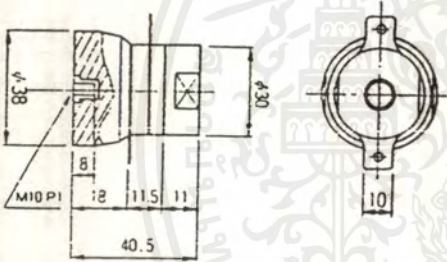
NBL-45372H

NBL-45402H-A



NBL-38502H-A

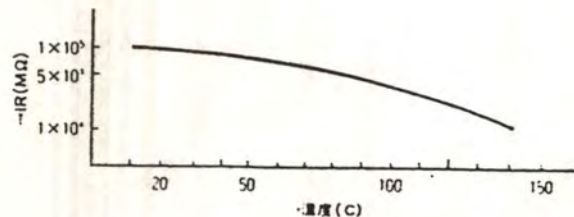
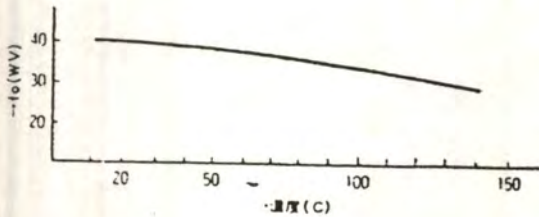
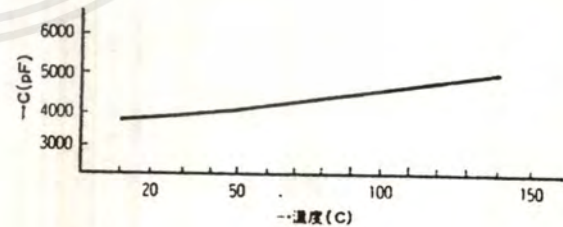
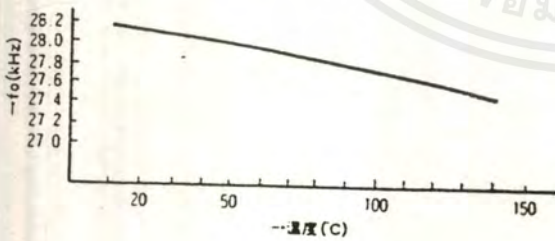
NBL-15602S



第2-1図

(mm)

温度特性

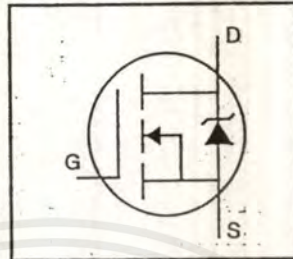


第2-2図 NBL-45282H温度特性

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DSS} = 500V$$

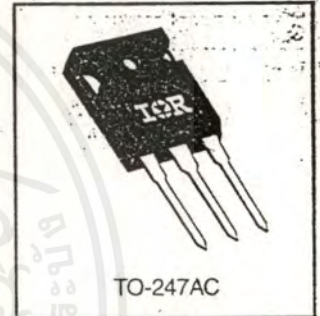
$$R_{DS(on)} = 0.40\Omega$$

$$I_D = 14A$$

### Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	14	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	8.7	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	56	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	190	W
	Linear Derating Factor	1.5	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ②	760	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current ①	8.7	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ①	19	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	3.5	V/ns
$T_J$	Operating Junction and	-55 to +150	°C
$T_{STG}$	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1 N·m)	

### Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.65	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

# IRFP450



## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}$ , $I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.40	$\Omega$	$V_{GS}=10V, I_D=8.4A$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	9.3	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=8.4A$ ①
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS}=500V, V_{GS}=0V$
		—	—	250		$V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS}=-20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	150	nC	$I_D=14A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	20		$V_{DS}=400V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	80		$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ①
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	17	—	ns.	$V_{DD}=250V,$ $I_D=14A$
$t_r$	Rise Time	—	47	—		$R_G=6.2\Omega$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	92	—		$R_D=17\Omega$ See Figure 10 ①
$t_f$	Fall Time	—	44	—		
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	13	—		
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	2600	—	pF	$V_{GS}=0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	720	—		$V_{DS}=25V$
$C_{riss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	340	—		$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	14	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	56		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.4	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=14A, V_{GS}=0V$ ②
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	540	810	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=14A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	4.8	7.2	$\mu C$	$di/dt=100A/\mu s$ ②
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S+L_D$ )				

### Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ②  $V_{DD}=50V$ , starting  $T_J=25^\circ\text{C}$ ,  $L=7.0\text{mH}$ ,  $R_G=25\Omega$ ,  $I_S=14A$  (See Figure 12)
- ③  $I_{SD} \leq 14A$ ,  $di/dt \leq 130A/\mu s$ ,  $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$ ,  $T_J \leq 150^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width  $\leq 300 \mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

