

วงจรรวมแปลงความถี่วิทยุเป็นไฟตรงสำหรับสมาร์ทการ์ดไร้สัมผัส
RF-to-DC Analog Integrated Circuit for Contactless Smart Card



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง วงจรรวมแปลงความถี่วิทยุเป็นไฟตรงสำหรับสมาร์ทการ์ดไร้สัมผัส

RF-to-DC Analog Integrated Circuit for Contactless Smart Card

ผู้จัดทำ

นายศรีวิชัย พรมเสนา




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.อภินันท์ ชนชยานนท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรวมแปลงความถี่วิทยุเป็นไฟตรงสำหรับสมาร์ทการ์ดไร้สัมผัส

RF-to-DC Analog Integrated Circuit for Contactless Smart Card

นายศรีวิชัย พรมเสนา รหัส 43010424

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรักษาแรงดันสำหรับสมาร์ทการ์ด

ศรวิชัย พรหมเสนา

ผศ.ดร.อภิวัฒน์ ธนชยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรในส่วนของวงจรรักษาแรงดัน (voltage regulator) ขนาด 3.3 โวลต์ และวงจรถัดแรงดัน (RF limiter) ที่ใช้ในวงจรรักษาของสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส (contactless smartcard) ทำงานที่ความถี่ 13.56 MHz ทำงานโดยไม่อาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ โดยมีวงจรเรียงกระแสทำหน้าที่จัดแรงดันไฟตรงแบบเต็มคลื่น (full-wave rectifier) ที่เหนี่ยวนำจากคอยล์เพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยงแก่สมาร์ทการ์ด ในส่วนของวงจรรักษาแรงดันได้ใช้เทคนิคของวงจร Bandgap reference เพื่อสร้างเสถียรภาพที่ดีของระดับแรงดันไฟเลี้ยง ส่วนวงจรถัดแรงดัน ใช้เทคนิคของแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) ของมอสทรานซิสเตอร์ โดยนำมอสทรานซิสเตอร์หลายๆตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อทำหน้าที่คล้ายซีเนอร์ไดโอด (zener diode) แล้วจัดวงจรในลักษณะ shunt regulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analog Circuits for Smart Card

Sriwichai Promsena

Asst.Prof.Dr. Apinunt Thanachayanont Adviser

2003

Abstract

This thesis presents some parts of analog CMOS integrated circuits used in contactless smart card operating at 13.56MHz carrier frequency. The voltages used in the circuits is induced from a coil in smart card, thus this thesis describes the full-wave rectifier and shunt regulator circuits using MOSFET providing power for the batteryless smart card. Bandgap reference circuit is used performing temperature-independent voltages for excellent stability. Significantly, RF limiter is used in order to limit exceeding induced voltages using zener diode configuration.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 เหตุผลในการศึกษาการออกแบบวงจรรวม	2
1.2 เหตุผลที่เลือกออกแบบโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์	3
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตงานที่ทำ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีมอสทรานซิสเตอร์	6
2.1 ชนิดของมอสทรานซิสเตอร์	6
2.2 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์	8
บทที่ 3 ทฤษฎีวงจรที่ใช้ในการทดลอง	16
3.1 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดสองขดลวด	16
3.2 ระบบสมาร์ตการ์ดแบบไร้สัมผัส (Contactless Smart Card system)	18
3.3 วงจรจำกัดแรงดัน(RF Limiter Circuit)	20
3.4 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator)	28
บทที่ 4 การคำนวณและการออกแบบวงจร	31
4.1 การจำลองแหล่งจ่ายแรงดันจากชุดเรโซแนนท์	31
4.2 การออกแบบวงจรจำกัดแรงดัน RF Limiter	33
4.3 การออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดัน	38
4.4 การออกแบบวงจรเรียงกระแส (Rectifier)	45
4.5 การออกแบบวงจร Bandgap Reference	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 การทดลอง	50
5.1 การทดลองวงจรจำกัดแรงดัน (RF Limiter)	50
5.2 การทดลองวงจรรักษาระดับแรงดันและวงจร Bandgap Reference	52
5.3 การทดลองวงจรทั้งระบบ	56
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	64
6.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองวงจรจำกัดแรงดัน	64
6.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองวงจรรักษาระดับแรงดัน และวงจร Bandgap Reference	64
6.3 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองวงจรทั้งระบบ	64
6.4 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขเพื่อพัฒนาต่อ	65
ภาคผนวก	67
หนังสืออ้างอิง	70
กิตติกรรมประกาศ	71

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรอนุบาล็อกที่ทำการศึกษา	2
รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์	6
รูปที่ 2.2 มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลที่ต่อขาบอดี้เข้ากับไฟเลี้ยงบวก เพื่อป้องกันการเกิดไบอัสตรง ณ บริเวณรอยต่อระหว่างบอดี้กับซอร์ส	7
รูปที่ 2.3 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ในย่านเชิงเส้น	9
รูปที่ 2.4 ตัวต้านทานเสมือนที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลที่ทำงานย่านเชิงเส้น โดยมีค่าแรงดันเดรน-ซอร์สมีค่าต่ำๆ	10
รูปที่ 2.5 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ย่านอิมิตัว	12
รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานที่ใช้อธิบายการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวด	16
รูปที่ 3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	17
รูปที่ 3.3 การอ่านและส่งข้อมูลระหว่างตัวอ่านและตัวนสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส โดยส่งพลังงานไปด้วยพร้อมกัน	18
รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งต่างในการฝังตัวชิพเข้าไปในสัตัว	19
รูปที่ 3.5 แสดงภาพตัดขวางของชิพที่บรรจุในหลอดแก้ว	20
รูปที่ 3.6 ก โครงสร้างวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม	20
รูปที่ 3.6 ข โครงสร้างวงจรรักษาระดับแรงดันแบบขนาน	21
รูปที่ 3.7 แนวคิดโครงสร้างวงจรจำกัดแรงดันที่จะนำมาใช้งาน	22
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงตัวอย่างลักษณะแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดของตัวสมาร์ทการ์ดทั้งในกรณีที่มีและไม่มีตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 13.56MHz	23
รูปที่ 3.9 การนำ R_{shunt} มาต่อขนานกับ R_L เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรจำกัดแรงดันในวงจรที่มีการต่อตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์แล้ว	23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างแรงดันที่ไม่ถูกจำกัดและถูกจำกัดอย่างอุดมคติที่ 5 โวลต์ โดย u_2 คือแรงดันที่ได้จากการเหนี่ยวนำหลังจากผ่านวงจรเรโซแนนท์แล้ว ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง k ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของตัวอ่านและตัวสมาร์ทการ์ด(ผลดังกล่าวมาจากการคำนวณ โดย $i_1=0.5A, L_1=1\mu H, L_2=3.5\mu H, R_L=2k, C_2=1/w_2L_2$)	24
รูปที่ 3.11 ค่าความต้านทาน R_{shunt} ที่มีความสัมพันธ์ตามค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง	25
รูปที่ 3.12 แนวคิดการนำไปโพลาไรซ์ทรานซิสเตอร์และซีเนอร์ ไดโอด มาต่อร่วมกันเพื่อทำงานเป็นวงจรจำกัดแรงดัน	26
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างวงจรจำกัดแรงดันที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์	27
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างวงจรรักษาาระดับแรงดันแบบอนุกรม	29
รูปที่ 4.1 แบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อใช้แทนชุดเรโซแนนท์	32
รูปที่ 4.2 วงจรเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำที่ขดลวด	32
รูปที่ 4.3 แนวทางการออกแบบวงจรจำกัดแรงดันที่ 5 โวลต์	34
รูปที่ 4.4 วงจรจำกัดแรงดันที่ใช้แบบ	33
รูปที่ 4.5 วงจรจำกัดแรงดันที่กำหนดขนาดของมอสทรานซิสเตอร์จากการออกแบบ โดย W/L มีหน่วยเป็นไมโครเมตร/ไมโครเมตร	36
รูปที่ 4.6 โครงสร้างวงจรรักษาาระดับแรงดันที่ใช้แบบ	37
รูปที่ 4.7 วงจรเรียงกระแส	43
รูปที่ 4.8 โครงสร้างตัวอย่างวงจรBandgap Reference	45
รูปที่ 4.9 วงจรBandgapReference ที่ใช้ทดลอง	46
รูปที่ 5.1 รูปวงจรทั้งหมดคร่าวๆที่ทำการออกแบบและทดลอง	48
รูปที่ 5.2 แสดงวงจรจำกัดแรงดันที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Cadence Spectre	49
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรจำกัดแรงดัน	50
รูปที่ 5.4 ก) วงจรรักษาาระดับแรงดันและ ข)วงจร bandgap Reference	51
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงาน โดยพล็อตแรงดัน V_{out} ซึ่งเป็นแรงดันจากวงจรรักษาาระดับแรงดัน โดยการกวาดแรงดันอินพุต (Vrectif)	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานโดยพล็อตแรงดัน V_{out} ซึ่งเป็นแรงดันจาก วงจรรักษาระดับแรงดัน เทียบกับอุณหภูมิ ที่แรงดันอินพุต V_{rectif} ขนาด 7 โวลต์	53
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการทำงานโดยพล็อตแรงดัน V_{ref} ซึ่งเป็นแรงดันจากวงจร Bandgap Reference และกระแสไหลผ่าน R_8 เทียบกับอุณหภูมิ ที่แรงดันอินพุต V_{rectif} ขนาด 7 โวลต์	54
รูปที่ 5.8 ส่วนวงจรทรานส์ฟอर्मเมอร์คัปปลิงและวงจรเรียงกระแส	55
รูปที่ 5.9 ผลการพล็อตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส $k=0.01$	56
รูปที่ 5.10 ผลการพล็อตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rfl} ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส $k=0.01$	56
รูปที่ 5.11 ผลการพล็อตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส $k=0.01$	57
รูปที่ 5.12 ผลการพล็อตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rfl} ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส $k=0.01$	57
รูปที่ 5.13 ผลการพล็อตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส $k=0.01$	58
รูปที่ 5.14 ผลการพล็อตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rfl} ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส $k=0.01$	58
รูปที่ 5.15 ผลการพล็อตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส $k=0.06$	59
รูปที่ 5.16 ผลการพล็อตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rfl} ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส $k=0.06$	59
รูปที่ 5.17 ผลการพล็อตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส $k=0.06$	60
รูปที่ 5.18 ผลการพล็อตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rfl} ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส $k=0.06$	60
รูปที่ 5.19 ผลการพล็อตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส $k=0.06$	61
รูปที่ 5.20 ผลการพล็อตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rfl} ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส $k=0.06$	61
รูปที่ 5.21 ผลการพล็อตแรงดัน V_{rectif} , V_{ref} และ V_{out} ตามเวลาจากฟังก์ชันมิงจร	62
รูปที่ 5.22 ผลการพล็อตแรงดัน V_{rectif} , V_{ref} และ V_{out} ตามเวลาจากฟังก์ชันมิงจร ณ เวลา steady state	63
รูปที่ ผ1 แสดงฟังก์ชันของวงจรทั้งหมด	68
รูปที่ ผ2 แสดงฟังก์ชันบริเวณส่วนของมอสทรานซิสเตอร์และวงจรหลักทั้งหมด	69
รูปที่ ผ3 แสดงฟังก์ชันบริเวณส่วนวงจรจำกัดแรงดัน	69
รูปที่ ผ4 แสดงฟังก์ชันบริเวณส่วนวงจรเรียงกระแส	70
รูปที่ ผ5 แสดงฟังก์ชันบริเวณส่วนวงจรรักษาระดับแรงดัน	70
รูปที่ ผ6 แสดงฟังก์ชันบริเวณส่วนวงจรเรียงกระแส	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

รูป

หน้า

ตารางที่ 6.1 ผลการวัดแรงดันตามข้อกำหนดการแข่งขัน ณ ช่วงเวลา steady state ค่า $k=0.06$
 อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

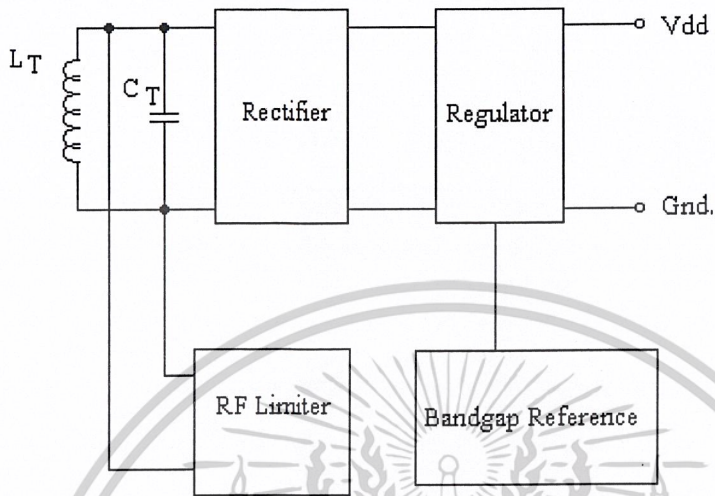
บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นอยู่ของมนุษย์ ถูกพัฒนาให้มีความสะดวกสบายในชีวิตประจำวันมากขึ้นก็ด้วยเทคโนโลยีต่างๆที่มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังจะเห็นได้จากรอบตัวเรา เช่น วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ เป็นต้น อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านี้ ล้วนแล้วแต่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบแทบทั้งสิ้น และอุปกรณ์หลักๆที่พบมากในเครื่องใช้ไฟฟ้า ก็คือ วงจรรวม(Integrated Circuit) ซึ่งนับวันยิ่งพบว่ามีการใช้งานกันมากขึ้นเรื่อยๆ แต่เนื่องจากว่า เทคโนโลยีในการผลิตวงจรรวมเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงและต้องมีการลงทุนมาก ประเทศไทยจึงยังไม่มีโรงงานหรือแหล่งผลิตวงจรรวมเป็นของตนเอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเข้าวงจรรวมเพื่อมาประกอบเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เป็นปริมาณมากในแต่ละปี ส่งผลให้เกิดภาวะการขาดดุลการค้ามากขึ้นเรื่อยๆ อย่างไรก็ตาม ส่วนสำคัญของการผลิตวงจรรวมนั้นก็คือ การออกแบบวงจรรวม ซึ่งอาศัยบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถเป็นผู้ออกแบบ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ต้นทุนสูงแต่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง การออกแบบวงจรรวมเป็นของตนเองจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์และช่วยลดต้นทุนการนำเข้าวงจรรวมจากต่างประเทศ อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศให้มีการพัฒนาทัดเทียมต่างประเทศได้ ในฐานะที่เป็นผู้สร้างเทคโนโลยีเป็นของตนเอง

การประยุกต์ใช้งานสมาร์ตการ์ดแบบไร้สัมผัสในปัจจุบันมีให้พบเห็นกันมากขึ้น เช่น บัตรพนักงานบริษัท ประยุกต์ใช้ในระบบติดตามสิ่งของ ใช้ในระบบรักษาความปลอดภัย เป็นต้น ข้อดีของระบบสมาร์ตการ์ดแบบไร้สัมผัสมีหลายอย่างเช่นว่า มีความคงทนแข็งแรง สามารถใช้ได้ ในหลายสภาวะแวดล้อม มีระบบป้องกันรักษาความปลอดภัยของข้อมูลสูง ใช้งานง่าย และไม่จำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเพื่อให้ได้แรงดันและข้อมูลระหว่างตัวอ่านและตัวสมาร์ตการ์ด ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวงจรการออกแบบวงจรถ่านลิ้นในสมาร์ตการ์ดแบบไร้สัมผัส ซึ่งมีบล็อกย่อยๆดังในรูปที่ 1.1 วงจรทั้งหมดถูกออกแบบโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์โดยประกอบไปด้วย วงจรกรองไฟตรงแบบเต็มคลื่น วงจรจำกัดแรงดัน วงจรรักษาระดับแรงดัน และวงจร Bandgap Reference โดยรายละเอียดในแต่ละวงจรจะได้กล่าวในบทต่อไป



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรอานาล็อกที่ทำการศึกษา

1.1 เหตุผลในการศึกษาการออกแบบวงจรรวม

แนวความคิดที่จะนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากๆ มาใส่รวมไว้ในฐานรองเดียวกัน (Substrate) มีมาตั้งแต่ช่วงปี 1950-1960 ตลอด 40 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีในการสร้างวงจรรวมในยุคแรกๆ นั้น สามารถสร้างวงจรรวมที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพียงไม่กี่ตัว จนกระทั่งพัฒนาจนสามารถสร้างวงจรรวมเช่น ไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor) ที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นล้านๆ ตัวได้ภายในชิพเดียว ดังได้มีผู้ทำนายไว้ว่า จำนวนทรานซิสเตอร์ต่อชิพจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในทุกๆ หนึ่งปีครั้ง จากช่วงปี 1960 ที่สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ขนาด 25 ไมครอน จนกระทั่งปี 2000 สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ให้มีขนาดเล็กเพียง 0.18 ไมครอนเท่านั้น และมีแนวโน้มต่อไปว่า จะมีขนาดเล็กมากถึงระดับนาโนเมตรได้ จากผลตรงนี้ ส่งผลให้การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีความเร็วสูงมากเมื่อเทียบกับหลายสิบปีก่อน

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าตลาดโลกของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันจะยังเน้นไปที่อุปกรณ์ประเภทหน่วยความจำ (Memory) และ ไมโครโพรเซสเซอร์อยู่มาก แต่แนวโน้มของวงจรรวมอะนาล็อก ก็ได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ ก็เนื่องจากด้วยข้อจำกัด เช่น ความซับซ้อน ความเร็ว และความแม่นยำ ที่ไม่อาจสร้างด้วยอุปกรณ์ที่เป็นตัวเดียวได้ จึงกล่าวได้ว่า เราไม่อาจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างอุปกรณ์ตัวเดียวเพื่อใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการประสิทธิภาพที่สูง รวมถึงความซับซ้อนและความทันสมัยของวงจรมากๆ ได้อีกต่อไป

1.2 เหตุผลที่เลือกออกแบบโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์

แนวความคิดการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ ถูกนำเสนอในช่วงต้นปี 1930 ซึ่งน่าแปลกใจตรงที่ว่า ช่วงนั้น ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ยังไม่สามารถสร้างได้ด้วยซ้ำไป และถึงแม้ว่าในยุคแรกๆจะติดอุปสรรคในแง่เทคโนโลยีในการสร้าง ในที่สุด มอสเทคโนโลยีก็สามารถสร้างได้ในช่วงต้นปี 1960 โดยในช่วงแรกๆ ยังนิยมสร้างเฉพาะทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นอยู่ จนกระทั่งกลางปี 1960 จึงเริ่มเกิดซีมอส(Complementary MOS ,CMOS) ขึ้นเป็นครั้งแรก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยมอสทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี จุดนี้เองที่เป็นการปฏิวัติวงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงนั้น ในช่วงแรกๆนั้น มอสเทคโนโลยีได้เข้ามาครอบครองตลาดของการสร้างวงจรรวมประเภทหน่วยความจำและไมโครโปรเซสเซอร์เป็นส่วนมาก เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษสองประการ ได้แก่ มอสทรานซิสเตอร์กินพลังงานตอนที่แรงดันเกตมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะสวิตช์ซึ่งทำนั้น อีกทั้งแทบไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่นาร่วมด้วยเลย ซึ่งถือเป็นจุดแข็งที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทำไม่ได้ จุดเด่นอีกข้อของมอสทรานซิสเตอร์ก็คือ สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของตัวทรานซิสเตอร์ได้ง่ายกว่ามากเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์ชนิดอื่น อีกทั้ง ยังมีผังลายวงจรที่ง่าย จุดเด่นพิเศษนี้เองที่ทำให้มอสทรานซิสเตอร์เป็นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ราคาถูก

ก้าวต่อไปของซีมอสก็คือ นำมาสร้างเป็นวงจรรวมอะนาล็อก ซึ่งแนวโน้มของต้นทุนที่ต่ำลงของกระบวนการผลิต ตลอดจนความเป็นไปได้ที่จะนำเอาวงจรดิจิทัลและอะนาล็อกเข้ามารวมไว้ในวงจรรวมเดียวกันเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพรวมถึงลดต้นทุนในการประกอบ(Packaging) ทำให้มอสเทคโนโลยีได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ อย่างไรก็ตาม พบว่า มอสทรานซิสเตอร์มีความเร็วในการทำงานที่ต่ำกว่าอีกทั้งมีสัญญาณรบกวนได้ง่ายกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ นั่นจึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งานในวงจรรวมประเภทความถี่สูง

จึงเป็นที่น่าแปลกใจว่า เทคโนโลยีซีมอสได้เข้ามามีบทบาทต่อวงจรรวมอะนาล็อกได้อย่างไร ก็เนื่องจากสาเหตุที่ว่า มอสทรานซิสเตอร์ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆนั่นเอง ส่งผลให้การทำงานของมันมีความสามารถที่สูงขึ้น กล่าวคือ สามารถทำงานในย่านความถี่ที่สูงมากๆได้นั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แล้ว ถึงแม้ว่า ตลอดหลายสิบปีที่ผ่านมา จะสามารถลดขนาดของมันลงได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกันแล้ว ไม่ได้เพิ่มความเร็วในการทำงานขึ้นมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการในการออกแบบวงจรรวม โดยเฉพาะวงจรที่มีการกินพลังงานต่ำ
2. เพื่อศึกษาการทำงานในส่วนของวงจรถอมนาล็อกในสมาร์ตการ์ดชนิดไร้สัมผัส โดยเฉพาะในส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงทั้งหมดให้แก่ตัวชิพสมาร์ตการ์ด
3. สามารถออกแบบวงจรรวมให้มีการทำงานและมีประสิทธิภาพเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดได้
4. สามารถแก้ปัญหาและปรับปรุงวงจรรวมที่ออกแบบไว้ให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเดิมได้
5. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการออกแบบวงจรรวมครั้งนี้ ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรรวมประเภทอื่นๆซึ่งมีหน้าที่การทำงานแตกต่างกันออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ
6. ส่งเสริมให้มีการออกแบบวงจรรวม เพื่อเป็นการกระตุ้นให้เกิดบุคลากรทางด้าน การออกแบบวงจรรวมของประเทศให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้าที่ผลิตได้ในประเทศ และลดการนำเข้าวงจรรวมจากต่างประเทศ

1.4 ขอบเขตงานที่ทำ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบวงจรถอมนาล็อกบางส่วนที่ใช้ในสมาร์ตการ์ดแบบไร้สัมผัส ทำงานที่ความถี่ 13.56 MHz ซึ่งออกแบบโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์เป็นส่วนใหญ่ โดยทำการศึกษาการออกแบบในส่วนของวงจรถอมนาล็อกให้แก่ตัวสมาร์ตการ์ด ได้แก่ วงจรกรองแรงดันและวงจรรักษาระดับแรงดัน ซึ่งแรงดันที่ได้ก่อนจะเข้าสู่วงจรกรองแรงดันนั้น เป็นแรงดันที่ได้จากการเหนี่ยวนำจากขดลวด โดยอาศัยทฤษฎีเดียวกันกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งแรงดันที่ได้ อาจมีค่าสูงหลายร้อยโวลต์ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีวงจรจำกัดแรงดันร่วมด้วย และเพื่อสร้างเสถียรภาพที่ดีให้แก่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงที่สร้างขึ้นมาให้กับวงจรทั้งหมด จึงมีวงจร Bandgap Reference ด้วย

อย่างไรก็ดี ทฤษฎีของการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้ไฟเลี้ยงให้แก่ตัวสมาร์ตการ์ดนั้น จะไม่ขอกว่าถึงในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มากนัก และเนื่องด้วยเวลามีจำกัด ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะขอกว่าถึงการออกแบบและการทดลองเฉพาะส่วนวงจรถอมนาล็อกแรงดัน และวงจรรักษาระดับแรงดันเป็นส่วนใหญ่เท่านั้น โดยการออกแบบและการทดลอง จะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานวงจรที่ได้ทำการออกแบบไว้ เพื่อดูผลการทำงาน โดยเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีส่วนสำคัญและส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรรวม

แรงดันที่สร้างเป็นแหล่งพลังงานให้แก่วงจรสมาร์ทการ์ดในการออกแบบและการทดลองนี้ หลังจากผ่านวงจรรักษาระดับแรงดันแล้ว จะมีค่าอยู่ที่ 3.3 โวลต์ และพยายามออกแบบให้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.3 โวลต์ และมีแรงดันกระเพื่อมไม่เกิน $\pm 10\%$