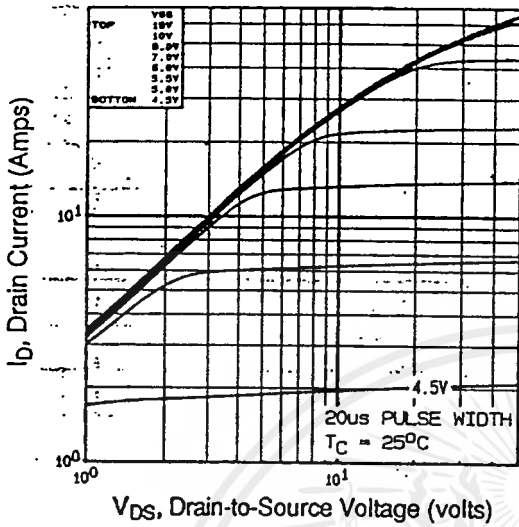


Fig 1. Typical Output Characteristics,  $T_C=25^\circ\text{C}$

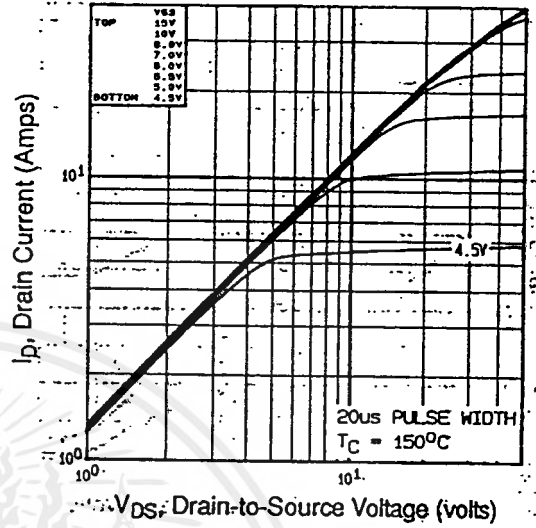


Fig 2. Typical Output Characteristics,  $T_C=150^\circ\text{C}$

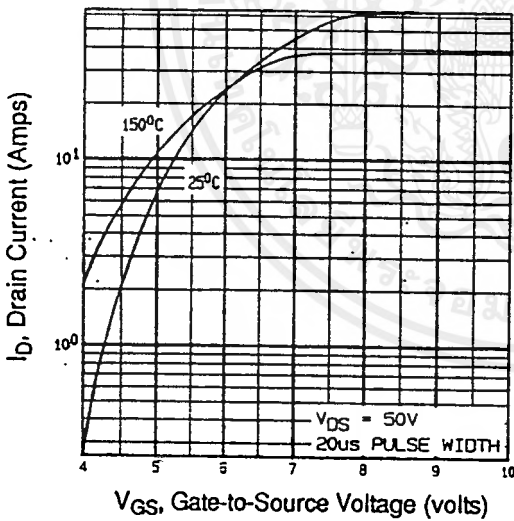


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

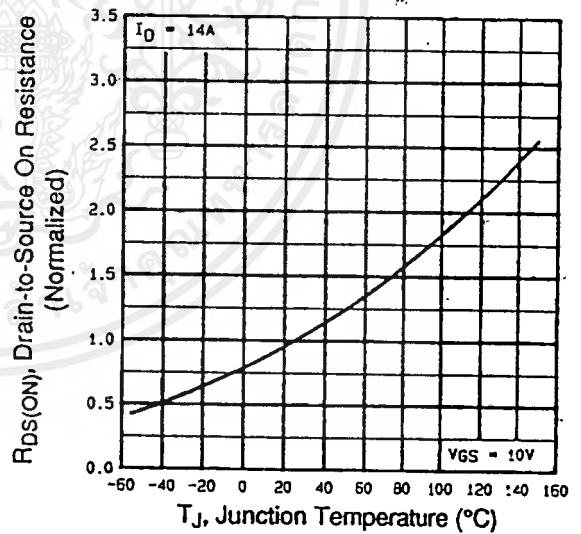


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

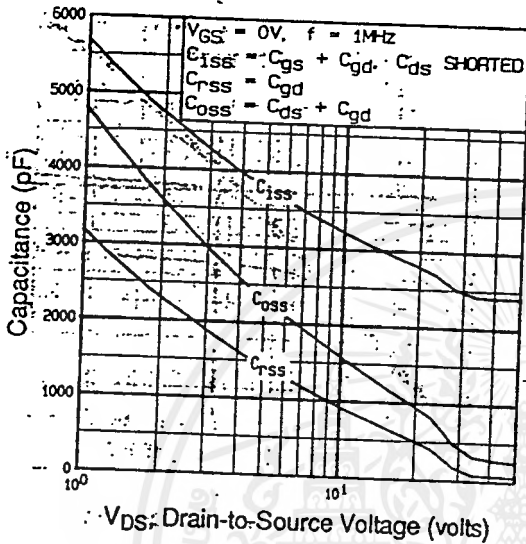


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

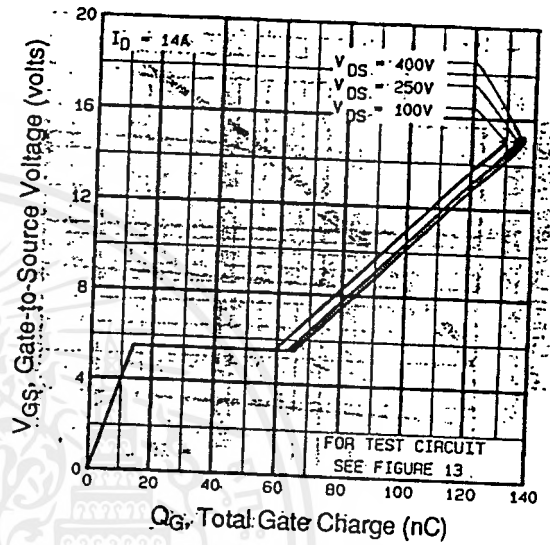


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

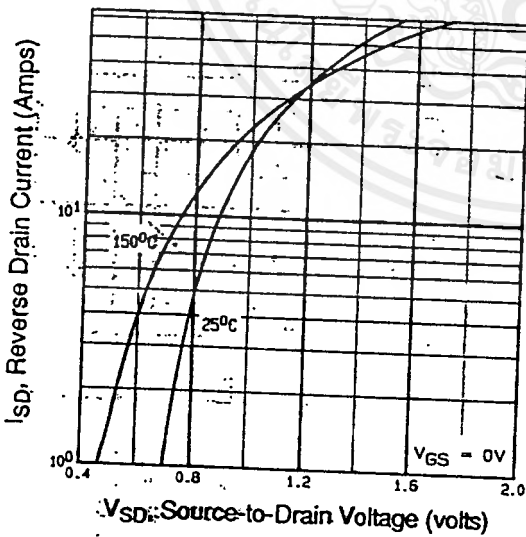


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

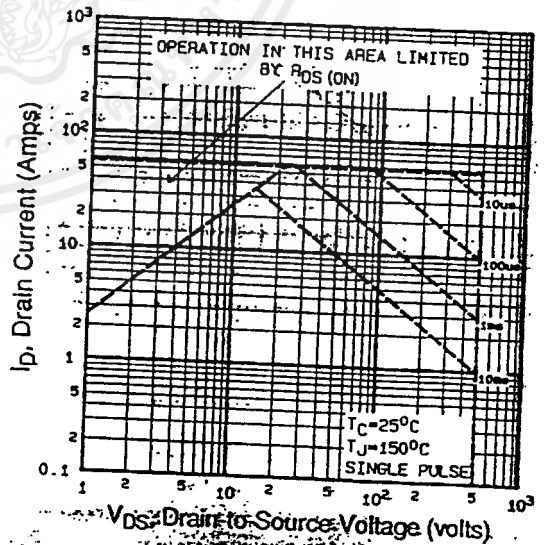


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

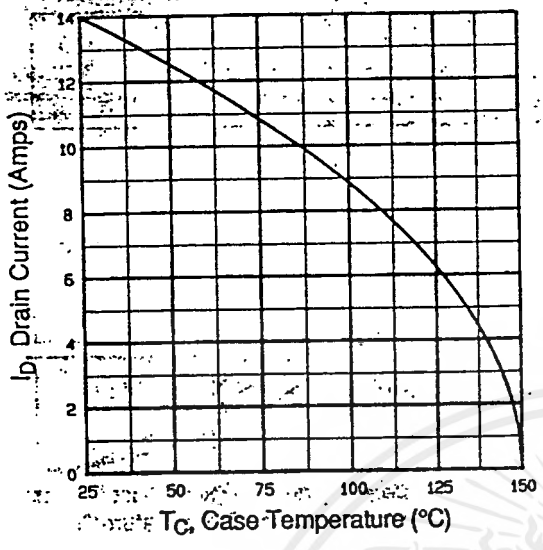


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

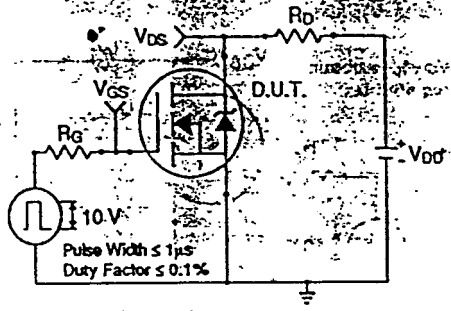


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

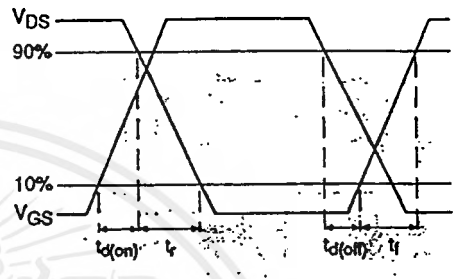


Fig 10b. Switching Time Waveforms

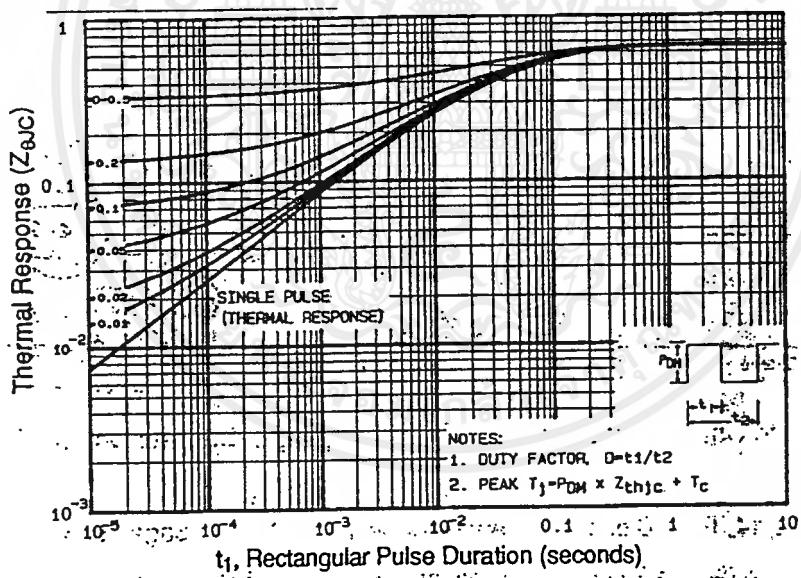