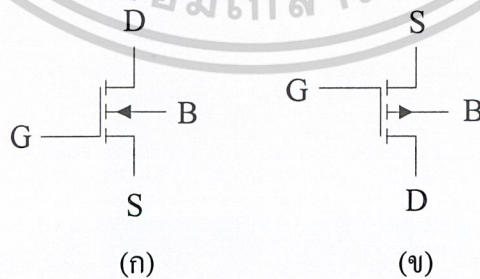


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีมอสทรานซิสเตอร์

2.1 ชนิดของมอสทรานซิสเตอร์

มอสทรานซิสเตอร์ หรือมอสเฟท เป็นทรานซิสเตอร์ที่มีบทบาทและถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปของวงจรรวม เช่น VLSI (Very Large Scale Integration) มอสเฟทเป็นทรานซิสเตอร์ที่นำเอาโครงสร้างมอส (Metal Oxide Semiconductor) มาใช้งานโดยอาศัยผลของสนามไฟฟ้าที่เกิด เหนี่ยวนำประจุในสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดเป็นชั้นกลับ (Inversion Layer) หรือที่เรียกว่า แชนแนล (Channel) ซึ่งเป็นช่องทางเดินกระแสระหว่างซอร์ส (Source) และเดรน (Drain) ความหนาแน่นของประจุที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาในแชนแนล จะขึ้นกับปริมาณแรงดันที่เกต ดังนั้น แรงดันที่เกตซึ่งเป็นแรงดันค่านินพุต จึงสามารถควบคุมการนำกระแสระหว่างซอร์สและเดรนซึ่งเป็นกระแสด้านเอาต์พุตได้ เราจึงสามารถนำมอสเฟทไปใช้เป็นส่วนประกอบในวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ได้ การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้เกิดจากผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดในแนวตั้ง (Vertical Electric Field) เหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนล และผลของสนามไฟฟ้าระหว่างซอร์สและเดรนในแนวนอน (Horizontal Electric Field) จะทำให้พาหะในแชนแนลเคลื่อนที่ได้ ดังนั้น ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า ทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้า หรือ (Field Effect Transistor, FET) เราจึงนิยมเรียกย่อๆว่า เฟท และเรียกชื่อเต็มว่า มอสเฟท (MOSFET) เพื่อให้รู้ว่า ส่วนเกตมีโครงสร้างแบบมอสนั่นเอง และเนื่องจากส่วนของชั้นออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวน บางครั้งจึงถูกเรียกว่า IGFET ย่อมาจาก Insulated Gate Field Effect Transistor ซึ่งมีความหมายว่าส่วนเกต ถูกแยกด้วยชั้นฉนวน หรือบางครั้งก็เรียกว่า MISFET ซึ่งย่อมาจาก Metal Insulator Semiconductor Field Effect Transistor ในปัจจุบัน ชั้นเกตนิยมสร้างด้วยชั้นโพลีซิลิกอน (Poly Silicon) และมอสเฟทก็ถูกพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลงเรื่อยๆ



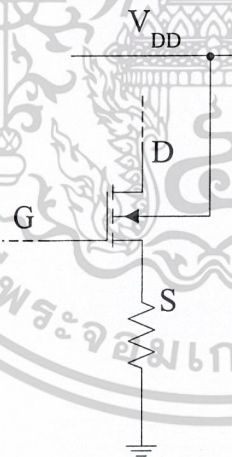
รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์

(ก) ชนิด N Channel

(ข) ชนิด P Channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์โดยมอสทรานซิสเตอร์ถูกแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ๆได้แก่ ชนิดเอ็นแชนแนลและชนิดพีแชนแนล ซึ่งจากรูปที่ 2.1 จะสังเกตเห็นว่า มอสทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ประเภทสี่ขา ได้แก่ ขาเกต(Gate) ,เดรน(Drain),ซอร์ส(Sorce) และบอดี้หรือบัลค์ (Body or Bulk) และโดยทั่วไปในกรณีใช้งานเป็นอุปกรณ์แบบตัวเดี่ยว(Discrete Component) ขาบอดี้ จะต่อเข้ากับขาซอร์ส เพื่อลดผลของบอดี้เอฟเฟกต์(Body Effect) และป้องกันกระแสรั่วไหลระหว่างบอดี้และซอร์ส อย่างไรก็ตาม ในวงจรรวมปัจจุบัน มอสทรานซิสเตอร์ไม่สามารถที่จะต่อขาบอดี้เข้ากับซอร์สโดยตรงได้ เช่น ในกรณีของมอสเฟทชนิดเอ็น (โดยใช้เทคโนโลยีเอ็นเวลล์ (N-Well Technology) ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดไบอัสตรง ณ บริเวณรอยต่อของบอดี้และซอร์สจนเกิดกระแสรั่วไหลระหว่างซอร์สและบอดี้ จึงต่อขาบอดี้เข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดของวงจร หรือก็คือแรงดันไฟเลี้ยงบวกของวงจรมันเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หรือในกรณีถ้า วงจรรวมนั้นสร้างด้วยเทคโนโลยีพีเวลล์(P-Well Technology) ขาบอดี้ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี ก็ต้องต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของวงจร หรือก็คือ ต่อเข้ากับแรงดันไฟเลี้ยงลบมันเอง



รูปที่ 2.2 มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลที่ต่อขาบอดี้เข้ากับไฟเลี้ยงบวก เพื่อป้องกันการเกิดไบอัสตรง ณ บริเวณรอยต่อระหว่างบอดี้กับซอร์ส

อย่างไรก็ดี วงจรรวมโดยทั่วไปจึงไม่อาจหลีกเลี่ยงผลของบอดี้เอฟเฟกต์ได้ ซึ่งจากผลตรงนี้เอง จะทำให้การออกแบบวงจรรวมมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้น ในปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้ จะพยายามไม่กล่าวถึงผลของบอดี้เอฟเฟกต์มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงๆแล้ว มอสมทรานซิสเตอร์อาจถูกแบ่งตามลักษณะการทำงานได้อีกรูปแบบหนึ่ง กล่าวคือ มอสมทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์ (Enhancement MOSFET) กับชนิดดีพลีทชัน (Deplete MOSFET) โดยมอสมทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์จะพบว่าถูกใช้มากในวงจรรวมทั้งไปรวมถึงอุปกรณ์ที่เป็นตัวเดี่ยว ข้อแตกต่างระหว่างมอสมทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดคือ ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์จะทำงานก็ต่อเมื่อ แรงดันระหว่างขาเกตและซอร์สต้องมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม หรือเรียกในภาษาอังกฤษว่า แรงดันทรชโฮล (Treshold voltage) และในกรณีนี้ ค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเป็นบวก ดังนั้น ในการใช้งานมอสมทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์ จะต้องไปอัสแรงดันที่ขาเกตกับซอร์สให้มีค่าบวก ในขณะที่มอสมทรานซิสเตอร์ชนิดดีพลีทชันนั้น ในกระบวนการสร้าง จะทำการเจือสารบางส่วนให้เกิดแซนแนลก่อนแล้ว ทำให้ถึงแม้ไม่มีแรงดันไบอัส(หรือแรงดันขาเกตและซอร์สมีค่าเป็นศูนย์) มอสมทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ก็ยังคงสามารถนำกระแสและทำงานได้ หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ แรงดันขีดเริ่มของมอสมทรานซิสเตอร์ชนิดดีพลีทชันมีค่าเป็นลบนั่นเอง

อย่างไรก็ดี ในขอบเขตของปริญญาโทฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรรวมทั้งใช้มอสมทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์เท่านั้น ดังนั้น จะไม่กล่าวถึงการทำงานของมอสมทรานซิสเตอร์ชนิดดีพลีทชันในที่นี้

2.2 การทำงานของมอสมทรานซิสเตอร์

มอสมทรานซิสเตอร์ถูกจัดให้มีลักษณะการทำงานหลักๆแบ่งออกเป็น 3 ย่านการทำงาน ได้แก่ ย่านคัตออฟ, ย่านเชิงเส้น และย่านอิ่มตัว ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.2.1 มอสมทรานซิสเตอร์ย่านคัตออฟ (Cutoff Region)

สมการสำคัญที่ใช้แบ่งย่านการทำงานของมอสมทรานซิสเตอร์ ในกรณีนี้ก็คือ สมการที่ (2.1)

$$V_{GS} < V_t \quad (2.1)$$

กล่าวคือ ถ้าแรงดันระหว่างขาเกตกับซอร์ส มีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม ในกรณีนี้จะถือว่า มอสมทรานซิสเตอร์ไม่สามารถทำงานได้ ถึงแม้ว่าจริงๆแล้ว มอสมทรานซิสเตอร์อาจจะมีกระแสเดรนไหลบ้างอยู่ก็ตาม แต่ก็ยังเป็นกระแสที่มีปริมาณน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 มอสมทรานซิสเตอร์ย่านเชิงเส้นหรือไตรโอด (Linear Region or Triode Region)

ข้อกำหนดที่ใช้แบ่งว่า มอสมทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านนี้ เป็นไปตามสมการที่ (2.2) และ (2.3) กล่าวคือ ค่าแรงดันเกต-ซอร์สที่ไบอัสให้แก่มทรานซิสเตอร์ ต้องมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม และ แรงดันเดรน-ซอร์ส มีค่าน้อยกว่าผลต่างของแรงดันเกต-ซอร์สและแรงดันขีดเริ่ม

$$V_{GS} \geq V_t \tag{2.2}$$

$$v_{DS} \leq (v_{GS} - V_t) \tag{2.3}$$

การทำงานของมอสมทรานซิสเตอร์ในย่านนี้ เมื่อไบอัสให้แรงดันเกต-ซอร์สมีค่ามากขึ้น จะพบว่า ปริมาณกระแสเดรนจะไหลมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะรูปพาราโบลาโดย เป็นไปตามสมการที่ (2.4) ซึ่งเป็นสมการของมอสมทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล

$$i_D = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right] \tag{2.4}$$

โดยที่ i_D คือ กระแสเดรน

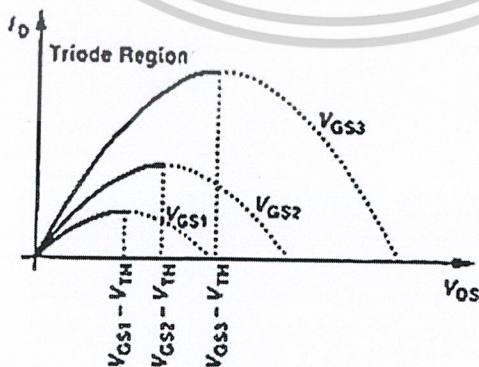
μ_n คือ Mobility ของอิเล็กตรอน (cm^2/Vs)

C_{OX} คือ ความหนาแน่นประจุที่เกตออกไซด์ (F/cm^2)

W คือ ความกว้างของมอสมทรานซิสเตอร์

L คือ ความยาวของมอสมทรานซิสเตอร์

v_{DS} คือ แรงดันเดรน-ซอร์ส



รูปที่ 2.3 การทำงานของมอสมทรานซิสเตอร์ในย่านเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

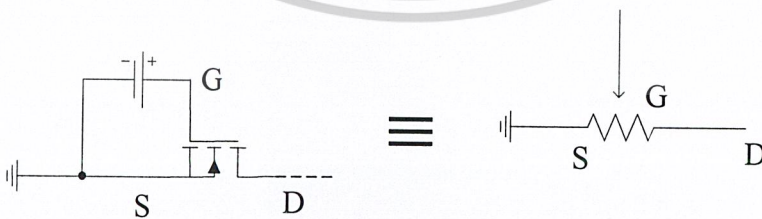
ถ้าพิจารณาสมการที่ (2.4) จะสังเกตว่า กรณีที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานย่านเชิงเส้น โดยมีแรงดันที่ชาซอร์ส-เดรนค่าต่ำๆ พบว่า สมการที่ (2.4) สามารถได้เป็นสมการที่ (2.5) ดังนี้

$$i_D \approx \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t) v_{DS} \quad (2.5)$$

ซึ่งถ้าพิจารณาแล้วจะพบว่า ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอร์ส มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ที่มีความชันเป็นค่าคงที่ตามสมการที่ (2.5) ดังกล่าว หรืออาจกล่าวได้ว่า มอสทรานซิสเตอร์ย่านเชิงเส้นที่มีแรงดันเดรน-ซอร์สค่าต่ำๆ อาจประมาณได้ว่า เป็นตัวต้านทานที่มีค่าเป็นไปตามความสัมพันธ์จากสมการที่(2.5) ในรูปสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$R_{on} \approx \frac{1}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)} \quad (2.6)$$

จากประโยชน์ตรงนี้เอง ทำให้สามารถสร้างตัวต้านทานที่มีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.6) ได้ในวงจรรวม ซึ่งถ้าเทียบแล้ว จะพบว่า ตัวต้านทานที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านเชิงเส้นนี้ จะมีขนาดเล็กกว่ามาก เมื่อเทียบกับว่า ต้องสร้างตัวต้านทานจริงๆในวงจรรวม นั้นหมายถึงว่า จะสามารถ ประหยัดพื้นที่ของวงจรรวมลงไปได้มากนั่นเอง อย่างไรก็ตาม ตัวต้านทานที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ ต้องไม่ลืมว่า จะต้องทำงานโดยมีแรงดันคร่อมตัวมันค่อนข้างต่ำ ถ้าพิจารณาสมการที่ (2.6) อีกครั้ง จะได้ว่า แรงดันเดรน-ซอร์สต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้คือ $v_{DS} \ll 2(v_{GS} - V_t)$ จึงจะสามารถใช้งานมอสทรานซิสเตอร์ในย่านเชิงเส้นเป็นตัวต้านทานได้ ข้อสังเกตที่น่าสนใจอีกก็คือ ค่าความต้านทานนี้ สามารถถูกควบคุมโดยแรงดันเกต-ซอร์สที่ไบอัสแก้มอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.4 ตัวต้านทานเสมือนที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์

ชนิดเอ็นแชนแนลที่ทำงานย่านเชิงเส้น โดยมีค่าแรงดันเดรน-ซอร์สมีค่าต่ำๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 มอสมทรานซิสเตอร์ย่านอิ่มตัว (Saturation Region)

ที่แรงดันไบอัสเกต-ซอร์สค่าหนึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันเดรน-ซอร์สแก่มอสมทรานซิสเตอร์ไปเรื่อย กระแสเดรนจะไม่เพิ่มตาม แต่กลับมีค่าค่อนข้างคงที่ หรืออาจกล่าวได้ว่า ช่วงนี้เองที่กระแสเดรนมีค่าอิ่มตัว ถึงแม้ว่า จะเพิ่มค่าแรงดันเดรน-ซอร์สอีกก็ตาม การทำงานในย่านนี้ อาศัยสมการที่ (2.7) เป็นตัวแบ่งย่านการทำงาน และมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอร์สเป็นไปตามสมการที่ (2.8) ซึ่งเป็นมอสมทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลดังนี้

$$v_{DS} \geq (v_{GS} - V_t) \quad (2.7)$$

$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS}) \quad (2.8)$$

อย่างไรก็ดี ค่าแรงดันเดรน-ซอร์สก็ยังมีผลต่อกระแสเดรนในย่านอิ่มตัวเป็นไปตามสมการที่ (2.8) ดังกล่าว ซึ่งเกิดจากผลของแชนแนลขนาดสั้น (Short Channel Effect) ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของมอส มีขนาดความยาว L ที่มีค่าสั้นมากนั่นเอง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่า λ นี้มีค่าค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดความยาว L มีค่ามาก ดังนั้น ในการวิเคราะห์ทั่วไป จึงอาจจะให้ค่าพารามิเตอร์นี้เป็นศูนย์ได้ ดังนั้น จึงอาจเหลือในรูปของสมการที่ (2.9) ดังนี้

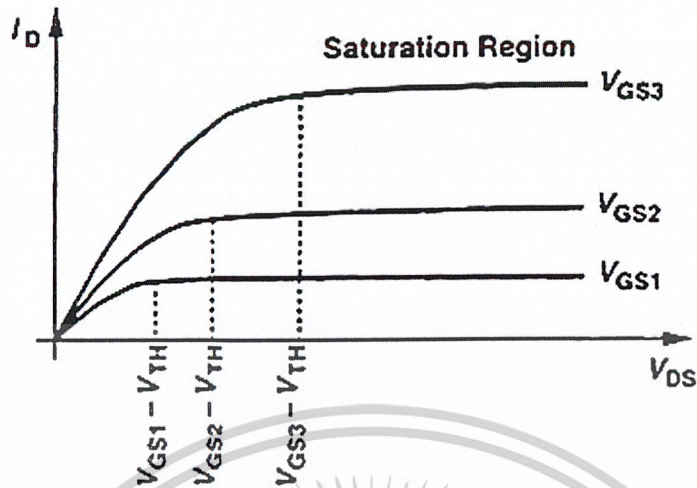
$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \quad (2.9)$$

และยังพบอีกว่า แรงดันเดรน-ซอร์สค่าที่ต่ำที่สุดที่ยังคงทำงานในย่านอิ่มตัวนี้ได้ก็คือ แรงดันเดรน-ซอร์สอิ่มตัวนั่นเอง (v_{DSAT}) ซึ่งเป็นแรงดันที่ใช้แบ่งย่านการทำงานของมอสมทรานซิสเตอร์ออกเป็นสองย่านดังกล่าวแล้วนั่นเอง โดยมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.10) ดังนี้

$$v_{DSAT} = (v_{GS} - V_t) \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) จึงกล่าวได้ว่า ค่าแรงดัน v_{DSAT} นี้ จะมีค่าเปลี่ยนไป ตามค่าแรงดันเกต-ซอร์สที่ป้อนให้กับมอสมทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ย่านอิ่มตัว

2.2.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์ (MOSFET Parameters) และสมการที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบวงจรรวม

พารามิเตอร์ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะพิจารณาในกรณีที่มีมอสทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านอิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นย่านที่มักใช้ในการออกแบบวงจรรวมอะนาล็อกทั่วไป

พารามิเตอร์ที่สำคัญของมอสเฟตที่สำคัญค่าหนึ่งก็คือ ค่าความนำถ่ายโอน หรือ ทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance) กล่าวคือ เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงประสิทธิภาพการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ เนื่องจากถูกนิยามว่า เป็นอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเกตในขณะที่ยังคงแรงดันเดรน-ซอร์สมีค่าคงที่ ดังนั้น

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS, const.}} \quad (2.11)$$

ซึ่งถ้าพิจารณาจากสมการที่ (2.11) แล้ว พบว่า มีความหมายคล้ายกับเป็นอัตราขยายของมอสทรานซิสเตอร์นั่นเอง จากการพิจารณามอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานย่านอิ่มตัวซึ่งเป็นย่านที่นิยมใช้กันมากในวงจรอะนาล็อกทั่วไป โดยพิจารณาสมการที่ (2.9) และ (2.11) แล้ว ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) \quad (2.12)$$

หรือ
$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t} \quad (2.13)$$

หรือ
$$g_m = \sqrt{2KI_D} \quad (2.14)$$

โดยที่
$$K = K' \frac{W}{L} \quad (2.15)$$

$$K' = \mu_n C_{ox} \quad (2.16)$$

และจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.13) และ (2.14) จึงอาจเขียนเป็นความสัมพันธ์ของแรงดันเกต-ซอร์สได้ดังนี้

$$V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{K}} + V_t \quad (2.17)$$

ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวที่ใช้ในการออกแบบวงจรรวมคือ ค่าความต้านทานเอาต์พุตของมอสทรานซิสเตอร์ r_o ซึ่งเป็นค่าที่พิจารณาในกรณีที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านอิ่มตัว โดยมีนิยามดังต่อไปนี้

$$r_o = \left[\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right]_{V_{GS} = \text{const.}}^{-1} \quad (2.18)$$

จากการพิจารณาสมการที่ (2.8) และ (2.18) จะได้ว่า

$$r_o = \left[\frac{1}{2} K (v_{GS} - V_t)^2 \lambda \right]^{-1} \quad (2.19)$$

หรืออาจประมาณได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_o \approx \frac{1}{\lambda I_D} \quad (2.20)$$

จากสมการที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น จะมีสมการบางสมการที่สำคัญๆและมักถูกใช้อยู่บ่อยๆ ในการออกแบบวงจรรวม อันได้แก่ สมการที่ (2.14), (2.17) และ (2.20) ซึ่งสมการดังกล่าวมักใช้พิจารณาทั้งในการวิเคราะห์และการออกแบบวงจรรวมโดยทั่วไปได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะสังเกตว่า พารามิเตอร์หลายๆตามสมการดังกล่าวนี้ ถูกเขียนในรูปแรงดันและกระแสไบอัส (DC Bias) ซึ่งจำเป็นต้องทราบทั้งในการวิเคราะห์และในการออกแบบวงจรรวม

ข้อพึงระวังในการแทนค่าตัวเลขต่างระหว่างกรวิเคราะห์หรือออกแบบวงจรรวมโดยใช้สมการดังกล่าวมานั้น เนื่องจากในกรณีของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนล จะมีค่าพารามิเตอร์บางอย่างที่เป็นลบ เช่น แรงดันขีดเริ่ม และแรงดันเกต-ซอร์ส เป็นต้น เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวิเคราะห์และออกแบบ ให้ใช้ค่าตัวเลขดังกล่าวเป็นบวกทั้งหมดเหมือนในกรณีของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล

จากผลของบอดีเอฟเฟกต์ จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องกล่าวถึงผลตรงนี้ ที่มีต่อรูปวงจรมือสัญญาณขนาดเล็ก (Small-Signal Model) ซึ่งจะต้องกล่าวต่อไป จากผลของแรงดันบอดีซอร์สที่มีผลต่อกระแสเดรน จึงอาจกล่าวได้ว่า เสมือนมีขาเกตอีกขาหนึ่งที่มาคอยควบคุมปริมาณกระแสเดรน นิยามได้ว่า

$$g_{mb} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{SB}} \quad (2.21)$$

โดยที่

$$g_{mb} = \eta g_m \quad (2.22)$$

และมักพบว่า ค่า η นี้มีค่าประมาณ 0.1 เท่า ของค่าความนำถ่ายโอน ดังนั้น ในการวิเคราะห์ต่างๆไป จึงอาจละทิ้งได้ นอกจากนี้ ค่าแรงดันขีดเริ่ม ก็มีผลมาจากบอดีเอฟเฟกต์เช่นเดียวกัน ดังสมการที่ (2.23) ข้างล่างนี้

$$V_t = V_{t0} + \gamma [\sqrt{2\phi_F + V_{SB}} + \sqrt{2\phi_F}] \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ค่า V_{T0} คือค่าแรงดันขีดเริ่มที่ไม่คิดผลของบอดีเอฟเฟกต์ หรือ ค่าแรงดันเทอร์ส-บอดีเป็นศูนย์นั่นเอง ส่วนค่า ϕ_F คือค่า ศักย์เฟอร์มิ หรือ Fermi Potential ซึ่งถูกกำหนดด้วยขนาดความเข้มข้นของอะตอมสารเจือที่ใช้เป็นฐานรอง ส่วนค่าของ γ เป็นค่าที่กำหนดจากกระบวนการในการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ (Process Parameter) ซึ่งมีค่าอยู่ราวๆ $0.3 \text{ V}^{1/2}$ ถึง $0.4 \text{ V}^{1/2}$ สรุปก็คือ ผลของแรงดันเทอร์ส-บอดี มีผลทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า ที่ย่านการทำงานกับสัญญาณที่มีความถี่สูงๆ จะมีผลของตัวเก็บประจุแฝง(Parasitic Capacitor) ปรากฏขึ้นมาอีกด้วย จากผลดังกล่าว ทำให้การวิเคราะห์และการออกแบบวงจรรวม มีความยุ่งยากและซับซ้อนขึ้นไปอีกมากทีเดียว

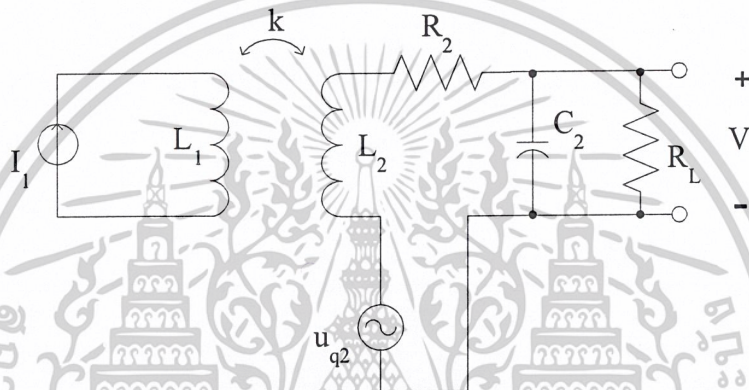


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ทฤษฎีวงจรที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากการทดลองนี้ จะไม่ขอเน้นทฤษฎีของการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดสองขดมากนัก ดังนั้น จะขอยกสมการที่เกี่ยวข้องนำมาใช้เลย ซึ่งเป็นทฤษฎีทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปนั่นเอง

3.1 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดสองขดลวด



รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานที่ใช้อธิบายการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวด

จากกฎของฟาราเดย์ที่อธิบายได้ว่า ถ้ามีกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาไหลผ่านที่ขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (Induced Voltage) ขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิ ในกรณีนี้คือค่าแรงดัน u_{q2} ตามรูปที่ 3.1 โดยที่ R_2 คือค่าความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิ ส่วนค่า C_2 คือตัวเก็บประจุที่ใส่ไว้เพื่อจัดวงจรให้เป็นวงจรเรโซแนนซ์ที่ความถี่พาห์เพื่อให้ได้แรงดันหลังจากการเหนี่ยวนำแล้วมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้นั่นเอง จากข้อกำหนดที่ว่า คลื่นพาห์เท่ากับ 13.56MHz กระแส $i_1 = 0.5A_{rms}$, $L_1 = 0.8\mu H$, $L_2 = 3.5\mu H$ จะได้ว่า C_2 มีค่าประมาณ 39.3599pF โดยแรงดันที่ได้จากการเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุตจะได้ว่า

$$V = 2\pi f N A Q \mu_0 H \cos \alpha \quad V(rms) \quad (3.1)$$

โดยที่

$$f = \text{ความถี่ของสัญญาณเท่ากับ } 13.56\text{MHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N = จำนวนรอบของขดลวดที่สมาร์การ์ดเท่ากับ 4 รอบ

A = พื้นที่ของรูปของขดลวดเท่ากับ $72\text{mm} \times 42\text{mm}$

Q = ค่าองค์ประกอบคุณภาพที่ถูกโหลด (loaded quality factor)
(ซึ่งต่างจากค่าองค์ประกอบคุณภาพที่ไร้โหลด (unloaded quality factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 70)

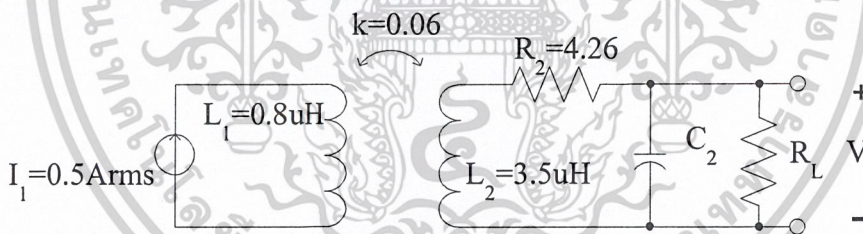
H = ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวดของสมาร์การ์ด (magnetic field density)

μ_0 = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 1.257×10^{-6} Vs/Am

α = มุมตกกระทบของสัญญาณ ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 องศา

k = ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (coupling coefficient) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.06

อย่างไรก็ดี เนื่องจากว่า ในการใช้งานจริงนั้น ก็อาศัยทฤษฎีเดียวกันกับการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะใช้แบบจำลอง (Model) ของหม้อแปลงมาใช้งาน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โดยกำหนดให้ค่า L , C และค่า k ให้มีค่าดังที่กล่าวไว้แล้ว จากค่าองค์ประกอบคุณภาพทางด้านสมาร์การ์ดโดยพิจารณาที่ไร้โหลดจากสมการที่ (3.2) จะสามารถคำนวณค่า R_2 ได้เท่ากับ 4.26Ω

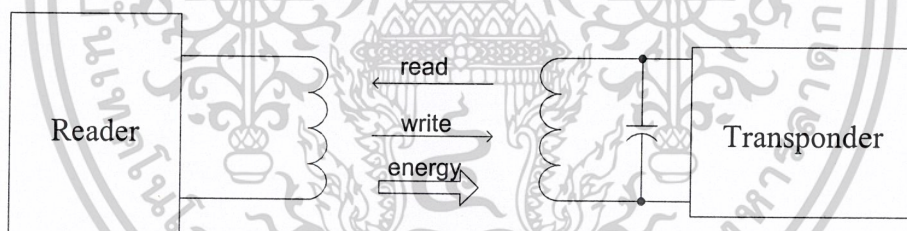
$$Q = \frac{1}{R_2} \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาจากสมการที่ (3.1) แล้ว จะสังเกตได้ว่า ค่าแรงดันที่ได้จากการเหนี่ยวนำขึ้นกับค่าองค์ประกอบคุณภาพ ซึ่งถ้าค่านี้มีค่าสูง ก็อาจทำให้ได้แรงดันเหนี่ยวนำหลายร้อยโวลต์ ดังนั้นการนำแรงดันที่ได้จากการเหนี่ยวนำนี้ไปใช้งาน จำเป็นต้องวงจรป้องกันแรงดันเกินหรือวงจรจำกัดแรงดันต่อร่วมด้วย

3.2 ระบบสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส (Contactless Smart Card system)

จากที่กล่าวมาแล้ว พอจะทำให้สรุปได้ว่า ระบบสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสนั้น อาศัยหลักการเหนี่ยวนำแรงดันของขดลวดในระยะใกล้ เพื่อนำมาเป็นไฟเลี้ยงให้แก่ตัวสมาร์ทการ์ด นอกจากนี้ การส่งข้อมูลระหว่างตัวสมาร์ทการ์ด(transponder) และตัวอ่าน(Reader) ก็ทำไปพร้อมกันกับการส่งพลังงานนี้ด้วย ดังรูปที่ 3.3



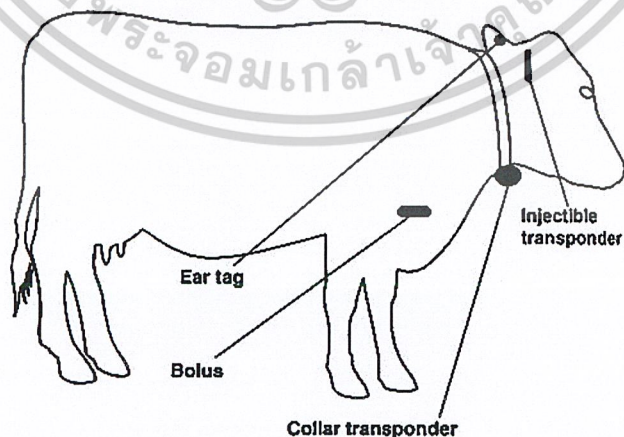
รูปที่ 3.3 การอ่านและส่งข้อมูลระหว่างตัวอ่านและตัวสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส โดยส่งพลังงานไปด้วยพร้อมกัน

โดยอาศัยหลักการมอดูเลชัน (Amplitude Modulation) ก็จะทำให้สามารถ ติดต่อสื่อสารระหว่างตัวอ่านและตัวสมาร์ทการ์ดได้ จากประโยชน์ตรงนี้เอง ทำให้สมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันจากแบตเตอรี่เลย ทำให้เหมาะอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานโดยไม่ต้องกังวลเรื่องการเปลี่ยนแบตเตอรี่ ข้อดีอีกข้อคือ ถ้าบรรจวงจรรวมไว้ในวัสดุที่ดีพอ จะทำให้ตัวสมาร์ทการ์ดมีความคงทนแข็งแรง และสามารถใช้ได้ในทุกๆสถานะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีอีกข้อที่น่าสนใจของระบบสมาร์ทการ์ด คือ เนื่องจากตัวสมาร์ทการ์ดถูกสร้างขึ้นจากวงจรรวมที่ประกอบไปด้วยวงจรถืออิเล็กทรอนิกส์มากมาย และหนึ่งในนั้นก็มีส่วน ของวงจรหน่วยความจำ ซึ่งสามารถสร้างได้มากเพียงพอกับปริมาณข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในตัวสมาร์ทการ์ด ยกตัวอย่างเช่นในระบบเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะมีชิพสมาร์ทการ์ดในตัวเครื่องที่คอยเก็บข้อมูลต่างๆไว้มากมาย เพื่อใช้เป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้ และสามารถถอดเปลี่ยนได้โดยสะดวกมาก และนั่นก็คือข้อดีที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ ระบบสมาร์ทการ์ดที่มีระบบรักษาความปลอดภัยของข้อมูลได้ดีมาก

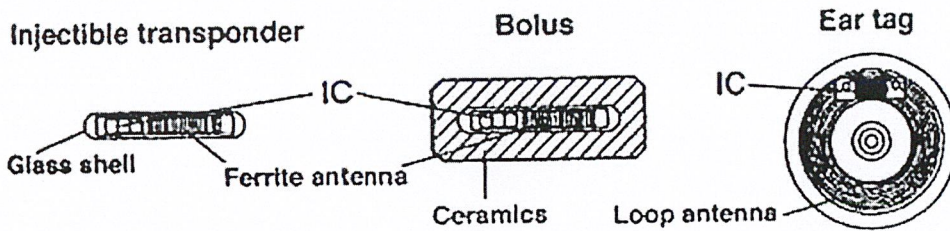
ตัวอย่างของการใช้งานสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสที่น่าสนใจอีกอย่าง คือ ใช้ในระบบแยกแยะหรือติดตามข้อมูลของสัตว์ โดยจะทำการบรรจุตัวสมาร์ทการ์ดไว้ในหลอดแก้วขนาดเล็ก แล้วทำการฝังไว้ในตัวสัตว์ ซึ่งในนั้นจะมีข้อมูลและรายละเอียดของตัวสัตว์ เช่น สายพันธุ์ อายุ โรคประจำตัว รวมถึง ชื่อของเจ้าของสัตว์นั้น เวลาที่จะทำการอ่านข้อมูล ก็เพียงแค่นำตัวอ่านเข้ามาใกล้ๆกับบริเวณที่ฝังตัวสมาร์ทการ์ดนั้น ไม่ว่าจะป็นข้อมูลที่อ่านได้จากตัวการ์ด หรือข้อมูลที่ส่งเข้าไปเก็บไว้ในตัวชิพ ก็จะทำให้ง่าย สะดวกและรวดเร็วมากอีกด้วย และในอนาคต อาจจะมีโครงการที่จะนำมาใช้ร่วมกับมนุษย์อีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบติดตามข้อมูลแบบอื่นๆเช่น บาร์โค้ด(Bar Code) จะพบว่า มีข้อจำกัดในหลายๆด้าน เช่น ความคงทนแข็งแรงหรืออายุการใช้งาน ปริมาณข้อมูลที่เก็บได้น้อยกว่ามาก รวมถึงระบบรักษาความปลอดภัยที่ต่ำกว่ามาก ดังนั้น ในอนาคต ระบบสมาร์ทการ์ด จะเข้ามามีบทบาททั้งในระดับอุตสาหกรรม ตลอดจนอุปกรณอำนวยความสะดวกต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งต่างในการฝังตัวชิพเข้าไปในสัตว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

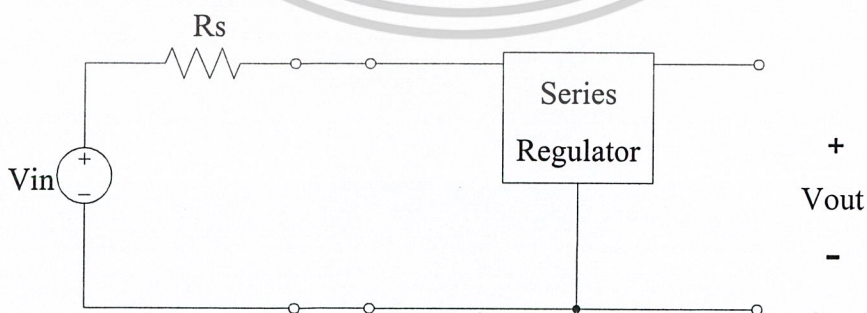


รูปที่ 3.5 แสดงภาพตัดขวางของชิพที่บรรจุในหลอดแก้ว

3.3 วงจรจำกัดแรงดัน (RF Limiter Circuit)

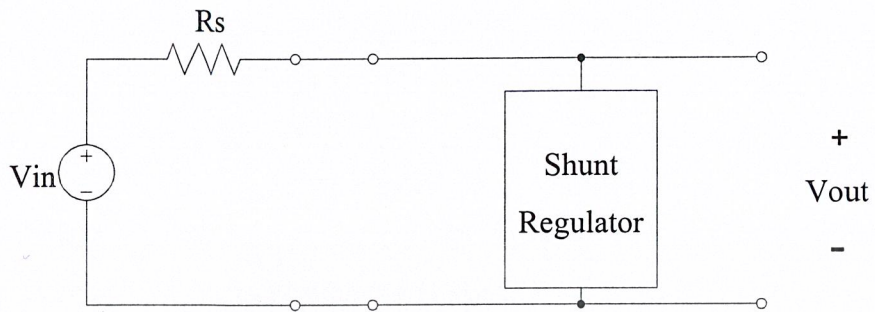
ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว แรงดันที่ได้จากการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิมาสู่ขดลวดทุติยภูมินั้น อาจมีขนาดสูงเกินร้อยโวลต์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียังวงจรจำกัดแรงดัน เพื่อไม่ให้แรงดันที่มากเกินไปนั้น สร้างความเสียหายให้แก่ตัวอุปกรณ์ในวงจรรวม ซึ่งเราพยายามที่จะให้อุปกรณ์ในวงจรรวมที่ออกแบบนั้น ต้องการแรงดันไฟเลี้ยงที่ต่ำอยู่แล้ว และด้วยเทคโนโลยีของมอสทรานซิสเตอร์ในปัจจุบัน ค่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ก็มีค่าต่ำอยู่ด้วย ดังนั้น จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องมียังวงจรที่ทำหน้าที่จำกัดแรงดันที่มากเกินไปนี้

ปกติแล้ว วงจรที่ใช้รักษาระดับแรงดันถูกแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ๆตามลักษณะโครงสร้างและการทำงานของวงจร คือ วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม (Series Regulator) และวงจรรักษาระดับแรงดันแบบขนาน (Parallel Regulator) ดังรูปที่ 3.6 ก และ 3.6 ข ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ก โครงสร้างวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ข โครงสร้างวงจรรักษาระดับแรงดันแบบขนาน

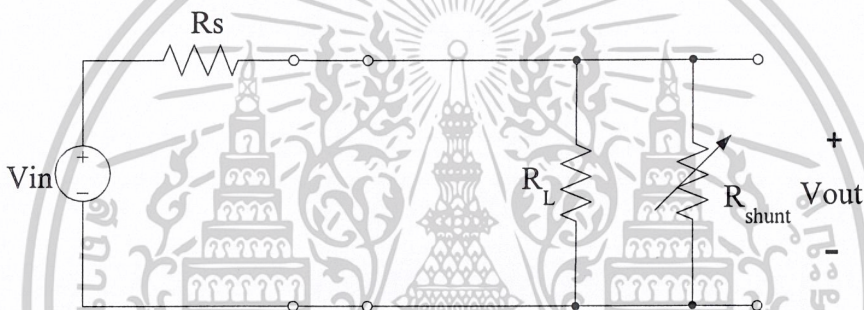
วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรมตามรูปที่ 3.6 ก นั้น ถ้ามีแรงดันที่เข้าที่วงจรเกินกว่าที่ออกแบบไว้ ตัววงจรจะยังคงรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุต ถึงแม้ว่า แรงดันที่เข้ามาจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆก็ตาม วงจรในลักษณะนี้ จึงเสมือนเป็นประตูที่คอยกั้นกลางระหว่างแรงดันที่เข้ามาและแรงดันที่ถูกจำกัดไว้ตามที่ออกแบบนั่นเอง จะสังเกตว่า แรงดันส่วนเกินที่เข้ามานั้น จะไปตกคร่อมวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรมเอง กล่าวคือ แรงดันส่วนเกินซึ่งเป็นผลต่างระหว่างแรงดันที่เข้ามาสู่วงจร กับแรงดันที่ถูกจำกัดจากการออกแบบนั้น จะตกคร่อมระหว่างทางด้านอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรเอง ซึ่งถ้าแรงดันส่วนเกินนี้ มีค่าเพิ่มขึ้นมากตามแรงดันที่เข้ามาสู่วงจรแล้ว ก็อาจทำให้สร้างความเสียหายให้แก่ตัววงจรรักษาระดับแรงดันเองได้ ในขณะที่ วงจรรักษาระดับแรงดันแบบขนานนั้น จะทำการจำกัดแรงดันที่เข้ามาตั้งแต่ต้นเลย เพราะฉะนั้น แรงดันที่คร่อมตัวอุปกรณ์ภายในวงจร จึงไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ตามแรงดันที่เพิ่มเข้าสู่วงจร แต่แรงดันส่วนเกินนั้น จะไปตกคร่อมความต้านทานของแหล่งจ่ายแทน

ในกรณีของการใช้งานเป็นวงจรจำกัดแรงดันในวงจรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสนั้น เนื่องจากว่า ต้องไม่ให้เกิดแรงดันเป็นปริมาณมากคร่อมตัวอุปกรณ์ไม่ว่าจะเป็นส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวมทั้งตาม จึงต้องเลือกใช้วงจรแบบขนาน เพื่อที่จะเป็นการป้องกันแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์มากเกินไปดังกล่าวแล้วนั่นเอง

จากสาเหตุดังกล่าว ก็จะมาพิจารณาถึงแนวความคิดการทำงานของวงจรจำกัดแรงดันที่จะนำมาใช้งานในสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสนี้ ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 3.7 ในการใช้งานจริงนั้น จะเสมือนมีตัวต้านทานโหลด R_L ต่อร่วมด้วยซึ่งเป็นตัวแทนของการกินพลังงานในรูปของกระแสและแรงดันที่ใช้งานนั่นเอง ถ้ากรณีที่ แรงดัน V_{in} ที่เข้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้แรงดันที่คร่อมความต้านทานโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทำนองกลับกัน ถ้าแรงดัน V_{in} ที่เข้ามามีค่าลดลง ก็จะ

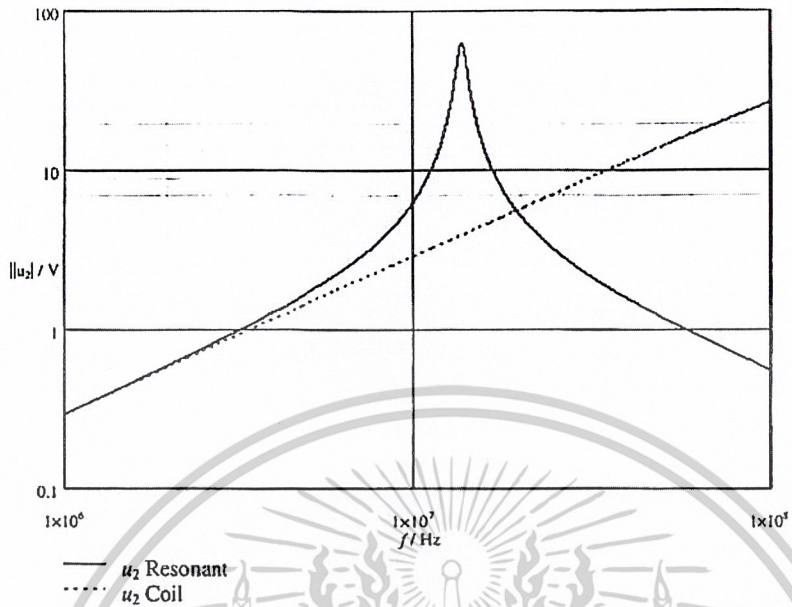
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้ แรงดันที่คร่อมความต้านทานโหลด มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ในกรณีที่ใช้งานโครงสร้างของวงจรดังกล่าว เป็นวงจรจำกัดแรงดันไม่ให้เกินไปกว่าที่กำหนด จึงต้องมีตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ ต่อคร่อมขนานกับความต้านทานโหลดดังกล่าวด้วย โดย ถ้า V_{in} ที่เข้ามาสู่วงจรมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวต้านทานที่ต่อขนานเพิ่มดังกล่าวจะต้องทำการลดค่าตัวเองลง ดังนั้น ค่าความต้านทานรวมของตัวต้านทานคู่ขนานทั้งสองก็จะลดลง ทำให้แรงดัน V_{in} ที่เพิ่มขึ้นมานั้น ไม่สามารถทำให้แรงดันคร่อมความต้านทานโหลดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยได้ เสมือนว่า ตัวต้านทานที่ต่อขนานเพิ่มนี้ ทำการลัดวงจรตัวเองลงให้มีค่าความต้านทานน้อย หรือ มองอีกมุมหนึ่งก็คือ ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านตัวมันเพิ่มขึ้นนั่นเอง



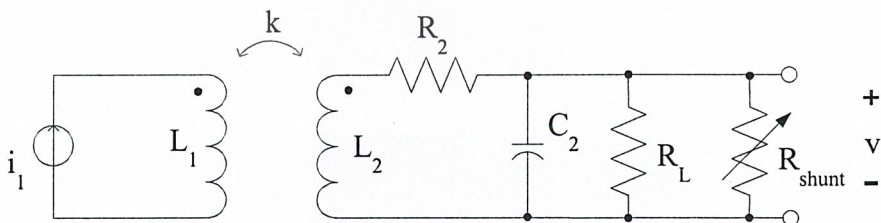
รูปที่ 3.7 แนวคิดโครงสร้างวงจรจำกัดแรงดันที่จะนำมาใช้งาน

การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่ตัวสมาร์ตคาร์ดนั้น เกิดจากหลักของการคัปปลิงนั่นเอง กล่าวคือ ถ้าระยะห่างในการคัปปลิงระหว่างขดลวดทั้งสองเข้ามาใกล้กันมากขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง(k)เพิ่มมากขึ้น จากผลตรงนี้ จะทำให้แรงดันที่เหนี่ยวนำเข้า มีค่าเพิ่มขึ้นได้นั่นเอง



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงตัวอย่างลักษณะแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดของตัวสมาร์ทการ์ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 13.56MHz

ในการใช้งานจริงนั้น จะต้องต่อตัวเก็บประจุสร้างเป็นวงจรเรโซแนนซ์เพื่อให้ได้แรงดันเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงที่สุด เพื่อการทำงานในระยะที่ไกลมากขึ้นได้นั่นเอง ซึ่งถ้าสังเกตจากรูปที่ 3.8 จะพบว่า ค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้ในกรณีของวงจรเรโซแนนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ต่อตัวเก็บประจุให้ทำงานเป็นวงจรเรโซแนนซ์ ถึงแม้ว่า ที่ความถี่ที่สูงกว่านี้ จะมีค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ต่ำกว่าก็ตาม แต่นั่นไม่ใช่ประเด็นที่ต้องสนใจ เพราะระบบที่ออกแบบนั้น ต้องใช้กับสัญญาณที่มีความถี่ตามที่ออกแบบไว้อยู่แล้วนั่นเอง

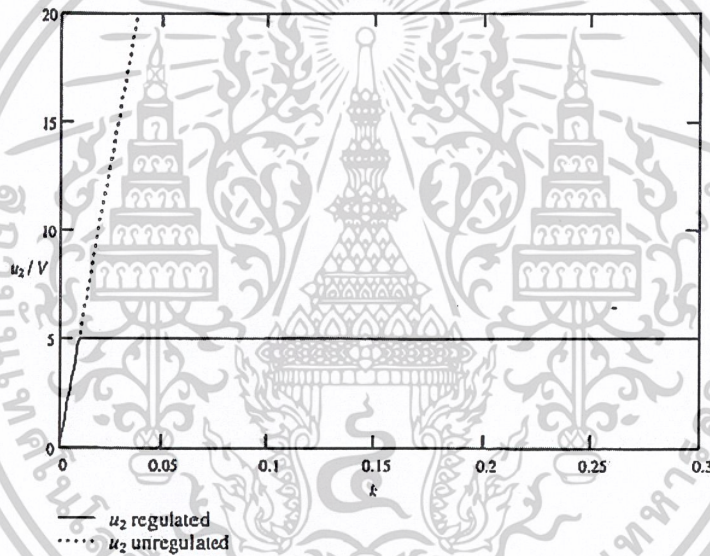


รูปที่ 3.9 การนำ R_{shunt} มาต่อขนานกับ R_L เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรจำกัดแรงดันในวงจรที่มีการต่อตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรตามรูปที่ 3.9 และกำหนดให้ v_{transp} คือค่าแรงดันเอาต์พุตที่ถูกจำกัดแล้ว[3] และ v_{unreg} คือ แรงดันที่ยังไม่ถูกจำกัด จะสามารถหาความสัมพันธ์ของ R_{shunt} ได้ตามสมการที่ 3.3 ดังนี้คือ

$$R_{shunt} = \frac{1}{\left[\frac{j\omega k \sqrt{L_1 L_2} \cdot i_1}{v_{transp}} \right] - 1} \parallel \frac{1}{j\omega C_2} \parallel \frac{1}{R_L} \quad | \quad v_{unreg} > v_{transp} \quad (3.3)$$

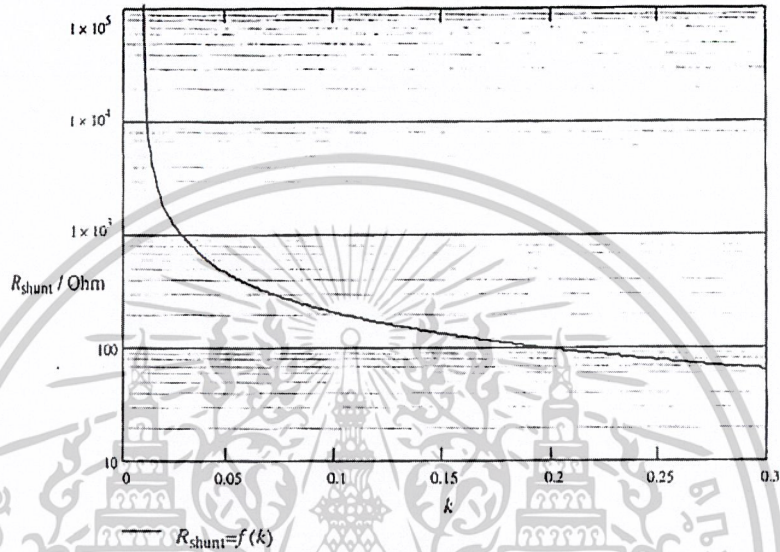


รูปที่ 3.10 ตัวอย่างแรงดันที่ไม่ถูกจำกัดและถูกจำกัดอย่างอุดมคติที่ 5 โวลต์

โดย u_2 คือแรงดันที่ได้จากการเหนี่ยวนำหลังจากผ่านวงจรเรโซแนนซ์แล้ว ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง k ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของตัวอ่านและตัวสมาร์ทการ์ด(ผลดังกล่าวมาจากการคำนวณ โดย $i_1=0.5A, L_1=1\mu H, L_2=3.5\mu H, R_L=2k, C_2=1/\omega_2 L_2$)