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

DATA SHEETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

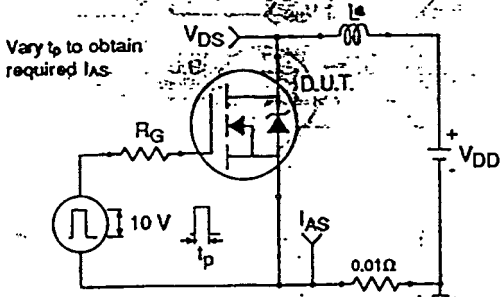


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

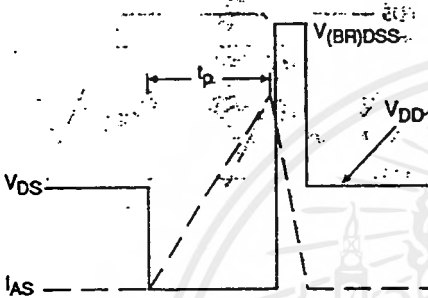


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

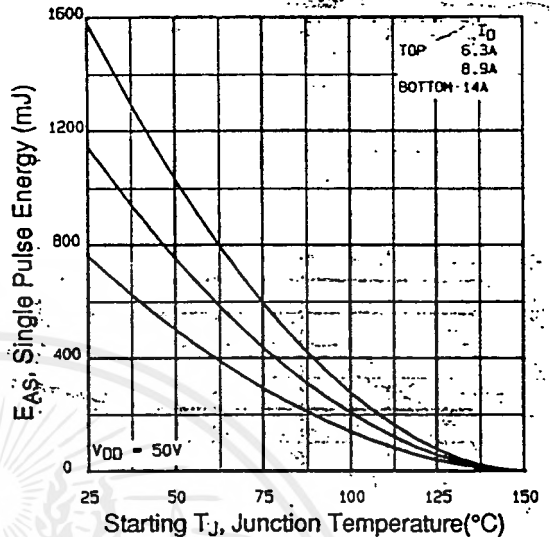


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

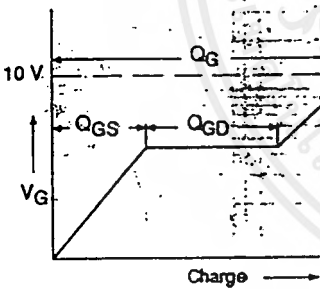


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

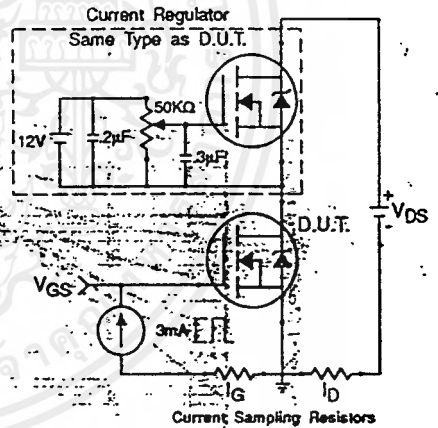


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery  $dv/dt$  Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517

International  
IR Rectifier

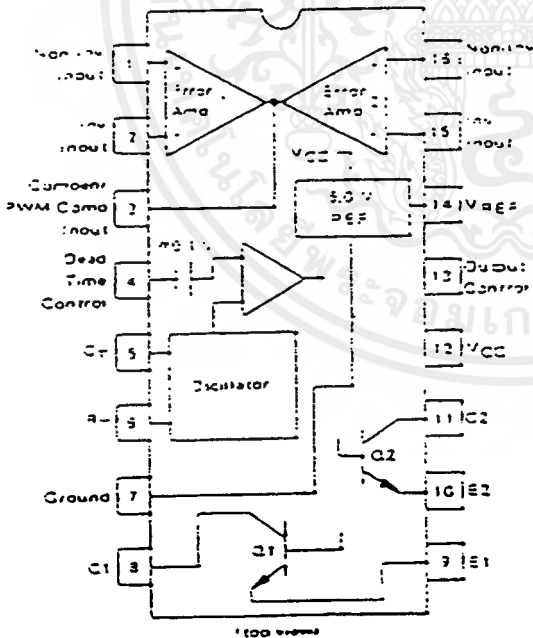


**MOTOROLA**

**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

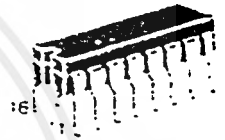


The TL494C is specified over the commercial operating range of 0°C to 70°C. The TL494I is specified over the industrial range of -25°C to 85°C. The TL494M is specified over the full military range of -55°C to 125°C.