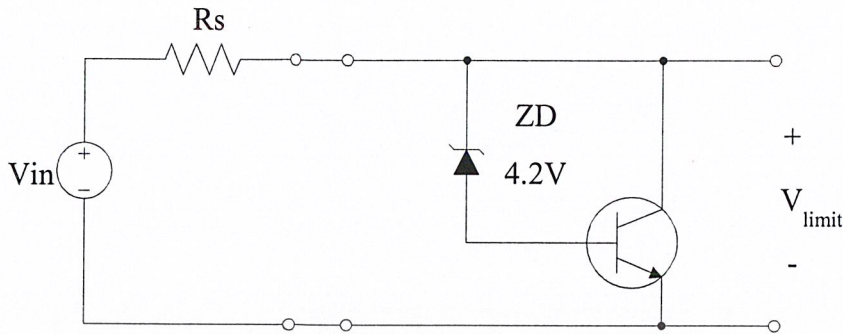
อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัตินั้น เนื่องจากว่า แรงดันที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำนั้นอาจมีค่าแตกต่างกันได้มากเป็นระดับร้อยโวลต์เนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวอ่านและตัวสมาร์ทการ์ดมีค่าไม่แน่นอนในระหว่างการใช้งาน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง k มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่งผลให้ระดับแรงดันเหนี่ยวนำที่เข้ามามีค่าแตกต่างกันมากดังกล่าว ดังนั้น ค่าความต้านทานที่จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาต่อขนานเพื่อจะมาเป็นวงจรจำกัดแรงดันดังกล่าว จะมีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้างมาก เพื่อที่จะทำให้สามารถจำกัดแรงดันได้ในช่วงกว้างๆนั้นเอง ดังจะสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.11 ค่าความต้านทาน R_{shunt} ที่มีความสัมพันธ์ตามค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง

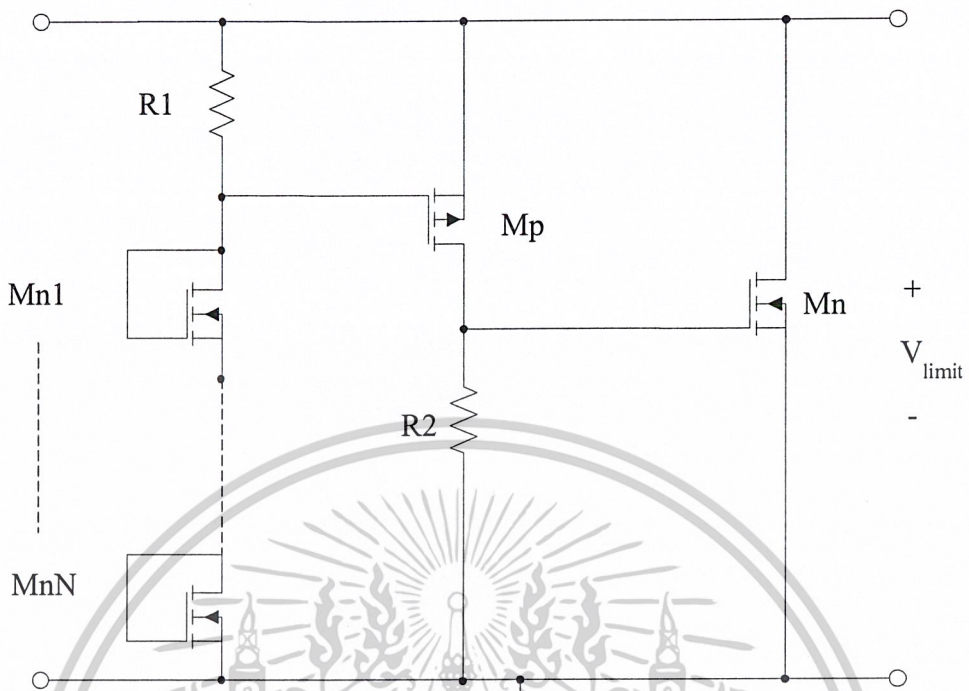
จากรูปที่ 3.11 จะสังเกตเห็นว่าค่าความต้านทาน R_{shunt} ดังกล่าวมีค่าแตกต่างกันครอบคลุมหลายสิบยกกำลังเท่า ในทางปฏิบัตินั้น เราไม่สามารถที่จะหาตัวต้านทานที่ค่าเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงกว้างๆได้ขนาดนี้ ดังนั้น จะต้องสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนตัวต้านทาน R_{shunt} นี้ขึ้นมา โดยจะต้องสามารถตรวจจับแรงดันที่อาจจะเกินค่าที่กำหนดได้ด้วย แนวความคิดดังกล่าวนี้ สามารถสร้างได้โดยอาศัยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเช่น ทรานซิสเตอร์ โดยต่อร่วมกับซีเนอร์ไดโอด ดังในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แนวคิดการนำไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และซีเนอร์ ไดโอด มาต่อร่วมกันเพื่อทำงานเป็นวงจรจำกัดแรงดัน

หลักการนี้อธิบายง่ายๆ ได้ดังนี้คือ ถ้ามีแรงดันที่ปรากฏที่ด้านเอาต์พุตเกินกว่าประมาณ 5 โวลต์[3] จะทำให้ซีเนอร์ไดโอดนำกระแสได้ ซึ่งเป็นกระแสเบสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และถ้ากระแสเบสดังกล่าวมีค่ามากพอ ก็จะสามารถทำให้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ กล่าวคือ จะมีกระแสคอลเล็กเตอร์ไหลผ่านตัวมันอย่างมากมาย เสมือนว่า เป็นความต้านทานระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และอีมีเตอร์ที่ลดลงอย่างมากนั่นเอง เหตุการณ์นี้จะทำให้แรงดันที่ทางด้านเอาต์พุตตกลงกว่าที่ควรจะเป็น จึงทำให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่า 5 โวลต์ ทำให้ซีเนอร์ไดโอดไม่มีกระแสไหล นั่นคือ กระแสเบสไม่เพียงพอที่จะทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ไหลได้ หรือไหลได้น้อยลง ทำให้เสมือนว่า ความต้านทานระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และอีมีเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันที่ปรากฏที่ขั้วเอาต์พุตมีค่าสูงขึ้น จากนั้น จะส่งผลให้ซีเนอร์ไดโอดนำกระแสอีกครั้ง และเหตุการณ์ก็จะวนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อยๆนั่นเอง จึงทำให้สรุปได้ว่า แรงดันที่ปรากฏที่ขั้วเอาต์พุตจะมีขนาดไม่เกิน 5 โวลต์นั่นเอง

ในการออกแบบวงจรรวมเพื่อใช้งานจริง จะใช้มอสทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่นี้แทนทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้แทนความต้านทาน R_{shunt} หรือแม้กระทั่งซีเนอร์ไดโอด โดยอาศัยเทคนิคการจัดวงจรให้มีหลักการทำงานคล้ายกันกับในรูปที่ 3.12 ดังกล่าวแล้ว ตัวอย่างวงจรดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ข้างล่างนี้



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างวงจรจำกัดแรงดันที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์

จากรูปที่ 3.13 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้คือ $Mn1$ ถึง MnN ต่ออนุกรมกันทั้งหมด N ตัว ซึ่งจัดวงจรในลักษณะเป็นซีเนอร์ไดโอด โดยมอสทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะนำกระแสได้ก็ต่อเมื่อ มีแรงดันตกคร่อมขาเกตและซอร์สมากกว่าแรงดันขีดเริ่ม V_t กล่าวคือ มอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมด N ตัวจะนำกระแสได้ก็ต่อเมื่อ มีแรงดันตกคร่อมวงจรทั้งหมดเกิน $N \times V_t$ โวลต์นั่นเอง จากนั้น กระแสที่ไหลผ่านมอสทรานซิสเตอร์ N ตัวดังกล่าวจะไหลผ่าน R_1 ถ้ากระแสไหลมากพอเนื่องมาจากแรงดันคร่อมวงจรมีค่ามาก จนทำให้แรงดันตกคร่อม R_1 มีค่ามากกว่า V_t ของ Mp ก็จะทำให้มอสทรานซิสเตอร์ตัวนี้ นำกระแสได้โดยไหลผ่าน R_2 และในทำนองเดียวกัน ถ้าค่ากระแสที่ไหลผ่าน R_2 มีค่ามากกว่า V_t ของ Mn ก็จะทำให้ Mn นำกระแสได้นั่นเอง จากลักษณะการทำงานของวงจรดังที่ได้อธิบายไปแล้วนั้น กระแสส่วนใหญ่อันที่จะไหลเป็นปริมาณมากก็คือ กระแสเดรนที่ไหลผ่าน Mn นั่นเอง ดังนั้น Mn จึงเปรียบเสมือนเป็นตัวต้านทาน R_{shunt} ที่มาต่อขนานกับโหลดนั่นเอง โดยความต้านทานดังกล่าว สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.6) ในบทที่ 2 โดยในที่นี้ v_{GS} ก็คือ $v_{GS_{Mn}}$ ในวงจรตามรูปที่ 3.13 ดังกล่าว เมื่อแทนค่าเข้าไปในสมการที่ (2.6) ก็จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{shunt} \approx \frac{1}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (v_{GSMn} - V_t)} \quad (3.4)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ (3.4) แล้วจะได้ว่า ค่าความต้านทาน R_{shunt} สามารถควบคุมได้จากแรงดัน v_{GSMn} ซึ่งเป็นแรงดันที่ได้จากการตรวจจับแรงดันเกินจากการทำงานในภาคแรกๆของวงจรนี้ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั่นเอง อย่างไรก็ตาม การอธิบายการทำงานของวงจรด้วยสมการที่ (3.4) อาจจะไม่ถูกต้องนัก เพราะสมการดังกล่าว เป็นสมการที่อธิบายพฤติกรรมการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ย่านเชิงเส้น แต่จากโครงสร้างการต่อวงจรตามรูปที่ 3.13 นั้น แทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่มอสทรานซิสเตอร์ Mn จะทำงานในย่านเชิงเส้น เพราะอย่างน้อยๆ ค่าแรงดัน v_{DS} ก็มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดัน v_{GSMn} ซึ่งจะทำให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านอิ่มตัวเท่านั้น

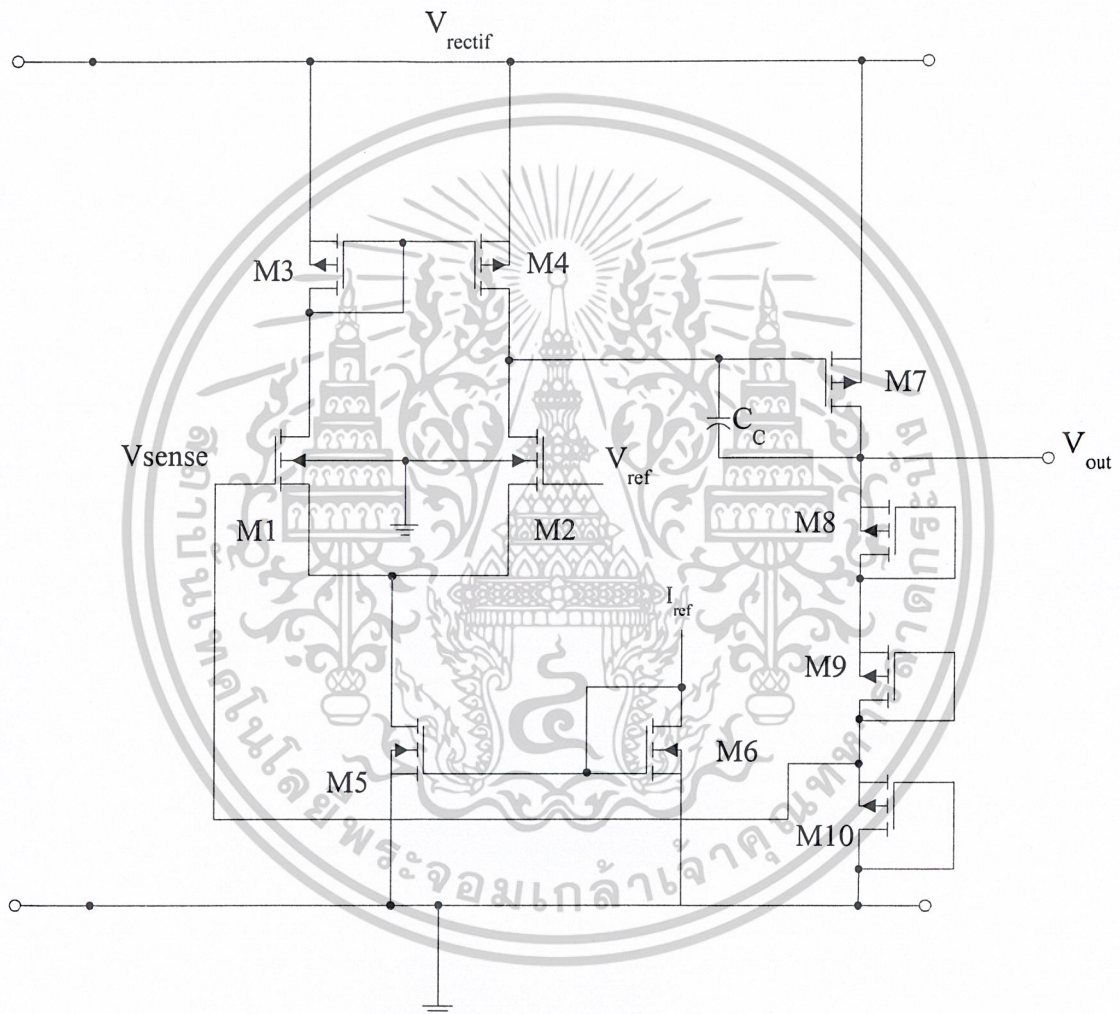
3.4 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator)

ในหัวข้อที่แล้ว วงจรจำกัดแรงดันถูกใช้เพื่อจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดของตัวสมาร์ทการ์ด เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดอาจมีค่ามากเกินไปดังที่กล่าวไว้แล้ว โดยตัววงจรจะต่อที่ขดลวดโดยตรง ก่อนที่จะเข้าสู่ภาคกรองแรงดัน (rectifier) พอหลังจากที่สัญญาณผ่านวงจรกรองแรงดันเรียบร้อยแล้ว ก็จะได้สัญญาณแรงดันที่เป็นลักษณะเต็มคลื่นซีกบวกเพื่อที่จะนำแรงดันดังกล่าวไปใช้เป็นแรงดันไฟเลี้ยงให้แก่วงจรสมาร์ทการ์ดต่อไป แต่เนื่องจากแรงดันดังกล่าว อาจมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงได้ อันเนื่องมาจากขณะที่ใช้งานสมาร์ทการ์ดนั้น อาจจะมีการเคลื่อนที่ของตัวการ์ดเข้าออกเป็นระยะห่างกับตัวอ่านที่ไม่แน่นอน ซึ่งเกิดจากมือผู้ที่ถือตัวสมาร์ทการ์ดเอง จากผลตรงนี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แล้วทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงได้ ดังที่ได้อธิบายไว้แล้ว

นอกจากนี้ แรงดันที่ได้จากการกรองแรงดันแล้วนั้น จะไม่ราบเรียบเลยทีเดียว แต่จะมีริปล (ripple) ขนาดเล็กๆอยู่ ซึ่งอาจทำให้วงจรสมาร์ทการ์ดทั้งหมดมีการทำงานที่ไม่แน่นอนหรือไม่น่าเชื่อถือได้ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มวงจรรักษาระดับแรงดันเข้าไปอีกทีหนึ่ง

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วนั้น เนื่องจากวงจรที่ออกแบบ ใช้มอสทรานซิสเตอร์ที่มีการใช้แรงดันต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดปรากฏการณ์แรงดันพังทลายจนสร้างความเสียหายให้แก่ตัวอุปกรณ์ในวงจรรวม ดังนั้น วงจรรักษาระดับแรงดันจึงควรใช้แบบขนาน แต่ทว่า ระบบสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสนี้ อาศัยการส่งข้อมูลแบบ Amplitude Modulation ขนาด 10% ซึ่งถ้าเราใช้วงจรรักษาระดับแรงดันแบบขนาน อาจจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณข้อมูลได้ เราจึงควรเปลี่ยนมาใช้วงจรเอกสเรชั่นนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบอนุกรม และเนื่องจากภาคแรกๆ ได้มีวงจรจำกัดแรงดันต่อไว้อยู่แล้ว จึงไม่ต้องกังวลว่าถ้าใช้วงจรแบบอนุกรมแล้ว จะมีแรงดันปริมาณมากๆ คร่อมมอเตอร์จนสร้างความเสียหายให้แก่วงจรรวมได้



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม

ลักษณะวงจรที่ใช้มีตัวอย่างดังในรูปที่ 3.14 ถ้ามองคร่าวๆแล้ว โครงสร้างของวงจรก็คือเป็นโครงสร้างของวงจรออปแอมป์นั่นเอง โดยมี M1 และ M2 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) ส่วน M3 และ M4 ทำหน้าที่เป็นแอกทีฟโหลดให้แก่ส่วนวงจรขยายความแตกต่าง โดยจัดวงจรในลักษณะวงจรสะท้อนกระแส (current mirror) เพื่อให้ได้อัตราขยายที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงและมีความแม่นยำ ส่วน M5 และ M6 จัดวงจรเป็นวงจรสะท้อนกระแสเพื่อสร้างกระแสที่ชดเชยให้อัตราให้แก่ส่วนวงจรขยายความแตกต่าง สัญญาณที่จะทำการเปรียบเทียบนั้น มาจากแรงดันอ้างอิง V_{ref} และ แรงดัน V_{sense} นั้นเอง โดยแรงดัน V_{sense} เป็นแรงดันที่ถูกแบ่งด้วยอัตราส่วนของ M8 ,M9 และ M10 เพื่อที่จะใช้เป็นแรงดันตรวจสอบการกระเพื่อมของแรงดันไฟเลี้ยงของสมาร์ทการ์ด แรงดัน V_{ref} และ I_{ref} ได้มาจากวงจรสร้างแรงดันและกระแสอ้างอิงซึ่งสร้างจากวงจร Bandgap Reference ส่วน C_c ต่อไว้เพื่อกำหนดแบนด์วิธของวงจรเพื่อป้องกันการเกิดออสซิลเลชัน

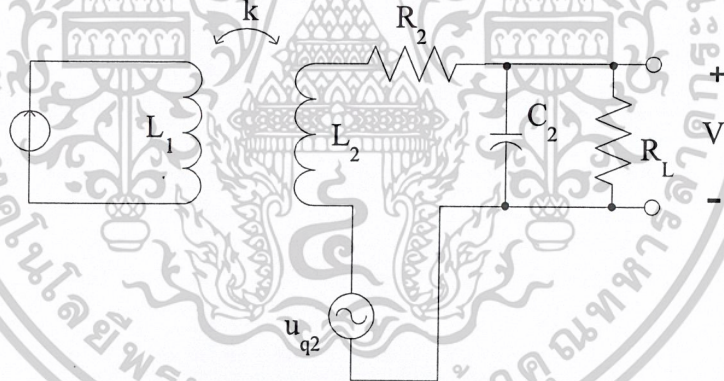
การกำหนดแรงดันที่จะทำการรักษาระดับนั้น อาศัยหลักการการทำงานของออปแอมป์ที่ต่อในลักษณะป้อนกลับ โดยถูกกำหนดด้วยอัตราส่วนของ M8 ,M9 และ M10 ซึ่งเป็นหลักการของการป้อนกลับแบบลบบนนั้นเอง ในขณะที่วงจรทำงาน โครงสร้างของการป้อนกลับแบบลบจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม M10จะมีขนาดเท่ากับแรงดัน V_{ref}

จากประโยชน์ตรงนี้ ทำให้เราสามารถออกแบบวงจรเพื่อกำหนดแรงดันที่จะใช้รักษาระดับได้อย่างง่ายดายเพียงกำหนดอัตราส่วนของ M8 ,M9 และ M10 เท่านั้นเอง นอกจากนี้ โครงสร้างวงจรที่ใช้ตามรูปที่ 3.14 นี้ ก็มีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี เนื่องจากการป้อนกลับแบบลบบนนั้นเอง

บทที่ 4 การคำนวณและการออกแบบวงจร

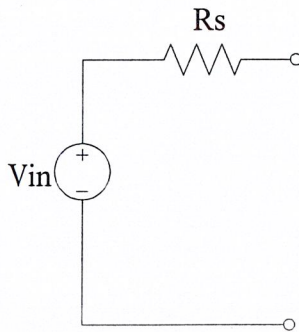
การทดลองนี้ จะใช้โครงสร้างวงจรเสมือนของหม้อแปลงที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 มาพิจารณาในการออกแบบ ซึ่งการออกแบบวงจรจำกัดแรงดันก็ดี และการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดัน ต้องอาศัยหลักการออกแบบในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ตอนที่ออกแบบวงจรรีเลย์ดังกล่าว นั้น จะต้องจำลองเสมือนว่าให้มีการต่อใช้งานจริงๆ เพื่อที่จะทำการจำกัดแรงดันหรือรักษาระดับแรงดันดังกล่าว ดังจะได้อธิบายต่อไป อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบวงจรมัน ต้องใช้มอดูลทรานซิสเตอร์ ทั้งชนิดเอ็นแอนด์พี ซึ่งค่าแรงดันและกระแสของพารามิเตอร์ต่างๆ จะมีเครื่องหมายตรงกันข้ามกัน ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการอธิบายและการออกแบบ ให้ใช้ค่าแรงดันและกระแสเป็นเครื่องหมายบวกเหมือนกันทั้งชนิดเอ็นแอนด์พี

4.1 การจำลองแหล่งจ่ายแรงดันจากชุดเรโซแนนท์



รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานที่ใช้อธิบายการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวด

การจำลองให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันกล่าว จะจำลองจากชุดวงจรเรโซแนนท์ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆตามรูปที่ 3.1 โดยไม่คิดโหลด โดยอาศัยทฤษฎีเทวินินท์ จะจำลองให้มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 ดังนี้

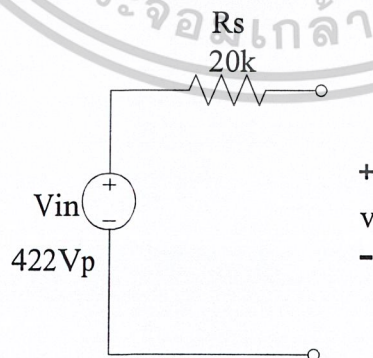


รูปที่ 4.1 แบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อใช้แทนชุดเรโซแนนท์

ซึ่งการคำนวณให้ได้มาซึ่งแรงดัน V_{in} และ R_s นั้น อาศัยหลักการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าทั่วไป กับวงจรตามรูปที่ 2. ในหัวข้อที่ 2 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เป็นสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$V = \frac{\omega \cdot k \cdot \sqrt{L_1 L_2} \cdot i_1}{\sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_L} + \omega R_2 C_2\right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_2 C_2 + \frac{R_2}{R_L}\right)^2}} \quad (4.1)$$

โดยที่ V เป็นแรงดันค่าสัมบูรณ์ที่คร่อม C_2 ซึ่งเป็นชุดเรโซแนนท์นั่นเอง ซึ่งถ้าแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆเข้าไปในสมการที่ (4.1) แล้ว จะได้ว่า $V_{in}=422V_p$ และจากการวิเคราะห์หาค่า R_s จากวงจรตามรูปที่ 3.2 จะได้ว่า $R_s=20k$ (โดยไม่คิดค่า R_L) ตามรูปที่ 4.2



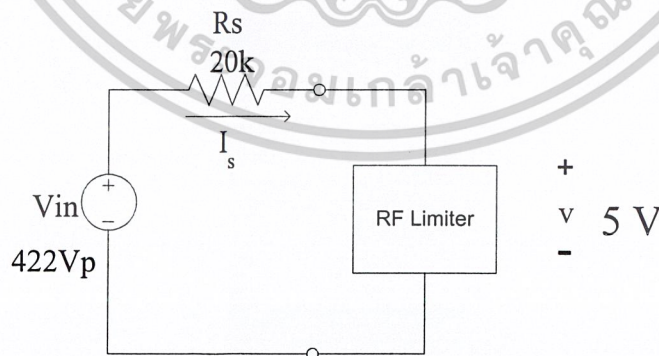
รูปที่ 4.2 วงจรเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำที่ขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อสังเกตที่น่าสนใจก็คือ ถึงแม้ว่า V_{in} จะมีค่าสูงถึง 422 Vp แต่ก็มีค่า R_s สูงเช่นเดียวกัน ดังนั้น ถ้ามีการต่อโหลดที่มีค่าไม่สูงนักเมื่อเทียบกับ R_s จะทำให้แรงดัน V ตกลงมาก และโดยหลักการของวงจรจำกัดแรงดัน จะต้องต่อคร่อมวงจรชุดเรโซแนนท์ หรือก็คือเสมือนเป็นโหลดของวงจรในรูปที่ 4.2 นั่นเอง โดยวงจรจำกัดแรงดันดังกล่าวจะทำหน้าที่ดึงกระแส โดยมีโครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้างแบบซีเนอร์ไดโอดดังที่กล่าวไว้แล้ว วงจรจะดึงกระแสให้มากพอ จนกระทั่งมีกระแสไหลผ่าน R_s มากพอจนทำให้มีแรงดันคร่อม R_s มากพอที่จะทำให้แรงดันคร่อมวงจรจำกัดแรงดันไม่สามารถทำงานได้ กล่าวคือ ชุดวงจรโครงสร้างแบบซีเนอร์ไดโอดไม่สามารถทำงานได้ ก็จะหยุดการดึงกระแส และเมื่อวงจรหยุดนำกระแส จึงทำให้แรงดันที่เข้ามาเพิ่มขึ้นได้ ก็จะทำให้ชุดซีเนอร์ไดโอดทำงานอีกครั้ง เหตุการณ์จะวนไปวนมาเช่นนี้เรื่อยๆ จึงทำให้สามารถออกแบบให้วงจร ทำหน้าที่จำกัดแรงดันไม่ให้เพิ่มขึ้นตามที่ต้องการออกแบบได้