**TL494**

**SWITCHMODE  
PULSE WIDTH MODULATION  
CONTROL CIRCUITS**

**SILICON MONOLITHIC  
INTEGRATED CIRCUITS**



J SUFFIX  
CERAMIC PACKAGE  
CASE 520-10



N SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 548-05

**ORDERING INFORMATION**

Device	Temperature Range	Package
TL494CN	0° to -70°C	Plastic DIP
TL494CI	0° to -70°C	Ceramic DIP
TL494IN	-25° to -85°C	Plastic DIP
TL494IJ	-25° to -85°C	Ceramic DIP
TL494MJ	-55° to -125°C	Ceramic DIP

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

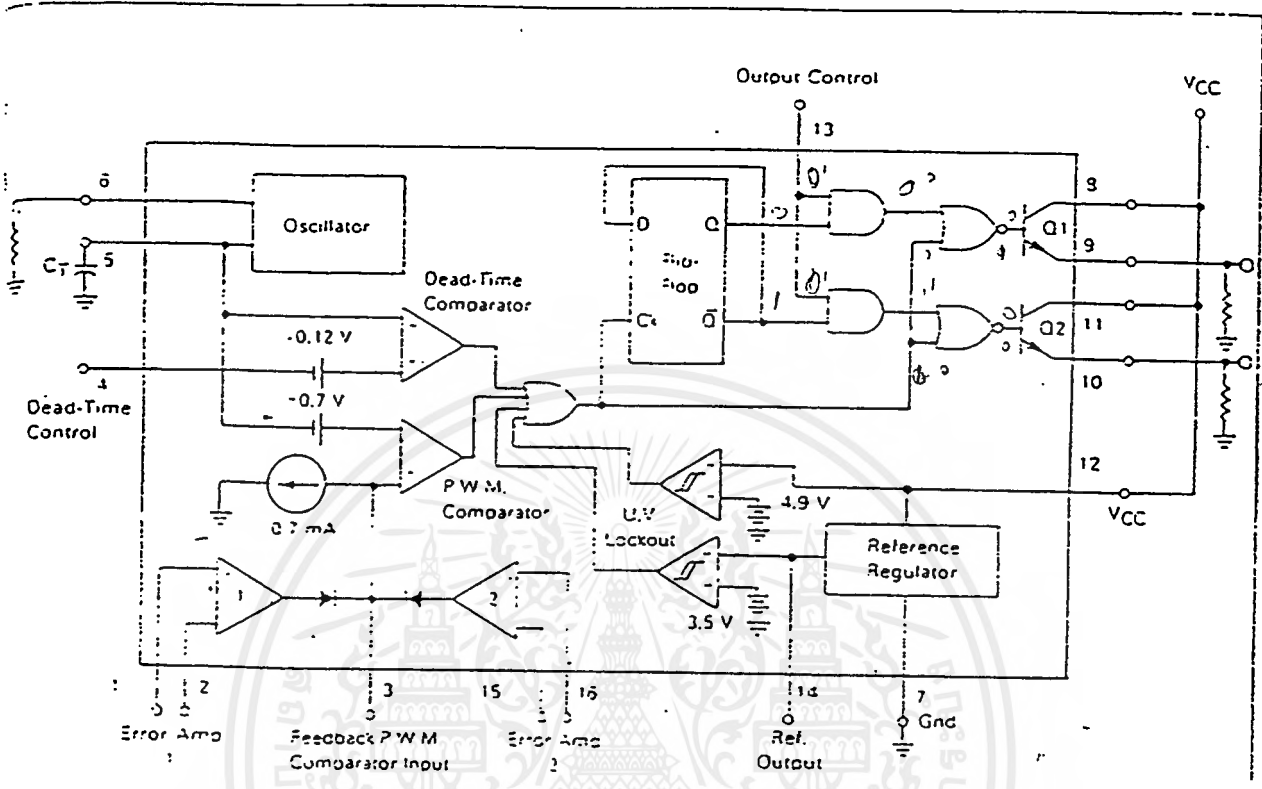
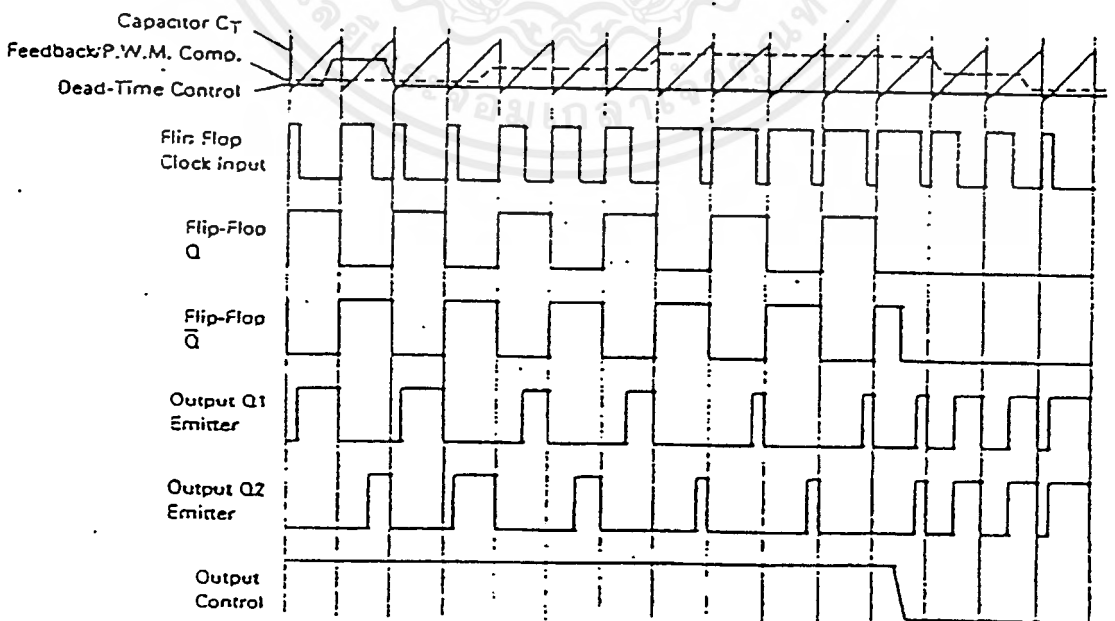


FIGURE 2 — TIMING DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 1

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 56% 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 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  $(V_{CC} - 2V)$ , 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	$\frac{I_{OUT}}{I_{OSC}} =$
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	$V_{in}$	-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.

### TERMAL 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	$R_T$	1.3	30	500	$k\Omega$
Timing Capacitor	$C_T$	0.0047	0.001	10	$\mu\text{F}$
Modulator Frequency	$f_{osc}$	1.0	40	200	kHz

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

Characteristic	Symbol	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Reference Voltage ( $I_D = 1.0\ \text{mA}$ )	$V_{ref}$	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 ( $I_D = 1.0\ \text{mA}$ to $10\ \text{mA}$ )	$Reg_{load}$	—	3.0	15	—	3.0	15	mV
Short-Circuit Output Current ( $V_{ref} = 0\ \text{V}$ )	$I_{SC}$	15	35	75	15	25	75	mA

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	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>OUTPUT SECTION</b>								
Collector Off-State Current ( $V_{CC} = 40\text{ V}$ , $V_{CE} = 40\text{ V}$ )	$I_{C(OFF)}$	—	2.0	100	—	2.0	100	$\mu\text{A}$
Emitter Off-State Current ( $V_{CC} = 40\text{ V}$ , $V_C = 40\text{ V}$ , $V_E = 0\text{ V}$ )	$I_{E(OFF)}$	—	—	-100	—	—	-150	$\mu\text{A}$
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	—	$\mu\text{A}$
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) Emitter-Follower (See Figure 14)	$t_r$	—	100	200	—	100	200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14)	$t_f$	—	25	100	—	25	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)	$I_B$	—	-0.1	-1.0	$\mu\text{A}$
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 ( $\Delta V_O = 3.0\text{ V}$ , $V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$A_{VOL}$	70	95	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ( $V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$f_c$	—	350	—	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ( $V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$\phi_m$	—	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 ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 4 — OSCILLATOR FREQUENCY versus TIMING RESISTANCE

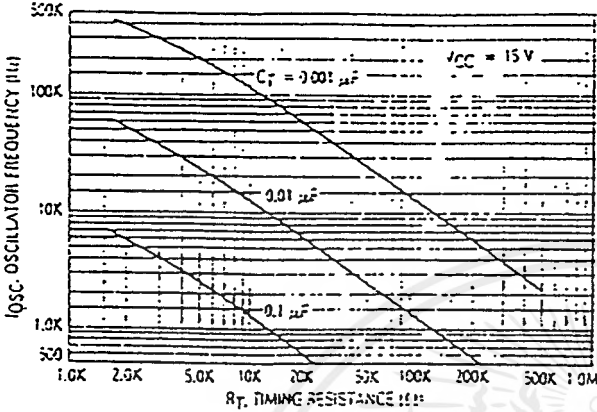


FIGURE 5 — OPEN-LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE versus FREQUENCY

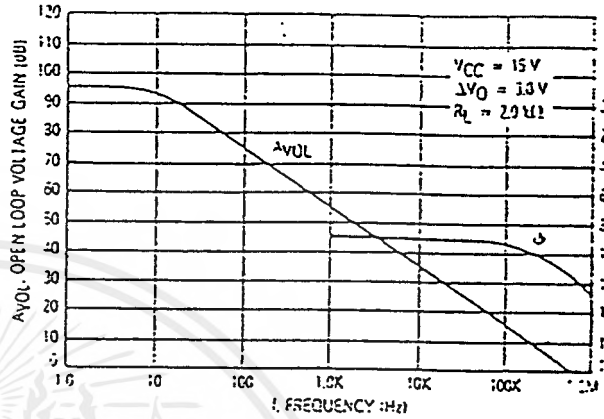


FIGURE 6 — PERCENT DEAD-TIME versus OSCILLATOR FREQUENCY

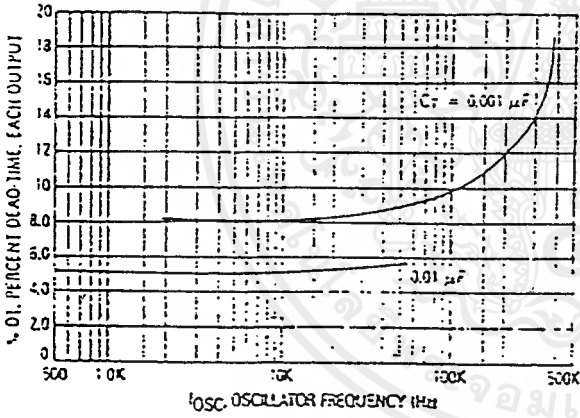


FIGURE 7 — PERCENT DUTY CYCLE versus DEAD-TIME CONTROL VOLTAGE

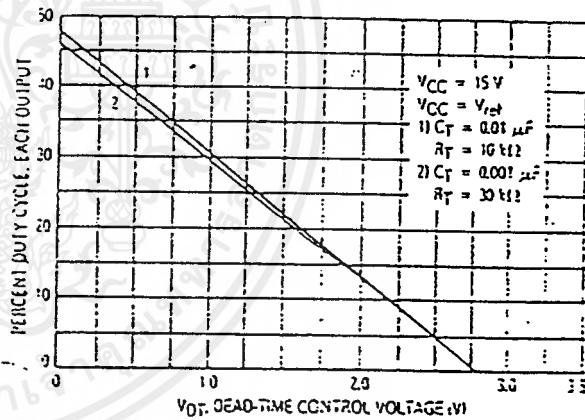


FIGURE 8 — EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus EMITTER CURRENT

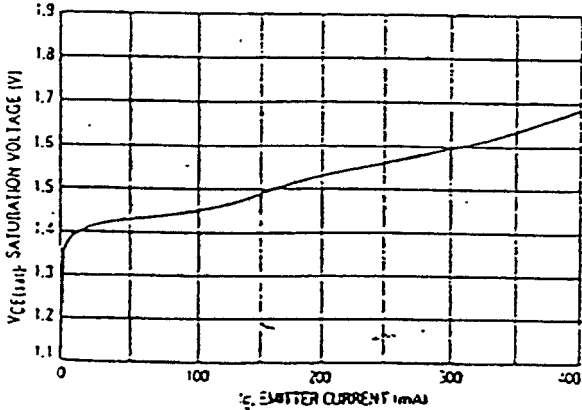
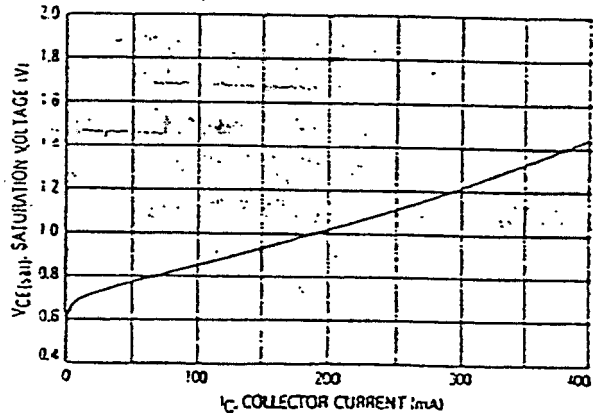


FIGURE 9 — COMMON EMITTER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus COLLECTOR CURRENT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1494