4.2 การออกแบบวงจรจำกัดแรงดัน RF Limiter

จากที่กล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว การออกแบบวงจรจำกัดแรงดันจะต้องทราบวงจรเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งใช้แทนชุดเรโซแนนท์ดังกล่าว ซึ่งได้ตามรูปที่ 4.2 ในกรณีนี้จะกำหนดให้จำกัดแรงดันที่ประมาณ 5-6 โวลต์ เพื่อไม่ให้มีแรงดันคร่อมตัวมอสทรานซิสเตอร์มากเกินไปจนอาจทำให้ตัวอุปกรณ์เกิดปรากฏการณ์พังทลายได้ โดยโครงสร้างการออกแบบเป็นไปตามรูปที่ 4.3 และมีการออกแบบในแนวทางดังนี้



รูปที่ 4.3 แนวทางการออกแบบวงจรจำกัดแรงดันที่ 5 โวลต์

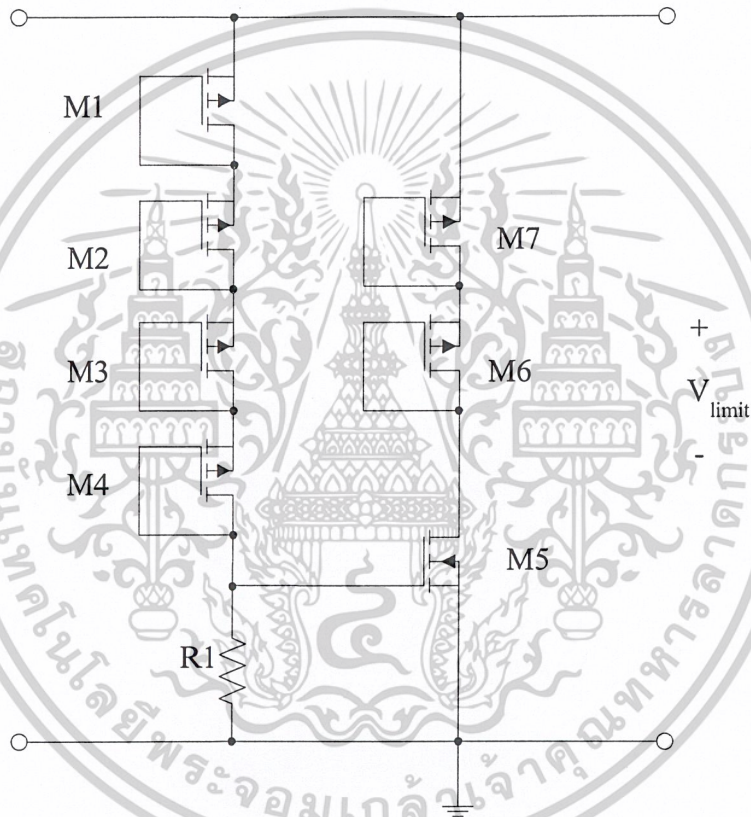
$$I_s = \frac{V_{in} - V_{lim}}{R_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{422 - 5}{20k}$$

$$= 20.85mA$$

กล่าวคือ เราต้องสร้างวงจรจำกัดแรงดันที่สามารถดึงกระแสได้ไม่น้อยไปกว่า 20.85mA ดังกล่าวแล้วนั่นเอง โครงสร้างที่ใช้ออกแบบเพื่อการทดลองจริงได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรจำกัดแรงดันที่ใช้ออกแบบ

โดย M1 ถึง M4 ต่อเป็นซีเนอร์ไดโอด ส่วน M5 ต่อเป็นวงจรดึงกระแสที่ถูกควบคุมโดยแรงดันคร่อม R1 ส่วน M6 และ M7 ต่อแบบคลาสิกโคคเพื่อไม่ให้แรงดันคร่อมมอสทรานซิสเตอร์แต่ละตัว โดยเฉพาะ M5 มีค่ามากเกินไปดังที่ได้เคยกล่าวไว้แล้ว

จากการกำหนดให้ V_{GS} ของ M1 ถึง M5 มีค่าประมาณ 1 V และกำหนดให้ I_{R1} มีค่า 10uA จะทำให้ได้ว่า R1 มีค่า 100k และจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{R1} = \frac{1}{2} K'_P \left(\frac{W}{L} \right)_1 (v_{GS1} - V_{t1})^2$$

$$10\mu A = \frac{1}{2} 60\mu \left(\frac{W}{L} \right)_1 (1 - 0.5)^2$$

$$\left(\frac{W}{L} \right)_1 = 1.33$$

เลือก $\left(\frac{W}{L} \right)_1 = 2 = \frac{1\mu}{0.5\mu}$

โดยที่ กำหนดให้ขนาด M1 ถึง M4 มีขนาดเท่ากันหมดด้วย

และจาก

$$I_{M5} = \frac{1}{2} K'_N \left(\frac{W}{L} \right)_5 (v_{GS5} - V_{t5})^2$$

$$20.85mA = \frac{1}{2} 175\mu \left(\frac{W}{L} \right)_5 (1 - 0.5)^2$$

$$\left(\frac{W}{L} \right)_5 = 953.14$$

เลือก $\left(\frac{W}{L} \right)_5 = 954 = \frac{477\mu}{0.5\mu}$

และจากที่ว่า ต้องการให้แรงดันที่ตกคร่อม M5 ถึง M7 มีค่าเท่ากัน นั่นคือประมาณ 1.67 V จะทำให้ได้ว่า

$$I_{M6} = \frac{1}{2} K'_P \left(\frac{W}{L} \right)_6 (v_{GS6} - V_{t6})^2$$

$$20.85mA = \frac{1}{2} 60\mu \left(\frac{W}{L} \right)_6 (1.67 - 0.5)^2$$

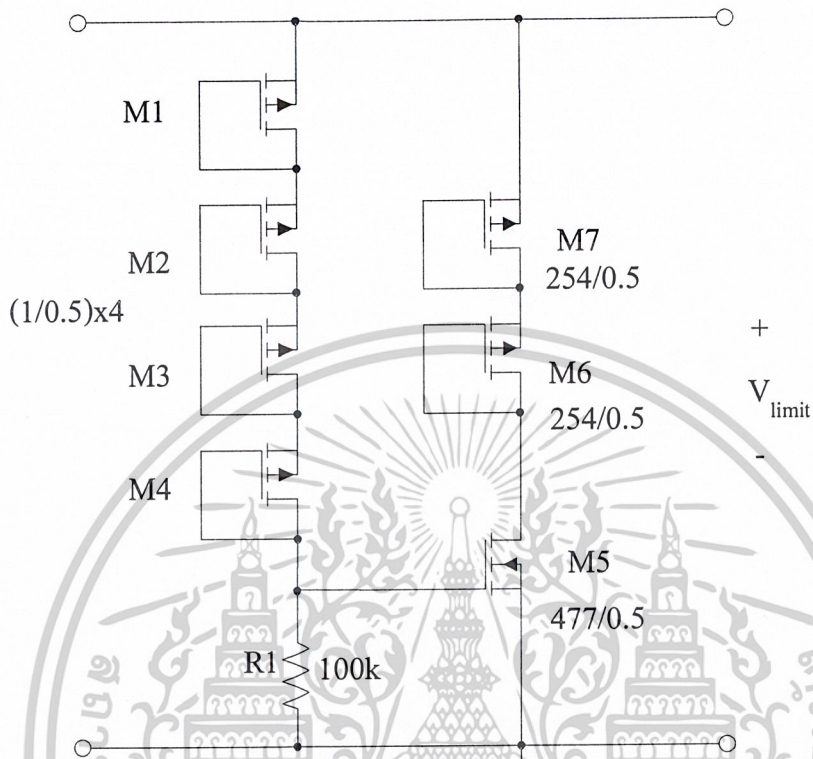
$$\left(\frac{W}{L} \right)_6 = 507.71$$

เลือก $\left(\frac{W}{L} \right)_6 = 508 = \frac{254\mu}{0.5\mu}$

โดยที่ ขนาดของ M6 และ M7 มีขนาดเท่ากัน

วงจรที่มีการกำหนดขนาดของมอสทรานซิสเตอร์แต่ละตัวได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 แล้ว โดยผลการทดลองจะนำไปแสดงไว้ในบทถัดไป

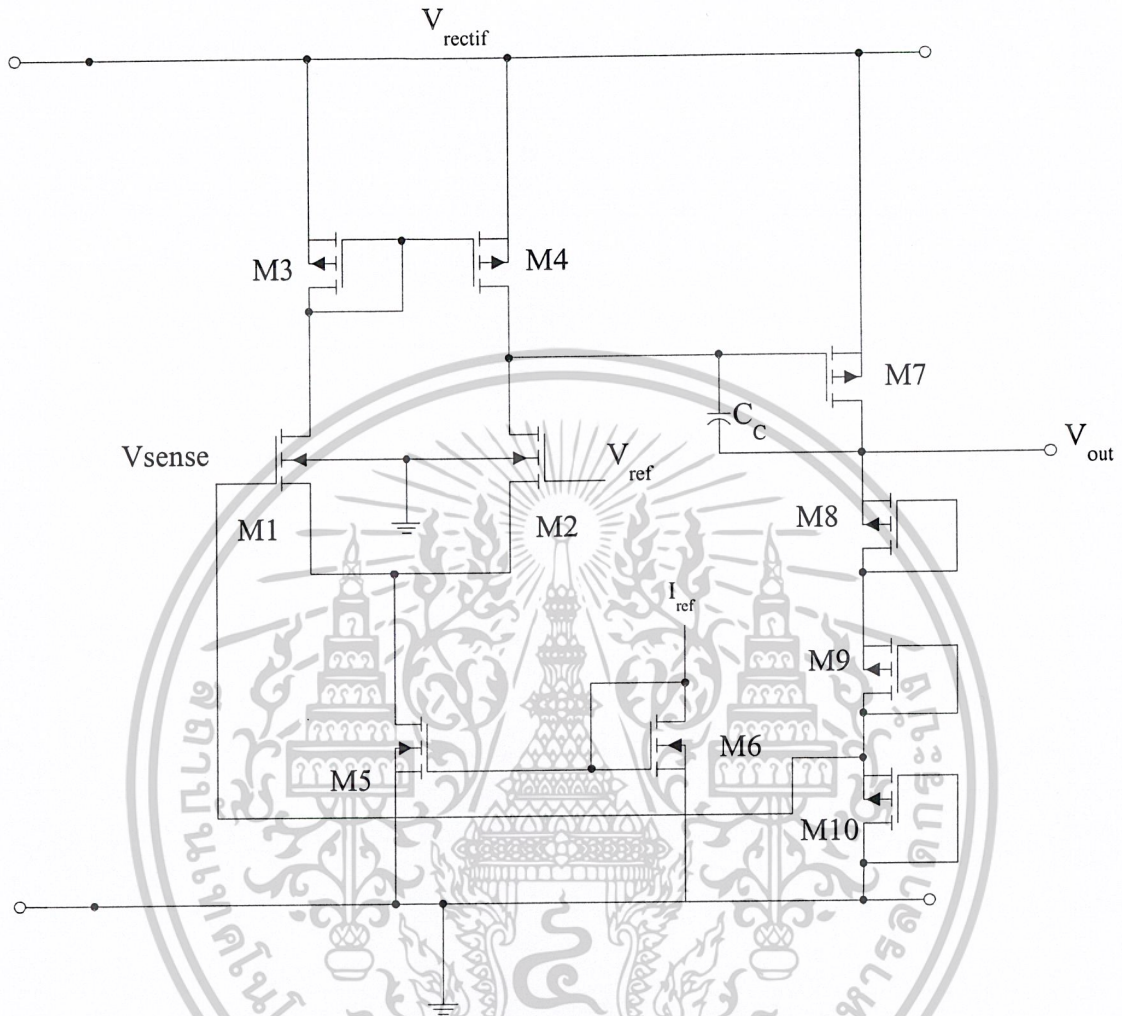
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรจำกัดแรงดันที่กำหนดขนาดของมอสทรานซิสเตอร์จากการออกแบบโดย W/L มีหน่วยเป็นไมโครเมตร/ไมโครเมตร

4.3 การออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดัน

หลักการในการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดัน จะต่างไปจากการออกแบบวงจรจำกัดแรงดัน วงจรรักษาระดับแรงดันนั้นจำเป็นจะต้องสร้างแรงดันที่มีเสถียรภาพสูงมากพอที่จะนำไปใช้เป็นไฟเลี้ยงให้แก่ตัววงจรสมาร์ตการ์ดได้ ดังนั้น เพื่อเสถียรภาพที่ดีของแรงดันที่ใช้เป็นไฟเลี้ยง จึงต้องใช้โครงสร้างของออปแอมป์ที่มีระบบป้อนกลับแบบลบมาช่วย เพื่อให้เสถียรภาพของแรงดันดีขึ้นนั่นเอง โครงสร้างของวงจรดังกล่าวได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างวงจรรักษาระดับแรงดันที่ใช้รูปแบบ

ในที่นี้กำหนดค่ากระแส I_{ref} ไว้ที่ $10\mu A$ โดยวงจรนี้ทำการรักษาระดับแรงดันที่ $3.3 V$ โดยในที่นี้กำหนดให้มี $V_{ref} = 1.2 V$ ซึ่งเป็นแรงดันที่ได้จากวงจร Bandgap Reference ซึ่งยังไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ในขณะที่วงจรทำงาน เนื่องจากมีระบบป้อนกลับแบบลบจะทำให้ได้ว่า $V_{ref} = V_{sense}$ ในที่นี้จะใช้การแบ่งแรงดันด้วยมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีดังรูปที่ 4.6 เพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่มากกว่าการใช้ตัวต้านทานธรรมดา ในที่นี้กำหนดให้แรงดันเทรชโฮลมีค่าประมาณ $0.45 V$ โดยจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \left(\frac{W}{L}\right)_{10} &= \frac{2I_1}{K'(V_{GS} - V_t)^2} \\ &= \frac{2(1)}{60(1.2 - 0.45)^2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.0593 = \frac{1.2\mu}{20\mu}$$

ส่วนการคิดขนาดมอส M8 และ M9 นั้น คิดโดยนำแรงดันที่เหลือจากการลบกันระหว่าง 3.3 v กับ 1.2 v แล้วนำมาหารสองเพื่อเป็นแรงดันตกคร่อมมอสทรานซิสเตอร์แต่ละตัว ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left(\frac{W}{L}\right)_{8,9} &= \frac{2I_1}{K'(V_{GS} - V_T)^2} \\ &= \frac{2(1)}{60(1.05 - 0.45)^2} \\ &= 0.09259 = \frac{1.85\mu}{20\mu} \end{aligned}$$

ถ้าพิจารณารูปที่ 4.6 จะพบว่า มีโครงสร้างเป็นออปแอมป์นั่นเอง ซึ่งมีวงจรถูกแรกเป็นวงจรรายความแตกต่าง (Differential Amp) ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันภาคแรกเป็น

$$A_{v1} = g_{m1} R_{OUT1} \quad (4.2)$$

โดยที่

$$g_{m1} = \sqrt{2K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_1 \frac{I_{ref}}{2}} \quad (4.3)$$

$$R_{OUT1} = r_{o2} // r_{o4} = \frac{1}{g_{o2} + g_{o4}} = \frac{1}{(\lambda_2 + \lambda_4) \frac{I_{ref}}{2}} \quad (4.4)$$

ดังนั้น

$$A_{v1} = \frac{\sqrt{2K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_1 \frac{I_{ref}}{2}}}{(\lambda_2 + \lambda_4) \frac{I_{ref}}{2}}$$

$$A_{v1} = \frac{2\sqrt{K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_1}}{(\lambda_2 + \lambda_4) \sqrt{I_{ref}}}$$

$$A_{v1}^2 = \frac{4K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_1}{(\lambda_2 + \lambda_4)^2 I_{ref}}$$

ดังนั้น

$$\left(\frac{W}{L}\right)_1 = \frac{A_{v1}^2 I_{ref} (\lambda_2 + \lambda_4)^2}{4K'_N} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้กำหนดให้ $\lambda = 0.3V^{-1}$ ทั้งในกรณีเอ็นมอสและพีมอส และออกแบบให้มีอัตราขยายแรงดันภาคแรกเท่ากับ 10 กำหนดให้ $I_{ref}=10\mu A$ ดังนั้น จาก (4.5) จะได้ว่า

$$\left(\frac{W}{L}\right)_1 = \frac{10^2(10\mu)(0.3+0.3)^2}{(4)175\mu}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_1 = 0.514$$

$$\text{เลือก } \left(\frac{W}{L}\right)_1 = \frac{10\mu}{10\mu}$$

เนื่องจาก V_{sense} เปรียบเสมือนเป็นอินพุตของออปแอมป์ ซึ่งมีโอกาสแกว่งขึ้นลงได้ ในที่นี้ การออกแบบเพื่อให้การกำหนดทำได้ง่ายจะพิจารณาให้ว่า ต้องออกแบบให้มีอินพุตทั้งขาบวกและขาลบได้กว้างที่สุดเท่าที่จะทำได้ กล่าวคือ เป็นคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ดีนั่นเอง จากการพิจารณาวงจรตามรูปที่ 4.6 ได้ว่า

$$\begin{aligned} V_{sense}^- &= V_{DSAT5} + V_{GS1} \\ &= \sqrt{\frac{2I_5}{K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_5}} + \sqrt{\frac{2I_1}{K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_1}} + V_{t1max} \\ &= \sqrt{\frac{2I_{ref}}{K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_5}} + \sqrt{\frac{I_{ref}}{K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_1}} + V_{t1max} \end{aligned} \quad (4.6)$$

ถ้าต้องการให้มี V_{sense}^- มีค่าต่ำที่สุด เทอมแรกของทางขวาของสมการที่ (4.6) ต้องมีค่าน้อยกว่าเทอมที่สอง อย่างไรก็ตาม ใดก็ดี จะเป็นการทำให้ขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ M5 มีขนาดโตเกินไป จากการพิจารณาแทนค่าต่างๆในสมการที่ (4.6) โดยให้ $V_{t1max}=0.6V$ จะได้ว่า

$$V_{sense}^- = \sqrt{\frac{2I_{ref}}{K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_5}} + 0.839$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองพิจารณาแทนค่า $\left(\frac{W}{L}\right)_5 = 100 = \frac{100\mu}{1\mu}$ จะได้ว่า $V_{sense}^- = 0.87\text{ V}$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในระดับที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการลดพื้นที่ของมอสทรานซิสเตอร์อีก ก็อาจทำได้จากการพิจารณารูปที่ 4.6 อีกครั้ง จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 V_{sense}^+ &= V_{rectif} - V_{DSAT3} - V_{DSAT1} + V_{GS1} \\
 &= V_{rectif} - V_{DSAT3} + V_{t1min} \\
 &= V_{rectif} - \sqrt{\frac{2I_3}{K'_P \left(\frac{W}{L}\right)_3}} + V_{t1min} \\
 &= V_{rectif} - \sqrt{\frac{I_{ref}}{K'_P \left(\frac{W}{L}\right)_3}} + V_{t1min}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

ถ้าอยากให้ V_{sense}^+ มีค่ามาก จากการพิจารณาสมการที่ (4.7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 V_{rectif} + V_{t1min} &>> \sqrt{\frac{I_{ref}}{K'_P \left(\frac{W}{L}\right)_3}} \\
 \text{ดังนั้น จะกำหนดให้ว่า} \\
 V_{DD} + V_{t1min} &= 10 \sqrt{\frac{I_{ref}}{K'_P \left(\frac{W}{L}\right)_3}}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

แทนค่าต่างๆเข้าไปในสมการที่ (3.8) โดยให้ $V_{t1min} = 0.4\text{ V}$ โดยสมมติว่า V_{rectif} มีค่าต่ำสุดที่ 3.3 โวลต์

$$3.3 + 0.4 = 10 \sqrt{\frac{10\mu}{60\mu \left(\frac{W}{L}\right)_3}}$$

จะได้ว่า $\left(\frac{W}{L}\right)_3 = 1.22$

เลือกให้ $\left(\frac{W}{L}\right)_3 = 2 = \frac{2\mu}{1\mu}$

ทดลองแทนค่ากลับเข้าไปในสมการ (3.7) จะได้ว่า V_{sense}^+ มีค่าเท่ากับ 3.41 โวลต์

ภาคขยายต่อมาเป็นวงจรซอร์สร่วม (Common Source) ซึ่งก็คือ M7 นั้นเองโดยในที่นี้จะกำหนดให้มีอัตราขยายเท่ากับ 100 โดย

$$A_{v2} = g_{m7} R_{OUT2} \quad (4.9)$$

จากหลักการออกแบบออปแอมป์ 2 ภาค จะได้ว่า R_{OUT2} มีค่าประมาณเท่ากับ $3/g_{mx}$ (ในที่นี้สมมติไปเลยว่า M8 ถึง M10 มีขนาดเท่ากันและให้มีค่าทรานส์คอนดักแตนซ์เท่ากับ g_{mx}) ดังนั้น จากสมการที่ (4.9) จะได้ว่า

$$A_{v2} = 3g_{m7} / g_{mx} \quad (4.10)$$

$$A_{v2} = 3 \sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_7} \quad (4.11)$$

และแทนค่า A_{v2} เท่ากับ 100 ลงในสมการที่ 4.11 จะได้ว่า

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = 1111.11 \left(\frac{W}{L}\right)_x \quad (4.12)$$

และแทนค่า $\left(\frac{W}{L}\right)_x$ เท่ากับ 1.85/20 ลงไปในสมการที่ 4.12 จะได้ว่า

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = 102.778$$

อย่างไรก็ดี ต้องพิจารณาความสัมพันธ์อื่นๆที่ใช้ในการออกแบบออปแอมป์ด้วย โดยการทดลองนี้จะต้องออกแบบให้วงจรมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 13.56 MHz ลองพิจารณาสมการที่ 4.13 ดังนี้

$$GB = g_{m1} / C_c \quad (4.13)$$

ในที่นี้ ค่า GB คือ Gain Bandwidth Product และจะต้องแทนค่า g_{m1} เพื่อหาค่า C_c ต่อไป

$$g_{m1} = \sqrt{2K'_N \left(\frac{W}{L}\right)_1 \frac{I_{ref}}{2}} \quad (4.14)$$

$$= \sqrt{2 * 175 \mu \left(\frac{W}{L}\right)_1 \frac{I_{ref}}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{2 * 175 \mu(1) \frac{5 \mu}{2}} \\
 &= 41.833 \mu S
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 C_c &= g_{m1} / GB \\
 &= 41.833 / (2\pi * 13.56 \text{MHz}) \\
 &= 49.09 \text{pF}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

ดังนั้น ค่า C_c ต้องมีค่าน้อยกว่า 49.09 pF วงจรจึงจะทำงานได้ตามที่ออกแบบ อย่างไรก็ตาม ค่า C_c จะต้องมีค่ามากกว่า 0.22 เท่าของค่าเก็บประจุที่ต่อที่โหลด ในที่นี้สมมติว่า มีค่า 10 pF ดังนั้นค่า C_c จะต้องมีค่ามากกว่า 2.2 pF ในที่นี้ใช้ค่า 8.632 pF ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ออกแบบไว้แล้วตอนที่ทำการวาดผังภูมิ(layout) และเนื่องจากหลักการออกแบบออปแอมป์สองภาค ต้องกำหนดค่าของ Zero ให้อยู่ห่างจาก GB เท่ากับ 10 เท่า จะทำให้ได้ว่า ต้องออกแบบออปแอมป์ให้เป็นไปตามสมการที่ 4.16 ดังนี้

$$g_{m7} = 10g_{m1} \tag{4.16}$$

นั่นคือ ค่า g_{m7} มีค่าเป็น 418.33 μS

จาก

$$g_{m7} = \sqrt{2K'_p \left(\frac{W}{L}\right)_7 I_7} \tag{4.17}$$

จะได้

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = \frac{g_{m7}^2}{2K'_p I_7} \tag{4.18}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = \frac{(418.33 \mu S)^2}{2 * 60 \mu * 1 \mu}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = 1458.33$$

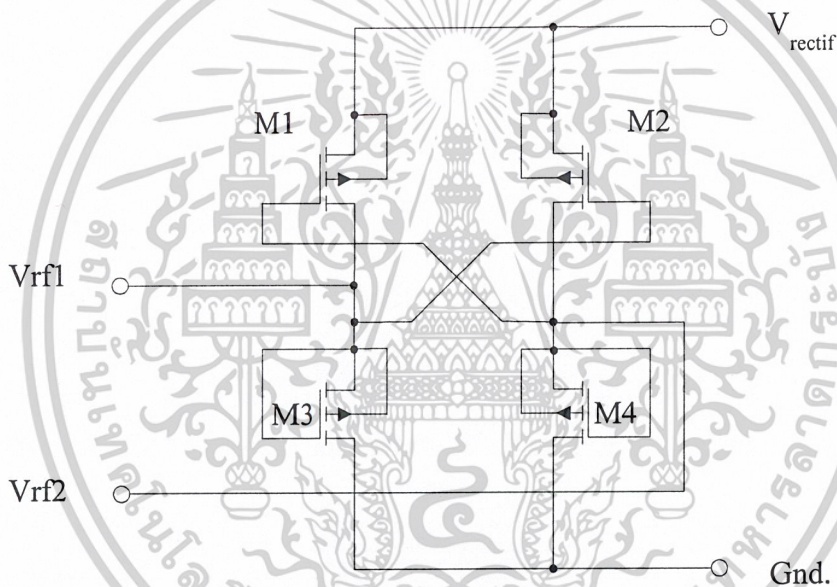
เลือก

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = 1500 \mu m / 1 \mu m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การออกแบบวงจรเรียงกระแส (Rectifier)

โครงสร้างของวงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการออกแบบครั้งนี้ มีโครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 4.7 โดยอาศัยมอสทรานซิสเตอร์จัดวงจรการทำงานให้มีการทำงานคล้ายการต่อไดโอดแบบบริดจ์ โดยกลุ่มมอสทรานซิสเตอร์ M1 และ M2 จัดวงจรในลักษณะสวิตซ์ซึ่ง ส่วน M3 และ M4 นั้น จัดวงจรเป็นไดโอด และเนื่องจากวงจรในส่วนนี้เชื่อมต่อโดยตรงกับแรงดันค่าสูงซึ่งได้จากแรงดันเหนี่ยวนำจากขดลวด จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ออสทรานซิสเตอร์ที่ทนแรงดันพังทลายได้สูงเช่นกัน การจัดวงจรลักษณะดังกล่าวช่วยลดผลของแรงดันตกคร่อมมอสทรานซิสเตอร์ เพื่อให้สามารถนำแรงดันที่กรองแล้วไปใช้งานได้อย่างเต็มที่



รูปที่ 4.7 วงจรเรียงกระแส

จากการทดลองจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวที่เหมาะสมของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่นี้คือ 1000/20 ไมโครเมตร/ไมโครเมตร จากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนนี้ มีค่าแรงดันตกคร่อมวงจรหลังจากที่ผ่านการกรองแล้ว ไม่เกิน 0.1 โวลต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น่าพอใจ รูปวงจรที่ใช้ในการทดลองจริงๆ ต้องต่อร่วมกับระบบดังที่ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 1

4.5 การออกแบบวงจร Bandgap Reference

ในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงหรือกระแสอ้างอิงให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะที่ใช้ในวงจรรวมนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเสถียรภาพสูง เพราะไม่เช่นนั้น วงจรทั้งระบบก็จะทำงานผิดพลาดไปจากที่ควรจะเป็น และในสภาวะการใช้งานวงจรหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จริงๆนั้น อาจใช้งานในหลายๆสภาวะภูมิอากาศ อุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะในอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่พบในสมการที่เกี่ยวกับการทำงานของอุปกรณ์ เช่น ไดโอด และทรานซิสเตอร์ เป็นต้น จึงมีความพยายามที่จะสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ผลผลิตดังกล่าวให้ได้

โดยปกติแล้ว ค่าแรงดันหรือกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิในทิศทางตรงกันหรือทิศทางตรงกันข้ามก็แล้วแต่ว่า อุปกรณ์นั้นๆมีคุณสมบัติเป็นอย่างไร ยกตัวอย่างเช่น แรงดันรอยต่อระหว่างขาเบสและอีมีตเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์[6] ณ อุณหภูมิห้องมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิประมาณ -1.5mV/K กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนไปในทางเพิ่มขึ้น 1K แรงดันระหว่างขาเบสและอีมีตเตอร์จะมีค่าลดลง 1.5mV ซึ่งเครื่องหมายลบในที่นี้ เป็นตัวบอกถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้ามนั่นเอง ดังนั้น ถ้าเราสามารถสร้างวงจรให้มีการหักล้างกันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของวงจรให้มีค่าเป็นศูนย์ โดยหาอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งหรือวงจรที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นบวก ก็จะสามารถสร้างวงจรที่มีแรงดันหรือกระแสที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิได้ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันต่ออุณหภูมิ ก็คืออนุพันธ์ของแรงดันดังกล่าวเทียบกับอุณหภูมินั่นเอง เราทราบว่า ค่าแรงดัน V_T (Thermal Voltage)[6] มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็น $+0.087\text{mV/K}$ ให้ลองพิจารณาสมการที่ (4.19) ดังนี้

$$\frac{\partial V_{\text{ref}}}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} + K \frac{\partial V_T}{\partial T} \quad (4.19)$$

ถ้าเราหาค่า K ที่เหมาะสมจะทำให้สามารถทำให้สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงต่ออุณหภูมิมีค่าเป็นศูนย์ได้ โดยการแทนค่าต่างๆในสมการที่ (4.19) จะได้ว่า

$$0 = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} + K \frac{\partial V_T}{\partial T} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} 0 &= -1.5\text{mV} + K0.087\text{mV} \\ K &\approx 17.2 \end{aligned} \quad (4.20)$$

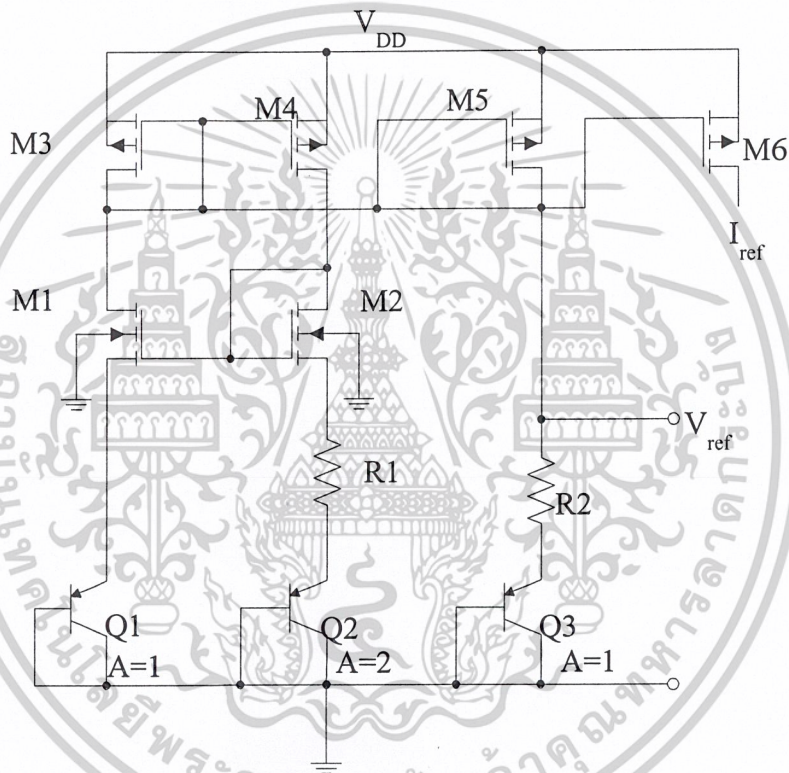
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ว่า

$$V_{ref} = V_{BE} + 17.2V_T \quad (4.20)$$

$$V_{ref} \approx 1.25$$

อย่างไรก็ดี ค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้นี้เป็นค่าโดยประมาณ ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น อาจมีค่าคลาดเคลื่อนจากนี้บ้าง การสร้างวงจรให้มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4.20) นั้น อาศัยโครงสร้างวงจรรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 โครงสร้างตัวอย่างวงจรBandgap Reference

ถ้า M1 ถึง M5 มีขนาดเท่ากัน จะได้ว่า $V_{GS1} = V_{GS2}$ ทำให้ได้ว่า

$$V_{BE1} = I_1 R_1 + V_{BE1} \quad (4.21)$$

$$\frac{V_T \ln n}{R_1} = I_1 \quad (4.22)$$

ได้ว่า

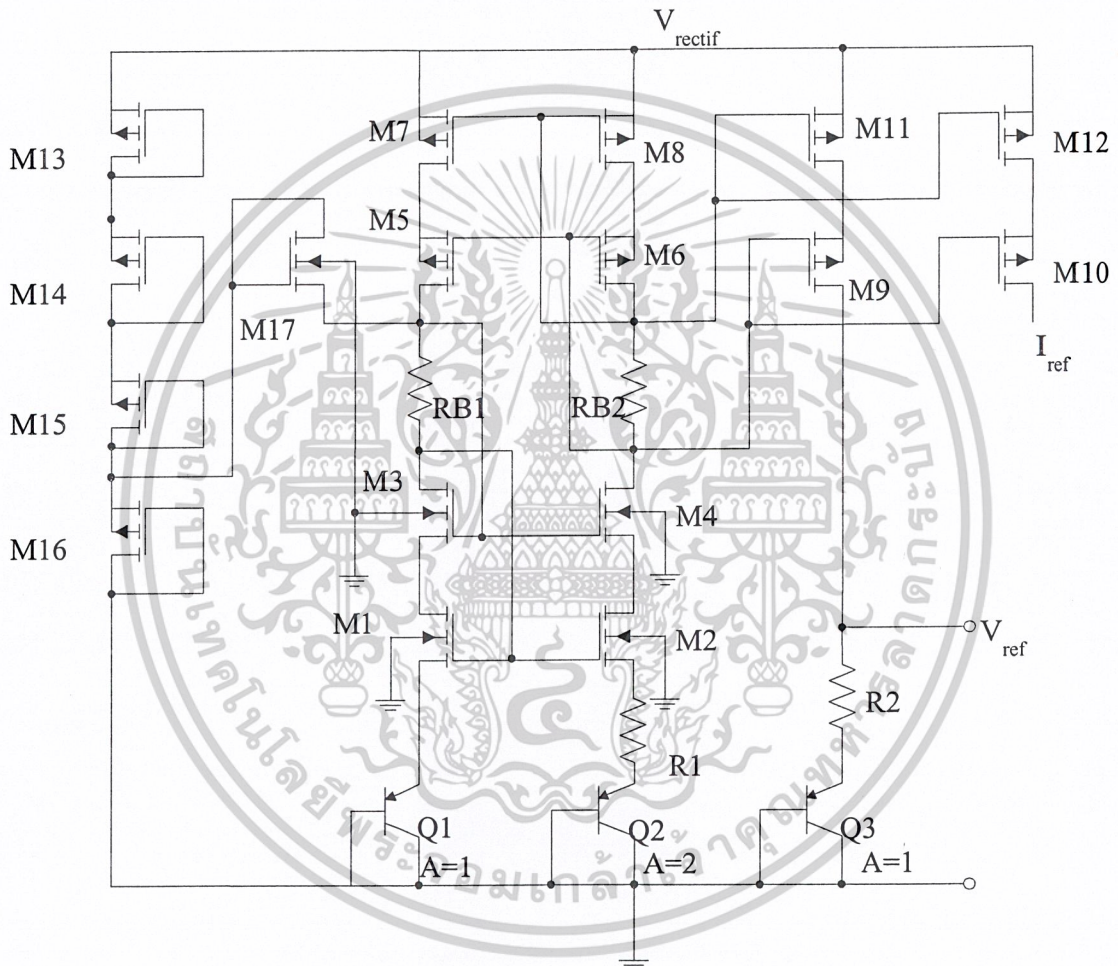
$$V_{ref} = V_{BE} + \frac{R_2 V_T \ln n}{R_1} \quad (4.23)$$

จากสมการที่ (4.23) ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_2 \ln n}{R_1} = 17.2 \quad (4.24)$$

ในการใช้งานจริง เราจะอาศัยโครงสร้างและการคำนวณตามรูปที่ 4.8 เป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อใช้ในระบบสมาร์ตการ์ด วงจรจริงที่ใช้ได้แสดงไว้แล้วตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรBandgapReference ที่ใช้ทดลอง

วงจรตามรูปที่ 4.9 มีโครงสร้างวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคดแบบไบอัสตัวเอง(self-bias cascode current mirror) ซึ่งเหมาะกับวงจรที่ใช้แรงดันต่ำ และช่วยสร้างเสถียรภาพและความแม่นยำในการสะท้อนกระแส ค่า R1 หาได้จากสมการที่ 4.24 โดยในที่นี้ให้ $n = 2$ และ $I_{D2} = 1\mu A$ ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = \frac{V_T \ln n}{I_{D1}} = \frac{25.89\text{mV}(\ln 2)}{1\mu\text{A}} \approx 17.95\text{k}\Omega \quad (4.25)$$

เพื่อให้ได้ I_{ref} เท่ากับ $10\mu\text{A}$ และค่า R_2 ไม่โตจนเกินไป ให้ $I_{D7} = 10 I_{D2}$ ได้ว่า

$$V_{ref} = V_{BE} + I_{D7}R_2 \quad (4.26)$$

$$V_{ref} = V_{BE} + 10I_{D2}R_2 \quad (4.27)$$

$$V_{ref} = V_{BE} + 10 \frac{V_T R_2 \ln 2}{R_1} \quad (4.28)$$

ดังนั้น ในที่นี้

$$10 \frac{R_2 \ln 2}{R_1} = 17.2 \quad (4.29)$$

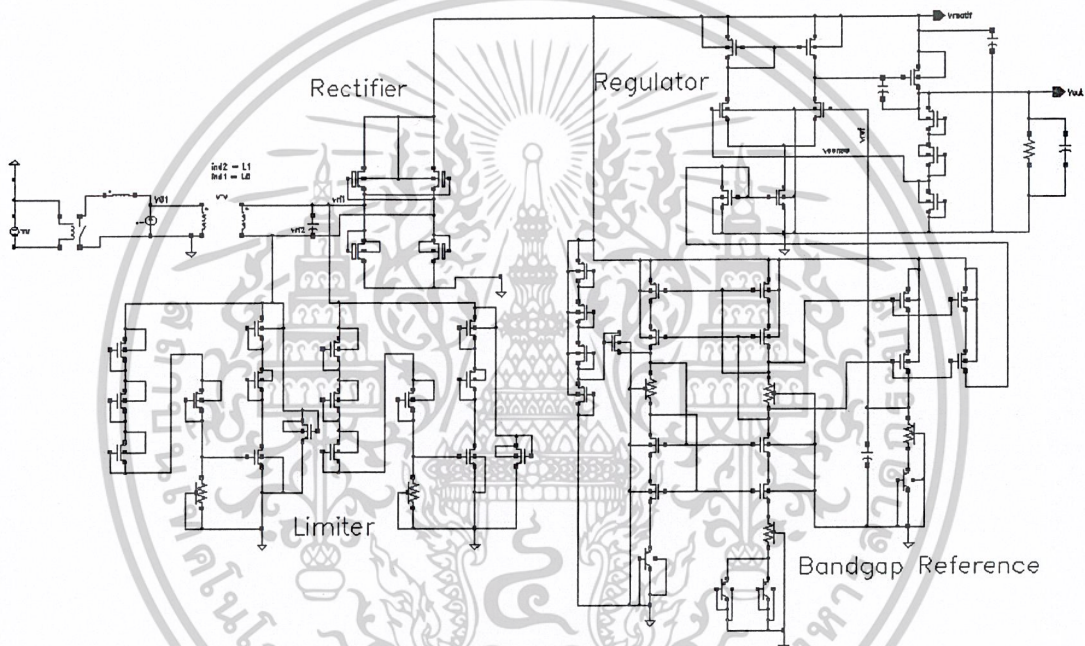
แทนค่าต่างๆเข้าไปได้ว่า

$$R_2 = 44.53\text{k}$$

ส่วนที่มาจาก R_B นั้น ค่อนข้างยุ่งยากในการอธิบายและอาจจะอยู่เหนือขอบเขตของการศึกษา จึงขอยกมาเลย โดยสามารถศึกษาได้จาก [6] ในที่นี้ใช้ค่าเท่ากับ 100k ส่วนค่า $M1$ ถึง $M4$ ใช้ค่า 10 ไมโครเมตรต่อ 1 ไมโครเมตร และ $M5$ และ $M8$ ใช้ค่า 20 ไมโครเมตรต่อ 1 ไมโครเมตร ส่วนค่า $M13$ ถึง $M17$ ต่อเป็นวงจรถ่ายภาพ เพื่อให้วงจรสะท้อนกระแสทำงานได้เร็วขึ้น

บทที่ 5 การทดลอง

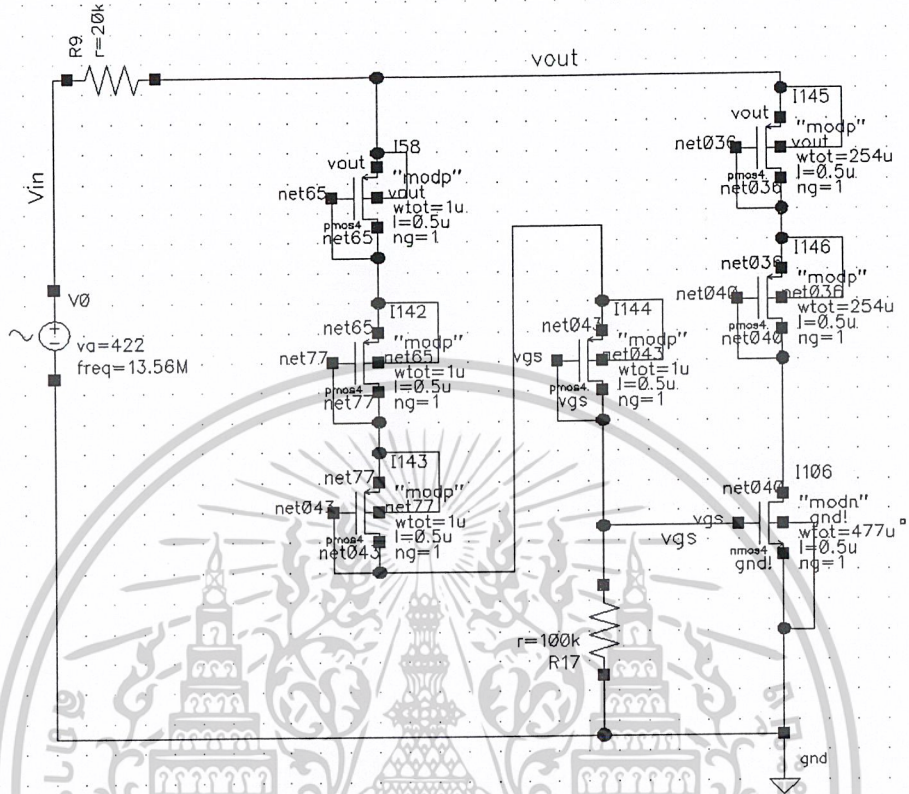
ในการทดลองนี้ จะทำการวัดผลการจำกัดแรงดันและการรักษาระดับแรงดันของวงจรที่ได้ ออกแบบไว้ในบทที่ 4 ด้วยโปรแกรมจำลองการทำงาน Cadence Spectre โดยจะทำการป้อน สัญญาณในลักษณะไฟตรงกวาดค่าไป เพื่อดูว่า วงจรทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ จากนั้น จะทำการต่อวงจรทุกวงจรที่ออกแบบไว้เข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 5.1 แล้วทำการจำลองการทำงานแบบท รานเซียนต์



รูปที่ 5.1 รูปวงจรทั้งหมดคร่าวๆที่ทำการออกแบบและทดลอง

5.1 การทดลองวงจรจำกัดแรงดัน (RF Limiter)

รูปของวงจรที่จะใช้ทดลองกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการทำงานของวงจรมัน ก็ เป็นรูปวงจรเดียวกันกับรูปที่ 4.5 ซึ่งได้แสดงไว้อีกครั้งในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นวงจรจริงที่ใช้ในการ คำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.2 แสดงวงจรจำกัดแรงดันที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
Cadence Spectre

อย่างไรก็ดี การใช้งานจริงนั้น อาจต้องทำงานกับแรงดันที่มีช่วงแรงดันกว้างหลายร้อยโวลต์ ดังนั้นในการทดลอง จะต้องตั้งค่าการกวาดแรงดันให้เหมาะสม

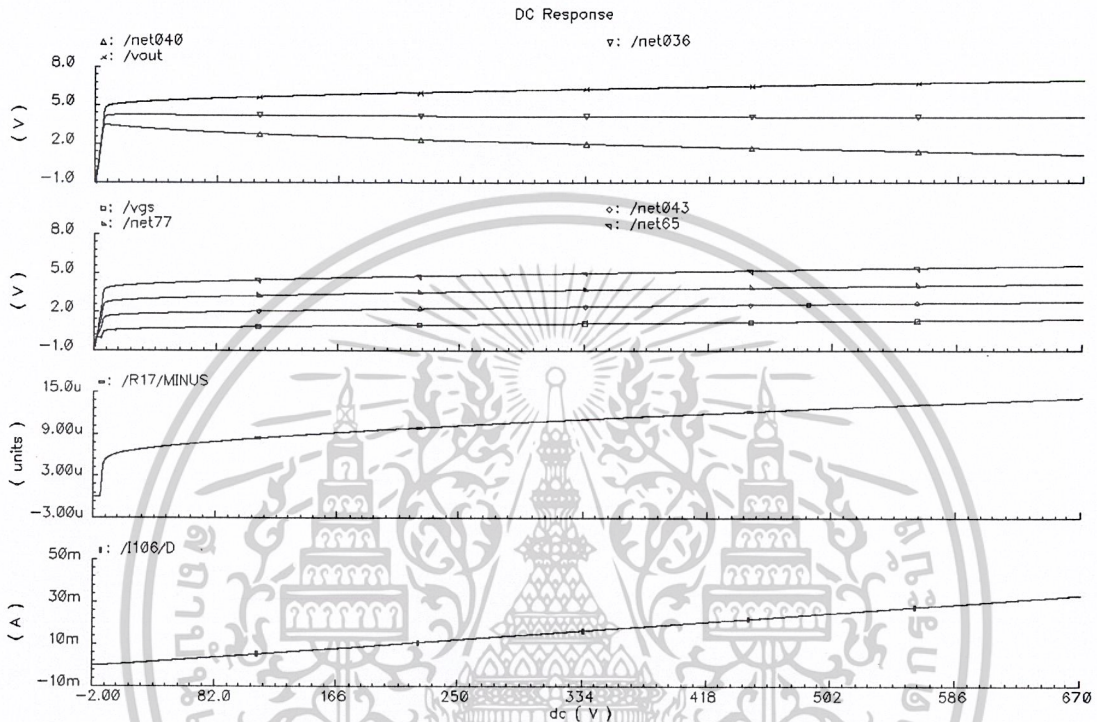
5.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการวาดวงจรตามรูปที่ 5.2 ด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ Cadence Spectre
2. ทำการบันทึกข้อมูลและตรวจสอบว่ามีความผิดพลาดในการวาดวงจรหรือไม่
3. ทำการsetupการจำลองการทำงานโดยตั้งค่าแรงดัน V0 แบบกวาด ตั้งแต่-2 ถึง 670 โวลต์
4. ทำการวัดสัญญาณ Vout และแรงดันที่โหนดต่างๆ รวมถึงกระแสที่ไหลผ่าน R17 และกระแส I106 แล้วให้พล็อตสัญญาณดังกล่าว
5. ตรวจสอบผลการจำลองการทำงานว่าเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่อย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ผลการทดลองวงจรจำกัดแรงดัน

ผลการวัดสัญญาณต่างๆได้แสดงไว้แล้วตามรูปที่ 5.3 ดังนี้



รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรจำกัดแรงดัน

5.2 การทดลองวงจรรักษาระดับแรงดันและวงจร Bandgap Reference

เช่นเดียวกันกับการทดลองวงจรจำกัดแรงดัน วงจรรักษาระดับแรงดันจะต้องทำงานกับแรงดันที่เข้ามานั้นมีช่วงกว้าง ดังนั้น ในการทดลองจะทำการป้อนสัญญาณแบบกวาดแรงดันเช่นกัน ซึ่งวงจรที่ใช้ในการทดลองจริงได้แสดงไว้แล้วตามรูปที่ 5.4 ก ซึ่งเป็นส่วนของวงจรรักษาระดับแรงดัน และ 5.4 ข ซึ่งเป็นส่วนของวงจร Bandgap Reference

5.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการวาดวงจรตามรูปที่ 5.4 ทั้ง ก และ ข ด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ Cadence HIT-KIT:3.40 เพื่อจำลองการทำงานร่วมกัน
2. ทำการบันทึกข้อมูลและตรวจสอบว่ามีความผิดพลาดในการวาดวงจรหรือไม่

3. ทำการsetupการจำลองการทำงานโดยตั้งค่าแรงดัน V0 แบบกวาด ตั้งแต่ 0 ถึง 7 โวลต์

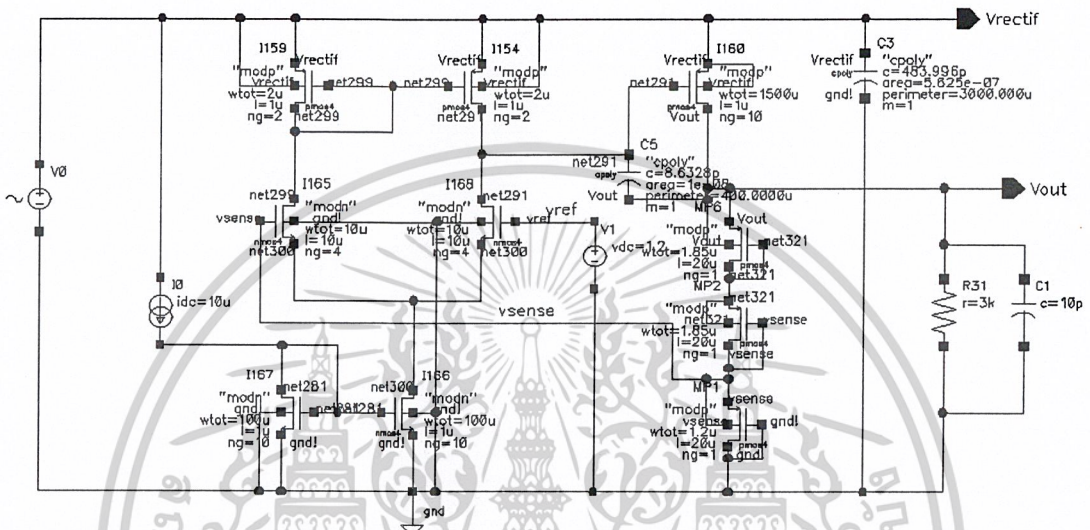
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นดาดการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำการวัดสัญญาณเทียบกับอนุภูมิ โดยตั้งค่ากวาดตั้งแต่ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส

4. ทำการวัดสัญญาณแรงดัน V_{out} แล้วให้พล็อตสัญญาณดังกล่าว

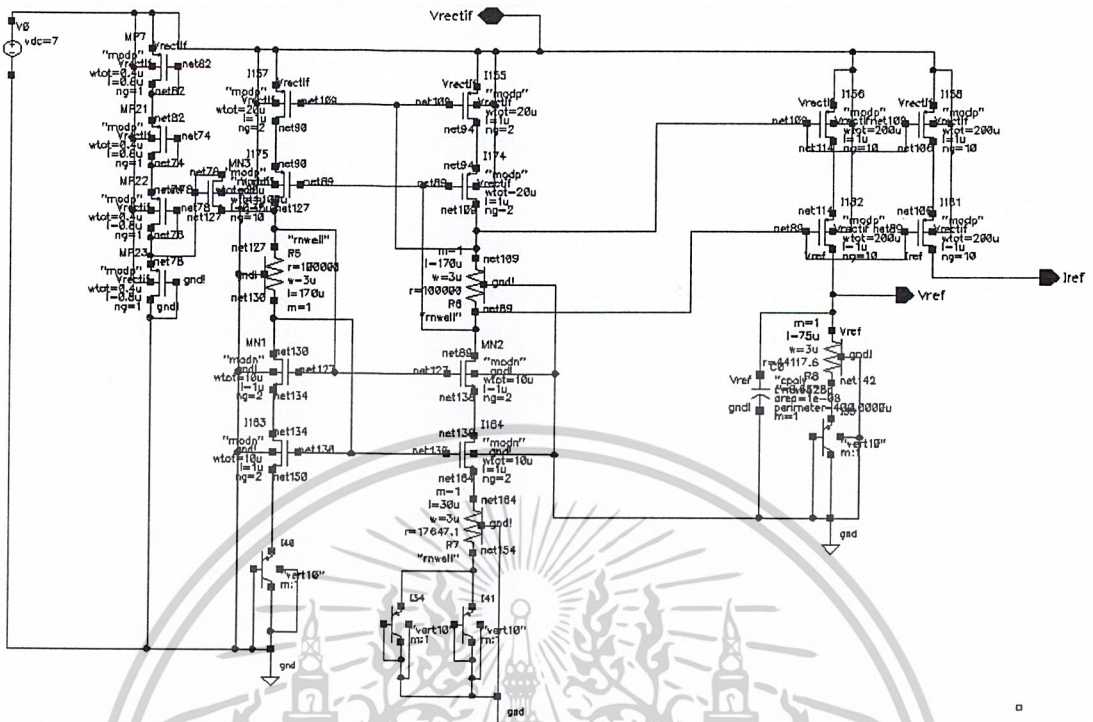
5. ตรวจสอบผลการจำลองการทำงานดูว่าเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่อย่างไร



(ก)

รูปที่ 5.4 ก) วงจรรักษาระดับแรงดันและ ข)วงจร bandgap Reference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



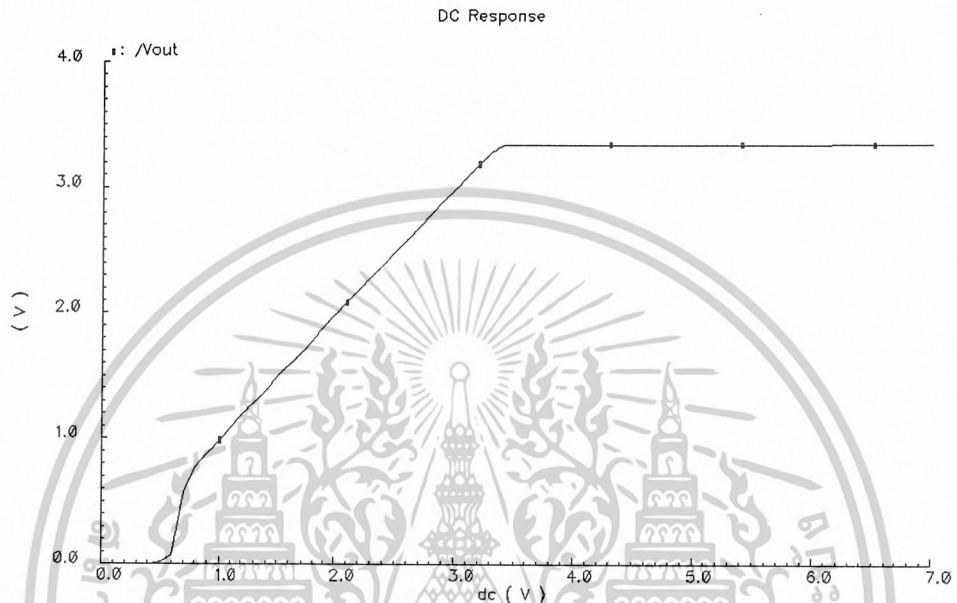
(จ)

รูปที่ 5.4(ต่อ ก) วงจรรักษาระดับแรงดันและ ข) วงจร bandgap Reference ที่ใช้
ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Cadence HIT-KIT:3.40

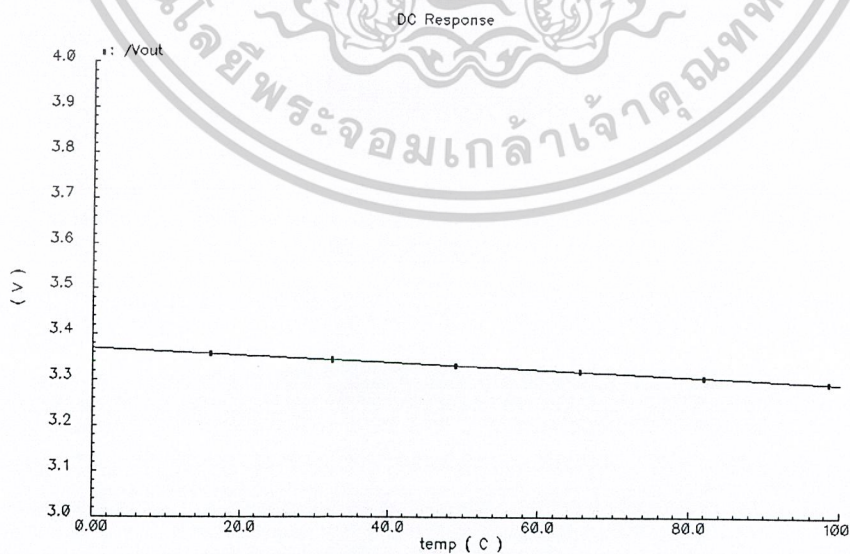
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ผลการทดลองวงจรรักษาระดับแรงดันและวงจร Bandgap Reference

ผลการทดลองตามขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้แล้วดังรูปที่ 5.5 ถึง 5.7 ดังนี้



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงานโดยพล็อตแรงดัน V_{out} ซึ่งเป็นแรงดันจากวงจรรักษาระดับแรงดัน โดยการกวาดแรงดันอินพุต (Vrectif)

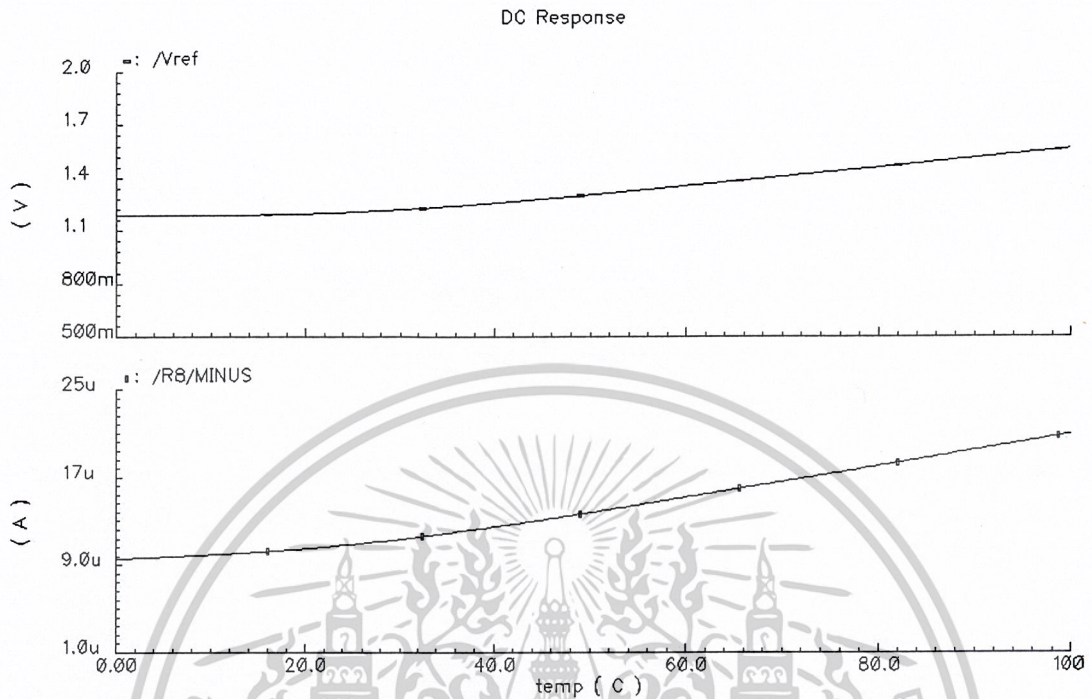


รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานโดยพล็อตแรงดัน V_{out} ซึ่งเป็นแรงดันจากวงจรรักษาระดับแรงดัน

เทียบกับอุณหภูมิ ที่แรงดันอินพุต Vrectif ขนาด 7 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



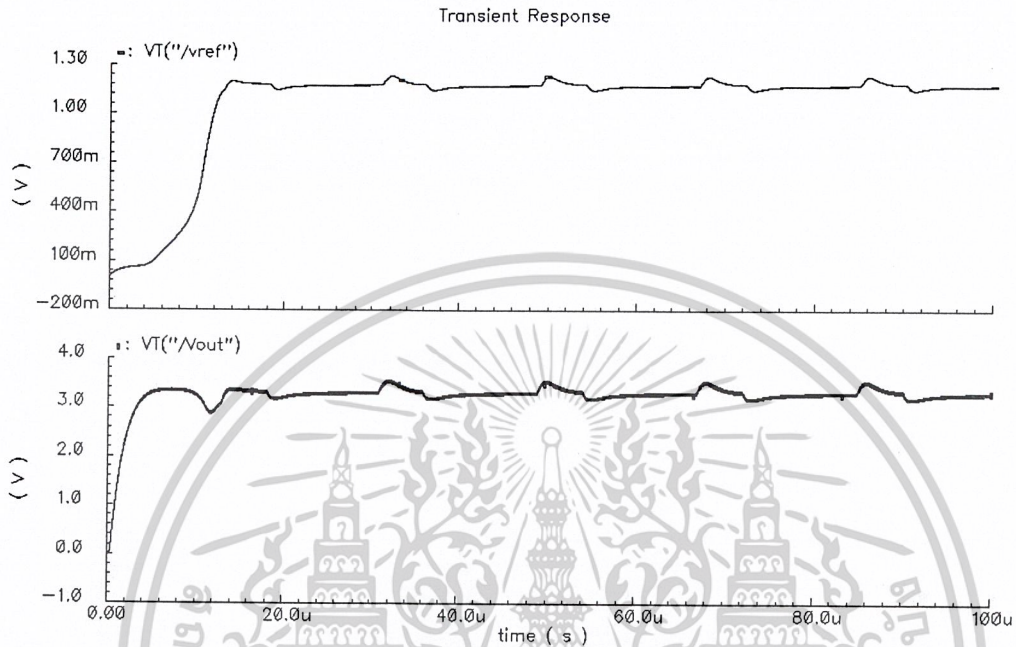
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการทำงานโดยพล็อตแรงดัน V_{ref} ซึ่งเป็นแรงดันจากวงจร Bandgap Reference และกระแสไหลผ่าน R8 เทียบกับอุณหภูมิที่แรงดันอินพุต V_{rectif} ขนาด 7 โวลต์

5.3 การทดลองวงจรทั้งระบบ

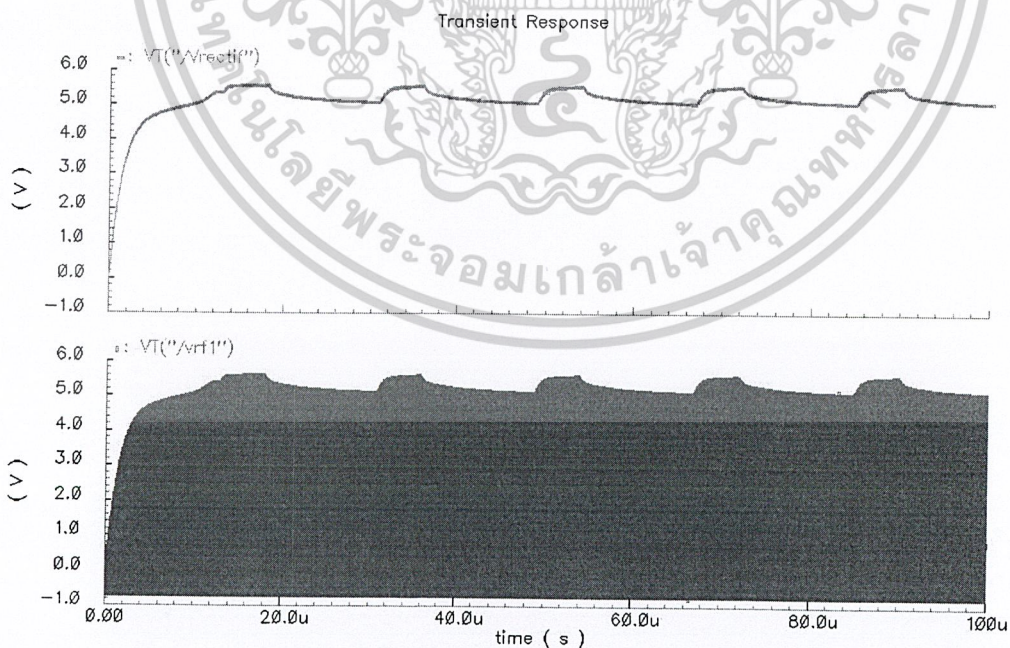
การทดลองนี้ เป็นการนำเอาวงจรต่างๆที่ได้ออกแบบไว้มาต่อร่วมกันทั้งหมด และทดลองจำลองการทำงานของวงจรโดยป้อนสัญญาณจริง เพื่อดูผลการทำงานว่าสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่อย่างไร ซึ่งลักษณะการต่อวงจรได้ดังรูปที่ 5.1 โดยการทดลองนี้ กำหนดให้มีตัวต้านทานโหลด 1k และมี ตัวเก็บประจุกรองแรงดันขนาดประมาณ 500pF อย่างไรก็ดี ค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่อไว้นี้ อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมของการใช้งานจริง

5.3.2 ผลการทดลองวงจรทั้งระบบ

ผลการวัดแรงดันต่างๆตามขั้นตอน 5.3.1 ได้แสดงไว้แล้วดังรูปที่ 5.9 ถึง 5.20

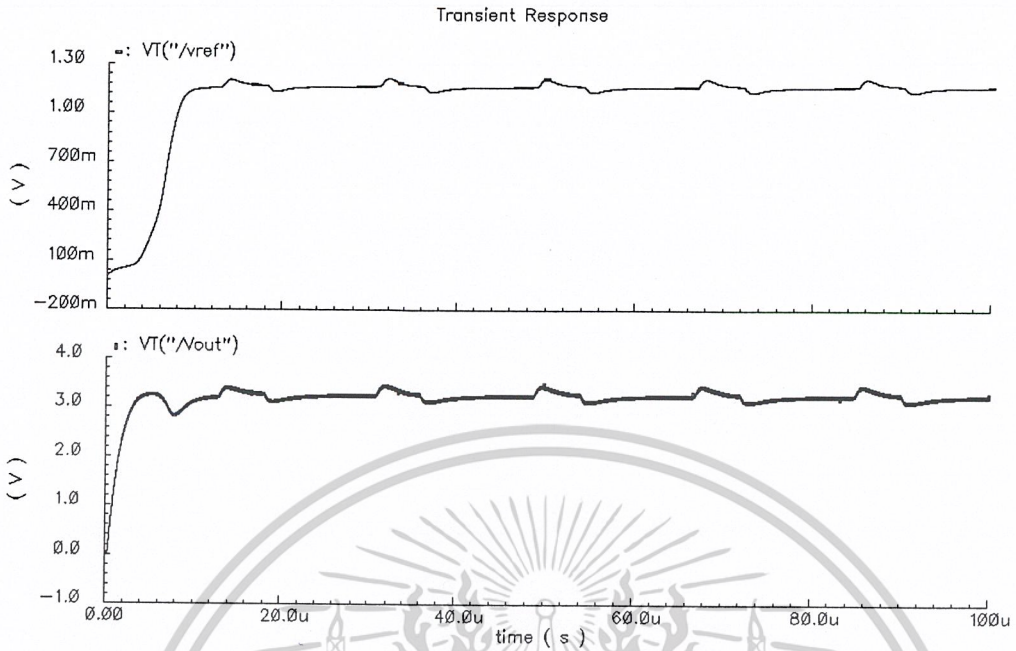


รูปที่ 5.9 ผลการพลอตแรงดัน Vref และ Vout ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส $k=0.01$

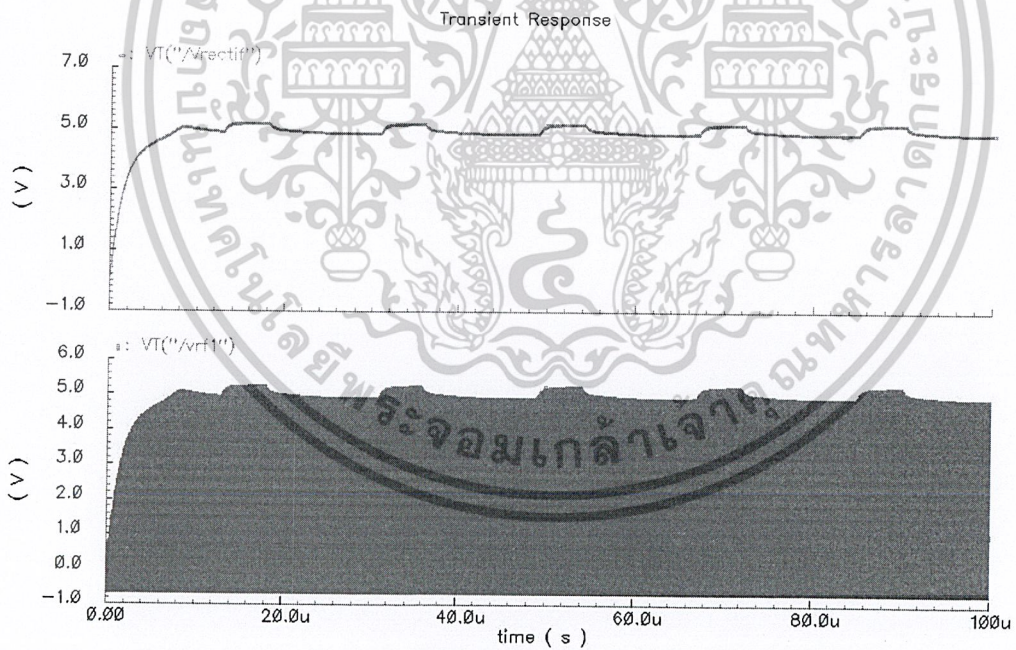


รูปที่ 5.10 ผลการพลอตแรงดัน Vrectif และ Vrf1 ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส $k=0.01$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

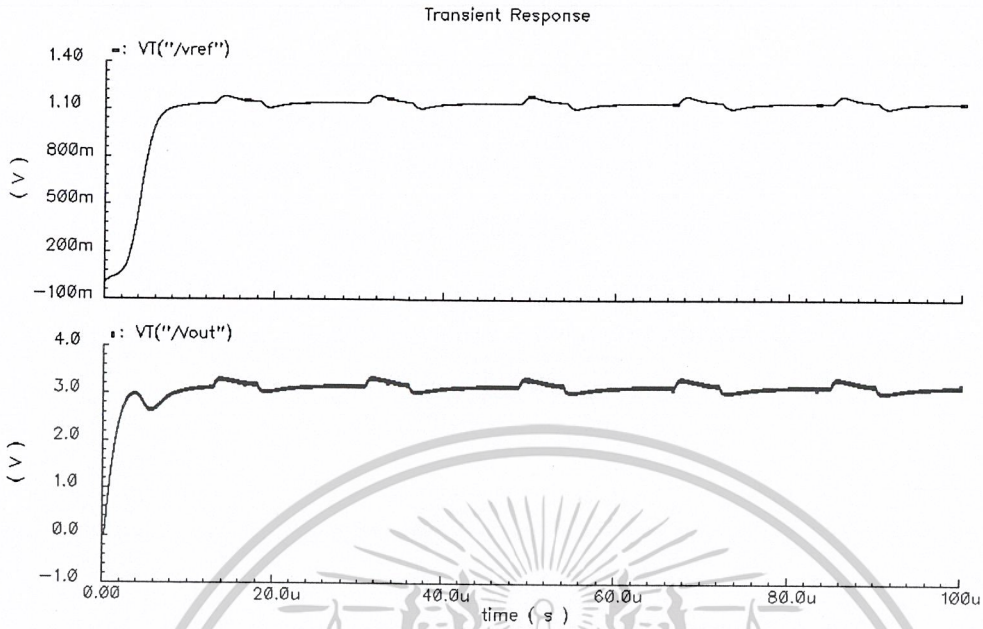


รูปที่ 5.11 ผลการพลอตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส $k=0.01$

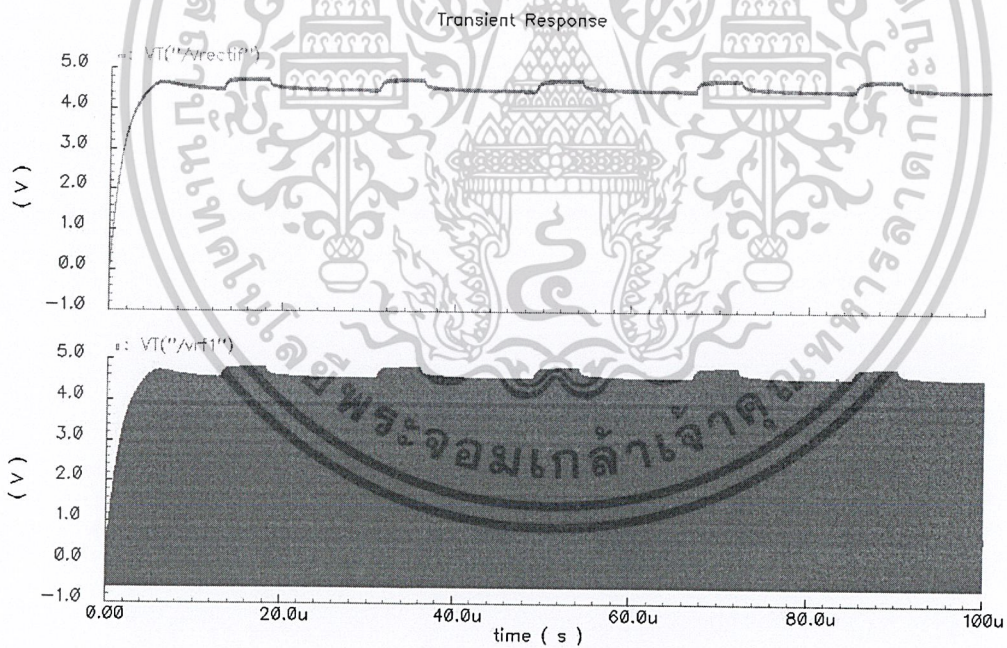


รูปที่ 5.12 ผลการพลอตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rf1} ที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส $k=0.01$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

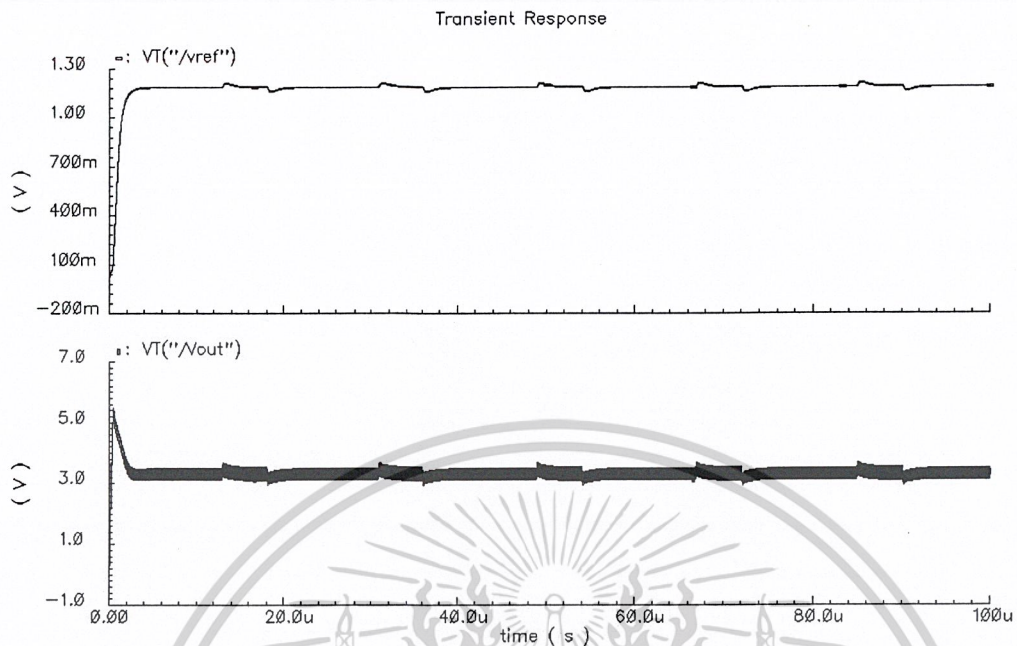


รูปที่ 5.13 ผลการพลอตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส $k=0.01$