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	
<b>WIM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 12)</b>					
Output Threshold Voltage (Zero duty cycle)	$V_{TH}$	—	3.5	4.5	V
Output Sink Current ( $V_{Pin\ 3} = 0.7\ \text{V}$ )	$I_{-}$	0.3	0.7	—	mA
<b>LOAD-TIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 12)</b>					
Output Bias Current (Pin 4) ( $V_{Pin\ 4} = 0$ to $5.25\ \text{V}$ )	$I_B$ (DT)	—	-2.0	-10	$\mu\text{A}$
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ( $V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$ , $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ ) ( $V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$ , $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$DC_{max}$	45	48	50	%
Output Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	$V_{TH}$	— 0	2.8	3.3	V
<b>OSCILLATOR SECTION</b>					
Frequency ( $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$f_{osc}$	—	40	—	kHz
Standard Deviation of Frequency* ( $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$\sigma_{f_{osc}}$	—	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	%
<b>UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION</b>					
Turn-On Threshold ( $V_{CC}$ Increasing, $I_{ref} = 0\ \text{mA}$ )	$V_{UL}$	5.5	6.43	7.0	V
<b>TOTAL DEVICE</b>					
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 ( $V_{Pin\ 4} = 2.0\ \text{V}$ ) (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 ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 10 — STANDBY SUPPLY CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE

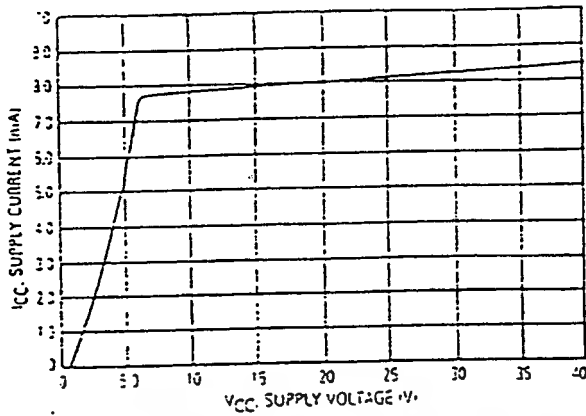


FIGURE 11 — ERROR AMPLIFIER CHARACTERISTICS

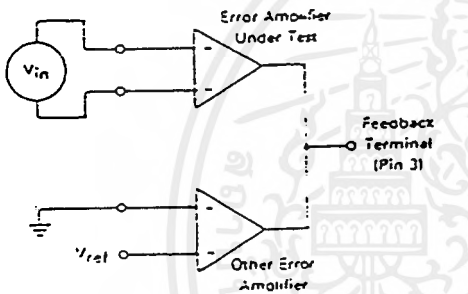


FIGURE 12 — DEAD-TIME AND FEEDBACK CONTROL TEST CIRCUIT

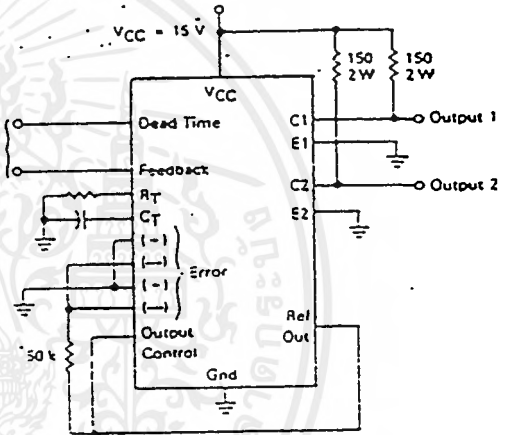


FIGURE 13 — COMMON-EMITTER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM

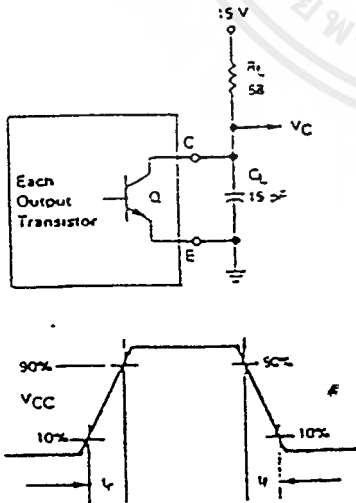
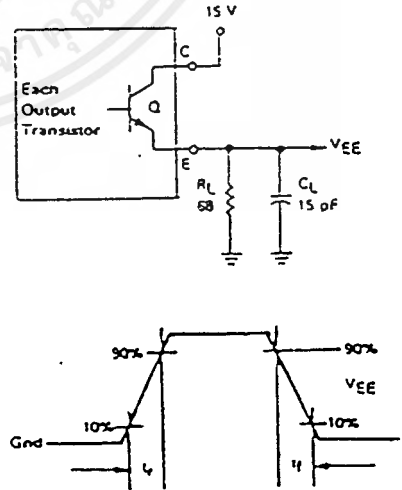


FIGURE 14 — EMITTER-FOLLOWER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 19 — SLAVING TWO OR MORE CONTROL CIRCUITS

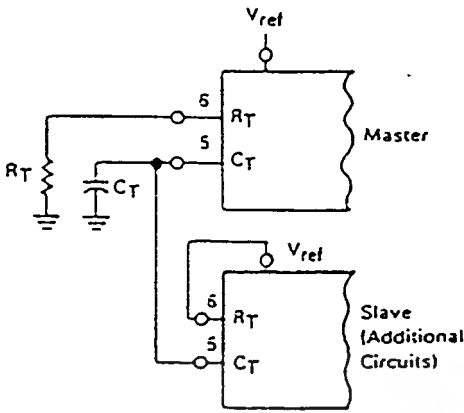


FIGURE 20 — OPERATION WITH  $V_{IN} > 40$  V USING EXTERNAL ZENER

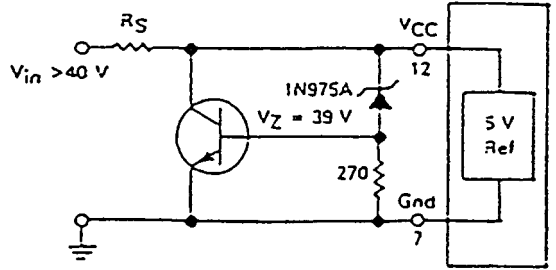
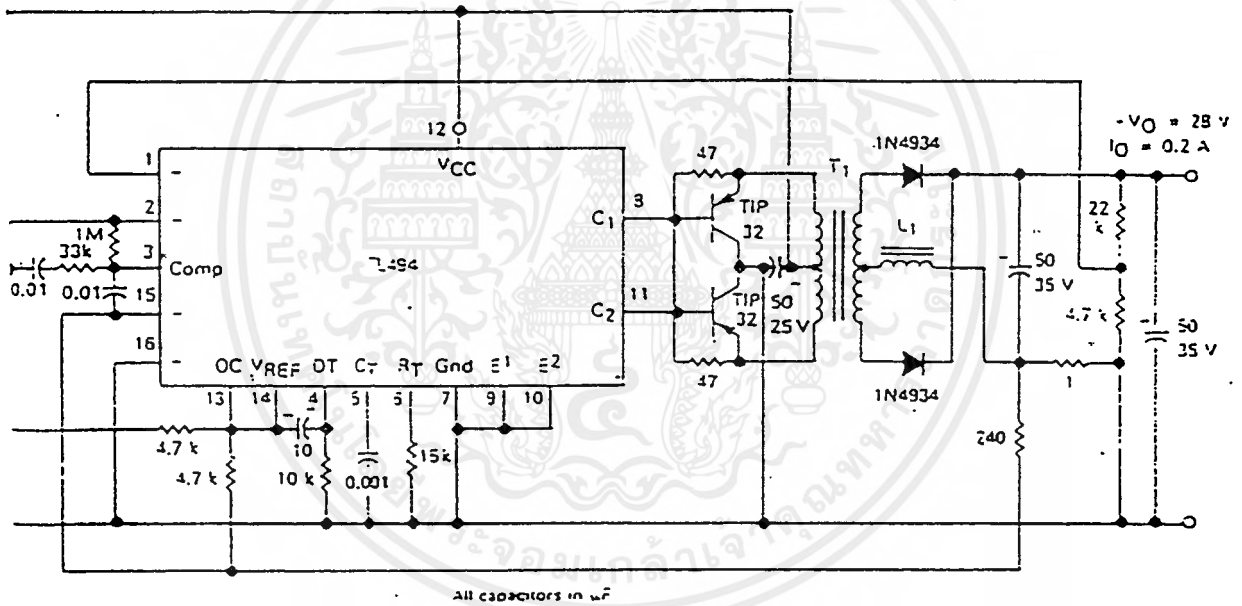


FIGURE 21 — PULSE-WIDTH MODULATED PUSH-PULL CONVERTER

$V_{in} = 8.0$  to  $20$  V

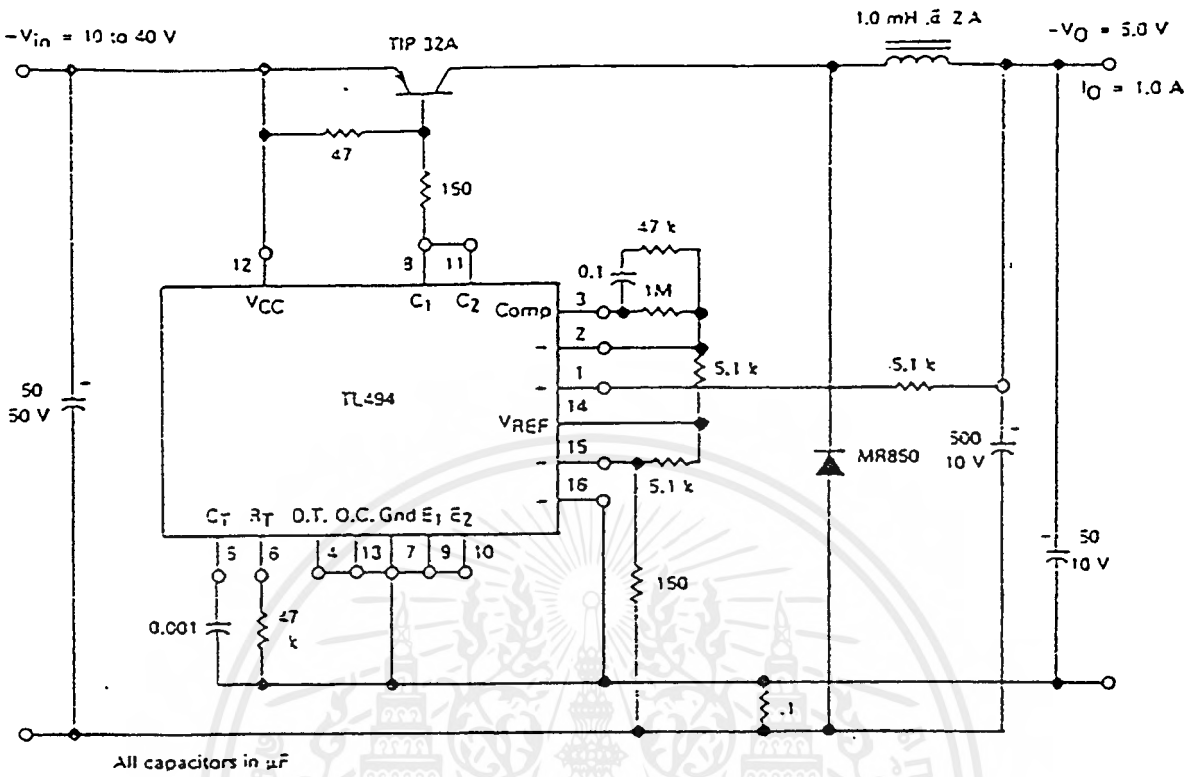


- L1 — 3.5 mH @ 0.3 A
- T1 — Primary: 20T C.T. #28 AWG  
Secondary: 120T C.T. #36 AWG  
Core: Ferroxcube 1408P-L03-3C8

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	65 mV P-P P.A.R.O.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28$ V, $R_L = 0.1 \Omega$	1.6 amps
Efficiency	$V_{in} = 28$ V, $I_O = 1$ A	71%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

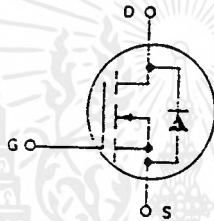
MOTOROLA  
SEMICONDUCTOR  
TECHNICAL DATA

**IRF510**  
**IRF511**  
**IRF512**  
**IRF513**

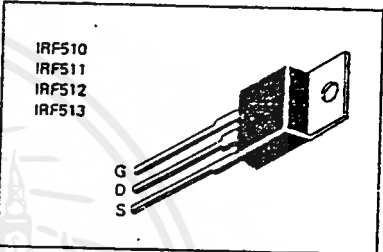
**N-CHANNEL ENHANCEMENT-MODE SILICON GATE  
TMOS POWER FIELD EFFECT TRANSISTOR**

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 <sub>DS</sub>	r <sub>DS(on)</sub>	I <sub>D</sub>
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



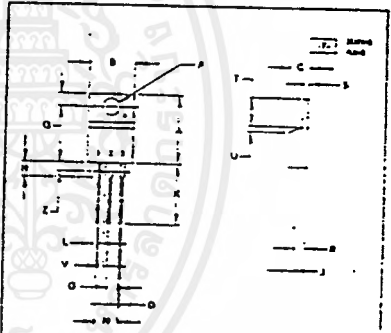
**MAXIMUM RATINGS**

Rating	Symbol	IRF				Unit
		510	511	512	513	
Drain-Source Voltage	V <sub>DSS</sub>	100	60	100	60	V <sub>dC</sub>
Drain-Gate Voltage (R <sub>GS</sub> = 1.0 MΩ)	V <sub>DGR</sub>	100	50	100	60	V <sub>dC</sub>
Gate-Source Voltage	V <sub>GS</sub>	= 20				V <sub>dC</sub>
Continuous Drain Current T <sub>C</sub> = 25°C	I <sub>D</sub>	4.0	4.0	3.5	3.5	A <sub>dC</sub>
Continuous Drain Current T <sub>C</sub> = 100°C	I <sub>D</sub>	2.5	2.5	2.0	2.0	A <sub>dC</sub>
Drain Current Pulsed	I <sub>DM</sub>	16	16	14	14	A <sub>dC</sub>
Total Power Dissipation @ T <sub>C</sub> = 25°C Derate above 25°C	P <sub>D</sub>	20				Watts
		0.16				W/°C
Operating and Storage Temperature Range	T <sub>J,Storage</sub>	-55 to 150				°C

**THERMAL CHARACTERISTICS**

Thermal Resistance	R <sub>θJC</sub> R <sub>θJA</sub>	6.4 62.5	°C/W
Junction to Case	R <sub>θJC</sub>	6.4	
Junction to Ambient	R <sub>θJA</sub>	62.5	
Maximum Lead Temp. for Soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	T <sub>L</sub>	300	°C

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



- NOTES:  
1. DIMENSIONS AND TOLERANCES PER AND  
MIL-STD-883C, CLASS B, METHOD 208  
2. CONTROLLING DIMENSIONS FOR  
3. DIM 2 DEFINES A ZONE WHERE ALL BODY AND  
LEAD IRREGULARITIES ARE ALLOWED

	MILLIMETERS	NOTES
1	1.00 ± 0.05	1.00 ± 0.05
2	1.40 ± 0.05	1.40 ± 0.05
3	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
4	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
5	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
6	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
7	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
8	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
9	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
10	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
11	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
12	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
13	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
14	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
15	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
16	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
17	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
18	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
19	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05
20	1.27 ± 0.05	1.27 ± 0.05

CASE 221A-04  
TO-220AB

MOTOROLA TMOS POWER MOSFET DATA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRF510-513

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T<sub>C</sub> = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Drain-Source Breakdown Voltage (V <sub>GS</sub> = 0, I <sub>D</sub> = 250 μA)	V <sub>(BR)DSS</sub>	100	—	—	V <sub>dc</sub>
Zero Gate Voltage Drain Current (V <sub>GS</sub> = 0 V, V <sub>DS</sub> = Rated V <sub>DSS</sub> ) (V <sub>GS</sub> = 0 V, V <sub>DS</sub> = 0.8 Rated V <sub>DSS</sub> , T <sub>C</sub> = 125°C)	I <sub>DSS</sub>	—	—	0.25 1.0	mAdc
Forward Gate-Body Leakage Current (V <sub>GS</sub> = 20 V, V <sub>DS</sub> = 0)	I <sub>GSSF</sub>	—	—	100	nAdc
Reverse Gate-Body Leakage Current (V <sub>GS</sub> = -20 V, V <sub>DS</sub> = 0)	I <sub>GSSR</sub>	—	—	-100	nAdc
<b>ON CHARACTERISTICS*</b>					
Gate Threshold Voltage (V <sub>DS</sub> = V <sub>GS</sub> , I <sub>D</sub> = 250 μA)	V <sub>GS(th)</sub>	2.0	—	4.0	V <sub>dc</sub>
On-State Drain Current (V <sub>DS</sub> = 25 V, V <sub>GS</sub> = 10 V)	I <sub>D(on)</sub>	4.0 3.5	—	—	Adc
Static Drain-Source On-Resistance (V <sub>GS</sub> = 10 V, I <sub>D</sub> = 2.0 A)	r <sub>DS(on)</sub>	—	—	0.6 0.8	Ohms
Forward Transconductance (V <sub>DS</sub> = 15 V, I <sub>D</sub> = 2.0 A)	g <sub>FS</sub>	1.0	—	—	mhos
<b>DYNAMIC CHARACTERISTICS</b>					
Input Capacitance	C <sub>iss</sub>	—	—	150	pF
Output Capacitance	C <sub>oss</sub>	—	—	100	pF
Reverse Transfer Capacitance	C <sub>rss</sub>	—	—	25	pF
<b>SWITCHING CHARACTERISTICS* (T<sub>J</sub> = 100°C)</b>					
Turn-On Delay Time	t <sub>d(on)</sub>	—	—	20	ns
Rise Time	t <sub>r</sub>	—	—	25	ns
Turn-Off Delay Time	t <sub>d(off)</sub>	—	—	35	ns
Fall Time	t <sub>f</sub>	—	—	20	ns
<b>SOURCE DRAIN DIODE CHARACTERISTICS*</b>					
Forward On-Voltage	V <sub>SD</sub>	—	2.0	—	V <sub>dc</sub>
Forward Turn-On Time	t <sub>on</sub>	Limited by stray inductance			
Reverse Recovery Time	t <sub>rr</sub>	—	230	—	ns
<b>INTERNAL PACKAGE INDUCTANCE (TO-220)</b>					
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 <sub>D</sub>	—	3.5 4.5	—	nH
Internal Source Inductance (Measured from the source lead 0.25" from package to source bond pad.)	L <sub>S</sub>	—	7.5	—	nH

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

RESISTIVE SWITCHING

FIGURE 1 — SWITCHING TEST CIRCUIT

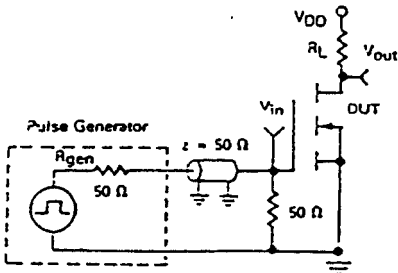
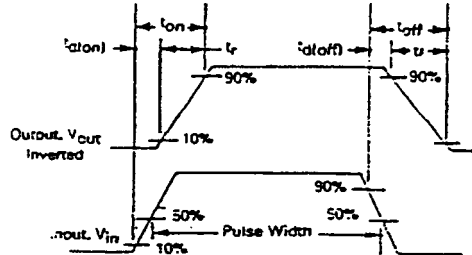


FIGURE 2 — SWITCHING WAVEFORMS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. ประภาส ไพรสุวรรณ และอาจารย์อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์  
ที่ปรึกษาที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. ดร. มงคล เดชนครินทร์ และ ดร. ชาตรี ศรีไชยพรรณ, “อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน “ , บริษัทซีเอดีเคชั่น จำกัด
2. มงคล ทองสงคราม, “อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น “ , ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี เจ พรินต์ติ้ง มงคล ทองสงคราม, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, มิถุนายน 2536
3. “บันทึกประกอบคำบรรยายวิจัยพื้นฐาน “ , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2522
4. สุวัฒน์ ตัน, “เทคนิคและการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย“, บริษัท เอนเทลไทย จำกัด มกราคม 2537
5. Daniel W. Hart, “ Introduction to Power Electronic “ , Prentice - Hall International , INC , 1997