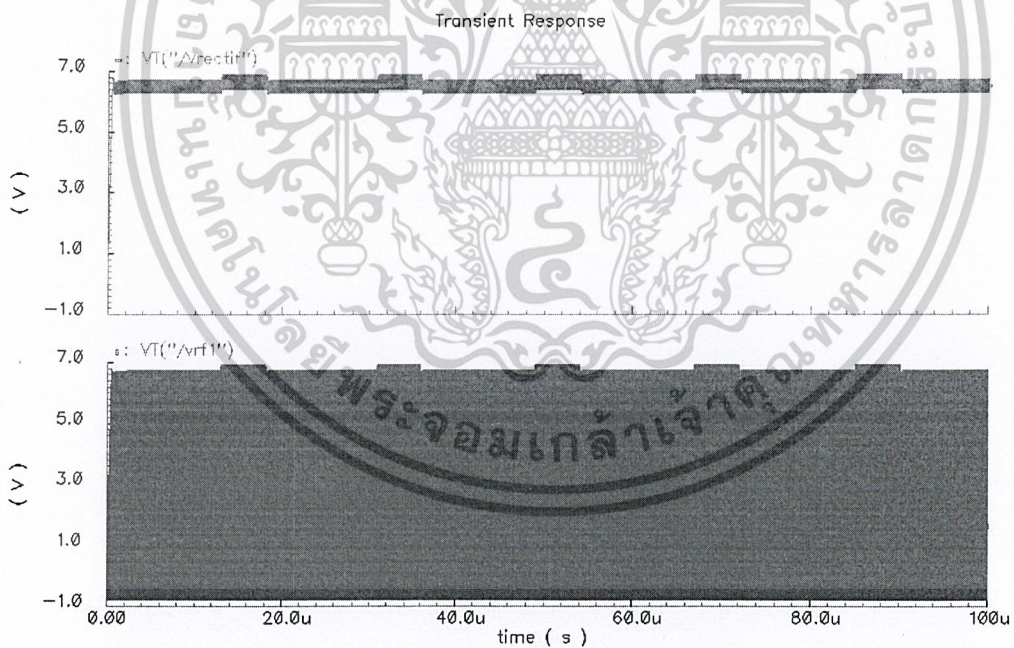


รูปที่ 5.14 ผลการพลอตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rf1} ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส $k=0.01$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

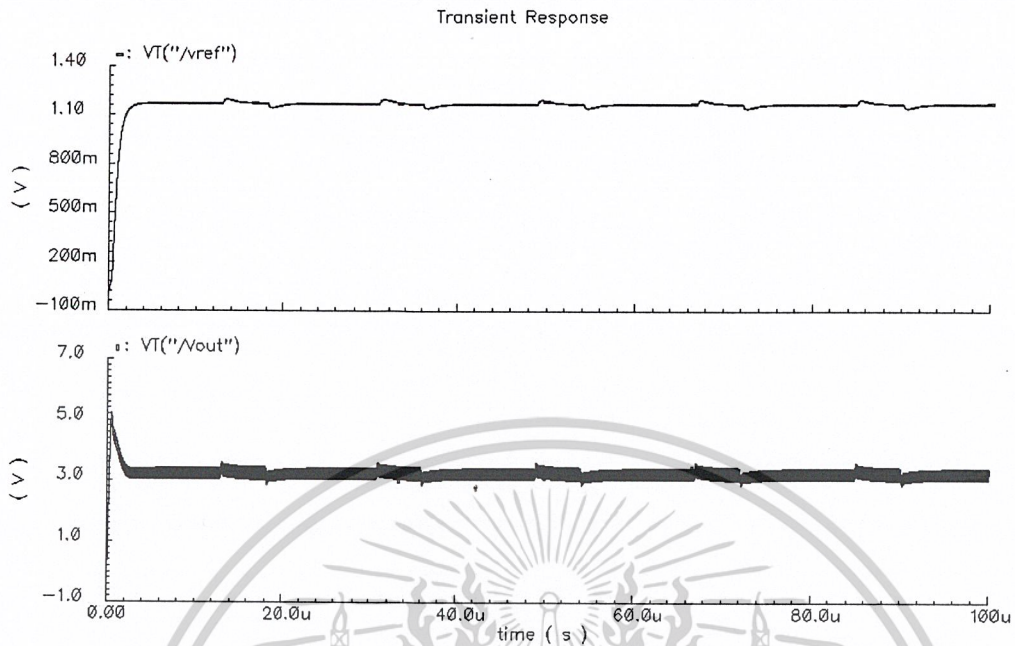


รูปที่ 5.15 ผลการพลอตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส $k=0.06$

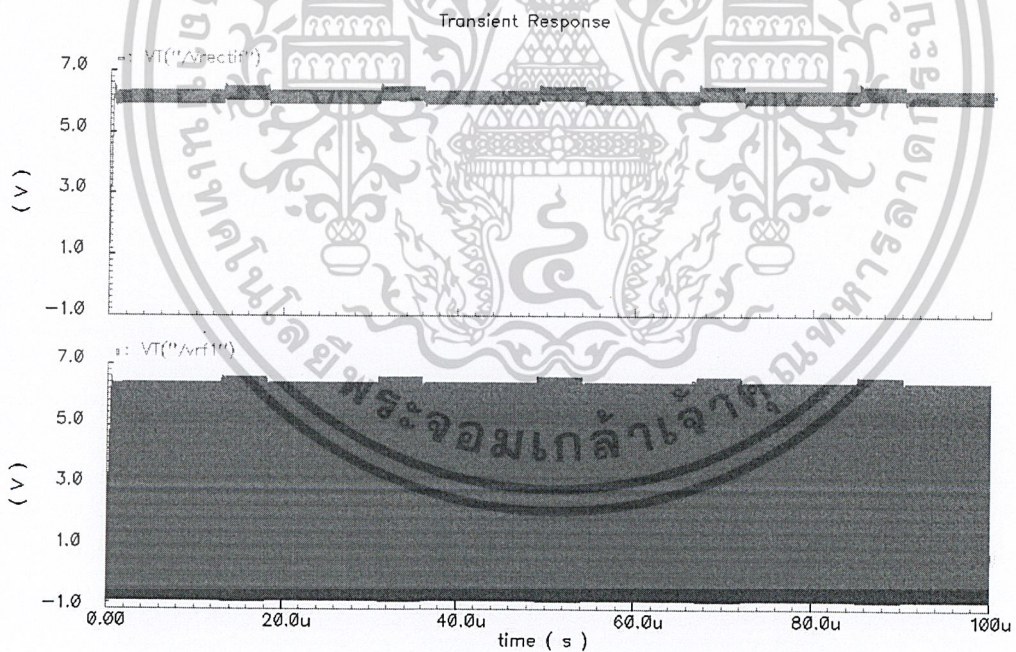


รูปที่ 5.16 ผลการพลอตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rf1} ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส $k=0.06$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

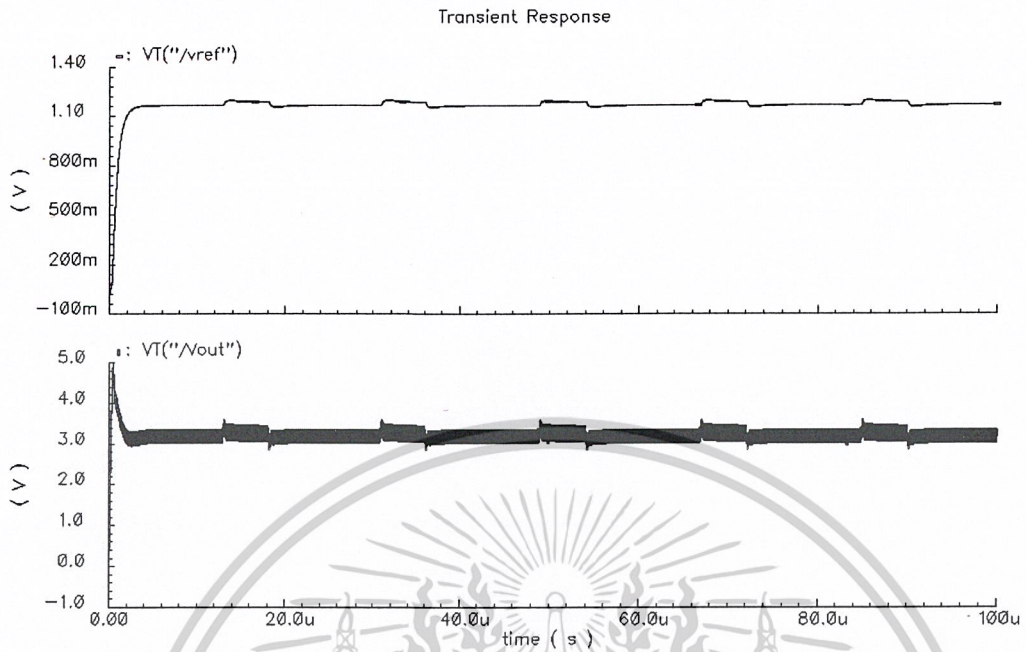


รูปที่ 5.17 ผลการพลอตแรงดัน Vref และ Vout ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส $k=0.06$

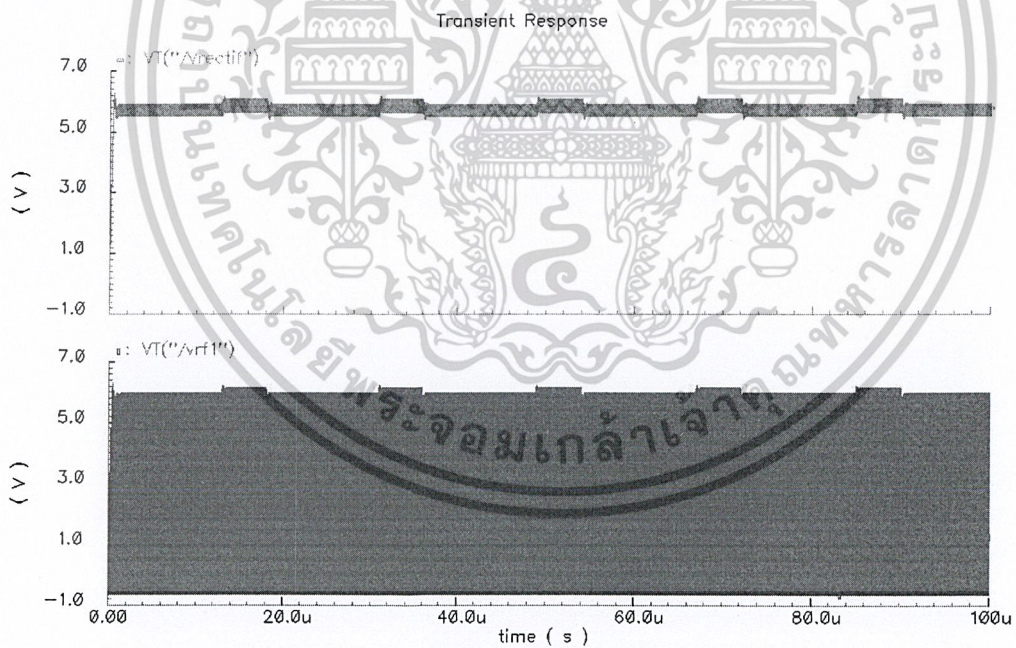


รูปที่ 5.18 ผลการพลอตแรงดัน Vrectif และ Vrf1 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส $k=0.06$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ผลการพลอตแรงดัน V_{ref} และ V_{out} ที่อุณหภูมิตั้งที่ 80 องศาเซลเซียส $k=0.06$

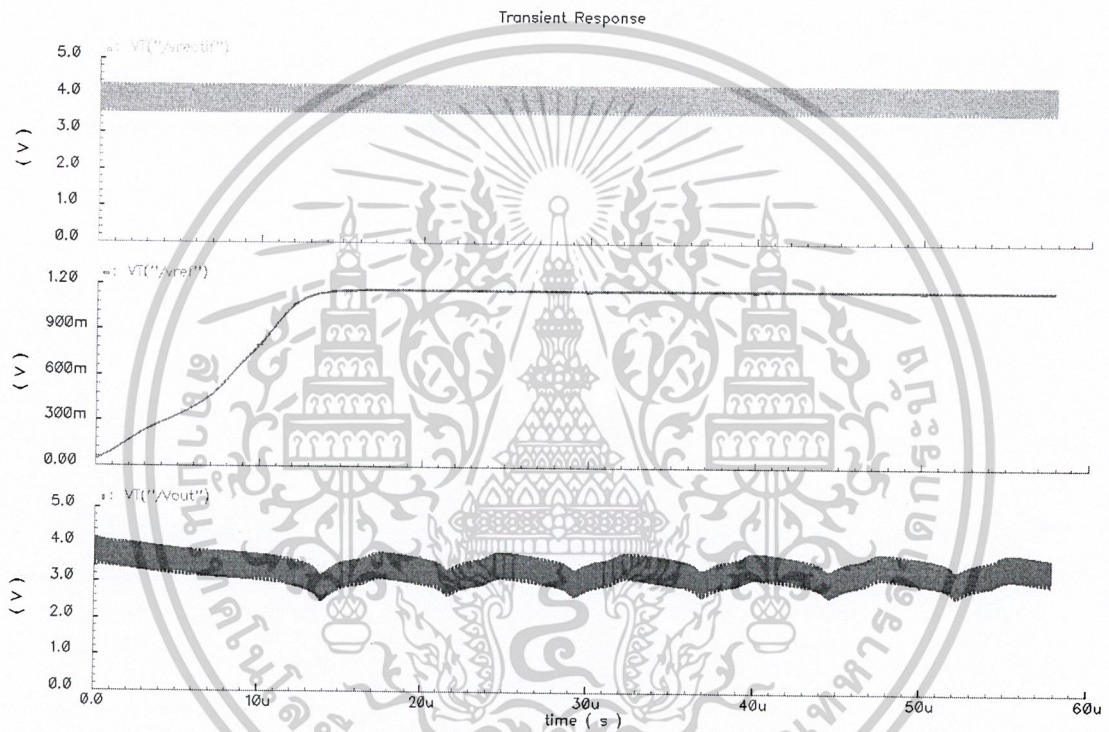


รูปที่ 5.20 ผลการพลอตแรงดัน V_{rectif} และ V_{rf1} ที่อุณหภูมิตั้งที่ 80 องศาเซลเซียส $k=0.06$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

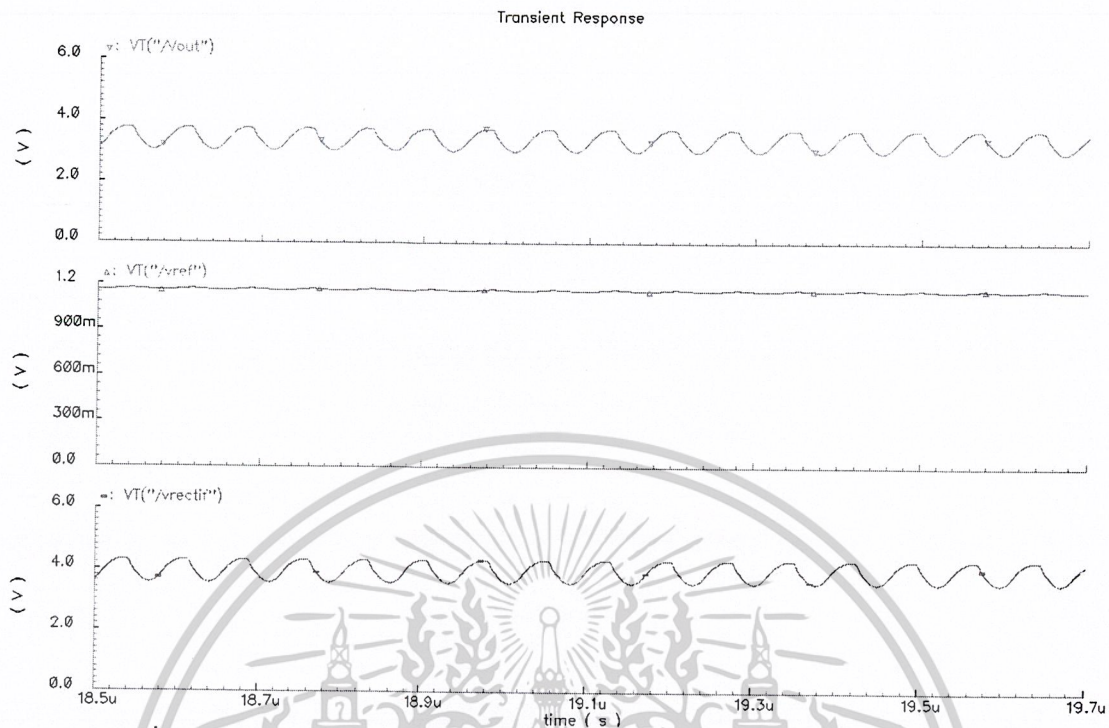
5.4 ผลการทดลองวงจรทั้งระบบจากการเดินผังภูมิ (Layout Simulation Results)

ลวดลายผังภูมิของวงจรทั้งหมดได้แสดงไว้แล้วในภาคผนวก ซึ่งได้แยกเป็นส่วนต่างๆของแต่ละวงจรรย่อยและวงจรทั้งหมด ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองจำลองการทำงานจากการเดินผังภูมิเพื่อเปรียบเทียบกับการทำงานจากวงจร โดยได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.21 และ 5.22



รูปที่ 5.21 ผลการพลอตแรงดัน Vrectif ,Vref และ Vout ตามเวลาจากผังภูมิวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 ผลการพลอตแรงดัน V_{rectif} , V_{ref} และ V_{out} ตามเวลาจากฟังก์ชันวงจรมวล เวลา steady state

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

6.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองวงจรจำกัดแรงดัน

การทดลองนี้ เป็นการทดลองป้องกันแรงดันแบบกวาดค่า พิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 5.3 จะพบว่า มีความใกล้เคียงกับการคำนวณพอสมควร โดยแรงดันที่คร่อมมอสทรานซิสเตอร์ภาคสุดท้ายแต่ละตัวก็ถือว่า มีขนาดใกล้เคียงกัน จึงป้องกันปัญหาการเกิดปรากฏการณ์พังทลายได้ ส่วนกระแส I106 ถ้าสังเกตที่แรงดันอินพุตขนาด 422 โวลต์ซึ่งเป็นแรงดันหลักที่ใช้พิจารณาในการออกแบบ จากกราฟจะพบว่า สามารถดึงกระแสได้ประมาณ 20 mA ซึ่งก็ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ และกระแสผ่านตัวต้านทาน R17 ที่แรงดันอินพุตเดียวกัน ก็มีขนาดใกล้เคียง 10uA อย่างไรก็ตาม ขนาดแรงดันที่ทำการจำกัดนั้น เมื่อทำการเพิ่มขนาดสัญญาณอินพุตมากขึ้น จะสังเกตเห็นว่า แรงดัน Vout ที่ถูกจำกัดนั้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเล็กน้อย ซึ่งอาจปรับแก้โดยการเพิ่มขนาดอัตราส่วนของ W/L ของเอ็นมอสภาคสุดท้ายให้มากขึ้น หรือเพิ่มขนาดตัวต้านทาน R17 ให้มากขึ้น แต่ก็ต้องยอมแลกกับการยอมให้มีพื้นที่ของอุปกรณ์ที่โตขึ้น ซึ่งคงจะไม่เหมาะนักกับการออกแบบวงจรรวมที่ต้องการลดพื้นที่ในการออกแบบให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ และอีกอย่างหนึ่ง วงจรนี้ทำงานกับแรงดันอินพุตในช่วงที่จำกัด ซึ่งไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำให้จำกัดแรงดันแบบคงที่ หรือมีลักษณะกราฟที่เรียบมากนัก

6.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองวงจรรักษาระดับแรงดันและวงจร Bandgap Reference

การทดลองนี้เป็นการทดลองป้องกันแรงดันแบบกวาดค่า จาก 0 ถึง 7 โวลต์ พิจารณาผลการทดลองได้จากรูปที่ 5.5 ถึง 5.7 ซึ่งจะสังเกตว่า แรงดัน Vout มีความใกล้เคียง 3.3 โวลต์มากที่สุด จากผลการทดลองพบว่า มีความคลาดเคลื่อนไม่มากนัก และพบว่า แรงดัน Vref ก็ได้ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงนั้น กระแสและแรงดันไบอัสของวงจรมีจะต้องใช้จากวงจร Bandgap Reference ซึ่งอาจจะทำให้ผลการทำงานจริงต่างไปจากนี้ได้

6.3 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองวงจรทั้งระบบ

การทดลองนี้ เป็นการจำลองการทำงานโดยป้อนสัญญาณความถี่ 13.56 MHz ให้เสมือนว่า วงจรทำงานจริงๆ จึงทำการวิเคราะห์สัญญาณแบบ Transient เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ จุดต่างๆของวงจร จากการพิจารณาตัวอย่างสัญญาณแรงดัน V_{rf} ซึ่งถูกจำกัดด้วยวงจรจำกัดแรงดันซึ่งแสดงไว้แล้วในรูปที่ 5.10 พบว่า วงจรจำกัดแรงดันไว้ที่ประมาณ 5 โวลต์ ซึ่งก็นับว่าใกล้เคียงที่ออกแบบไว้ แต่ถ้าดูรูปที่ 5.16 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงเพิ่มจาก 0.01 เป็น 0.06 จะพบว่าค่าแรงดัน V_{rf} เพิ่มขึ้นเกือบถึง 7 โวลต์ นั่นแสดงให้เห็นว่า วงจรจำกัดแรงดันยังพอที่จะสามารถทำงานได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าการคับปลิงของสัญญาณมีค่ามากกว่านี้ ก็อาจทำให้วงจรเสียหาย ลองพิจารณารูปที่ 5.9 ซึ่งแสดงแรงดัน V_{ref} และ V_{out} จะเห็นว่า แรงดันที่ได้จะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยตามสัญญาณที่มอดูเลตเข้ามา ซึ่งสัญญาณส่วนนี้ สามารถตรวจจับได้ด้วยวงจรตรวจจับข้อมูล (Data extractor) ซึ่งไม่ได้กล่าวไว้ในปัญญานิพนธ์ฉบับนี้

ตารางที่ 6.1 ผลการวัดแรงดันตามข้อกำหนดการแข่งขัน ณ ช่วงเวลา steady state ค่า $k=0.06$

อุณหภูมิตั้งที่ 27 องศาเซลเซียส

แรงดัน V_{ref} (V)	แรงดัน V_{out} เฉลี่ย (V)	แรงดัน กระเพื่อม(Ripple) (mV)	อัตรา การกระเพื่อม (%)	การกิน พลังงาน (μW)
1.16	3.39	128.41	7.79	75

* หมายถึง $R_L = 1k, C_{filter} = 500pF$

จากตารางที่ 6.1 แสดงค่าอัตราการกระเพื่อมเพียง 1.74 % เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ค่านี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ถ้าเปลี่ยนค่า R_L และ C_{filter} ไปตามความเหมาะสมในเชิงของการกินพลังงานและเสถียรภาพของแรงดันไฟเลี้ยงที่โหลดต้องการ และในแง่ของการประหยัดพื้นที่ของตัวเก็บประจุกรองนี้

6.4 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขเพื่อพัฒนาต่อ

การทดลองการออกแบบวงจรรวมครั้งนี้ต้องอาศัยเวลาในการศึกษาค้นคว้าก่อนข้างมาก ทั้งในแง่ของทฤษฎีของการออกแบบวงจร อีกทั้งทฤษฎีการเหนี่ยวนำแรงดันของขดลวดซึ่งใช้ในระบบสมาร์ตการ์ดแบบไร้สัมผัส รวมถึงข้อกำหนดที่เป็นมาตรฐานซึ่งใช้เป็นข้อบังคับในการออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบวงจรให้ทำหน้าที่เป็นไปตามที่กำหนด จึงทำให้การออกแบบและทดลองไม่สามารถทำได้ในระยะเวลาที่จำกัด ทำให้การออกแบบและการทดลองอาจจะยังไม่คืบหน้ามากนัก และจากการทดลองป้อนสัญญาณความถี่ 13.56MHz พบว่า ยังมีข้อจำกัดในการทำงานอยู่ กล่าวคือ ยังไม่สามารถจำกัดหรือรักษาระดับแรงดันได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยมีความคลาดเคลื่อนบ้างพอสมควร จึงต้องศึกษาต่อว่าจะต้องแก้ไขอย่างไร อีกทั้ง ในส่วนของวงจรเรียงกระแสนั้น อาจทำงานกับแรงดันที่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งยังคงต้องศึกษาต่อไปว่า จะหาแนวทางป้องกันและแก้ไขอย่างไร นอกจากนี้จากผลการจำลองการทำงานของผังภูมิวงจร (Layout) พบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนพอสมควร ซึ่งจะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมว่า เทคนิคในการเดินลวดลายผังภูมิวงจรเป็นอย่างไรบ้างและจะพัฒนาปรับปรุงได้อย่างไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

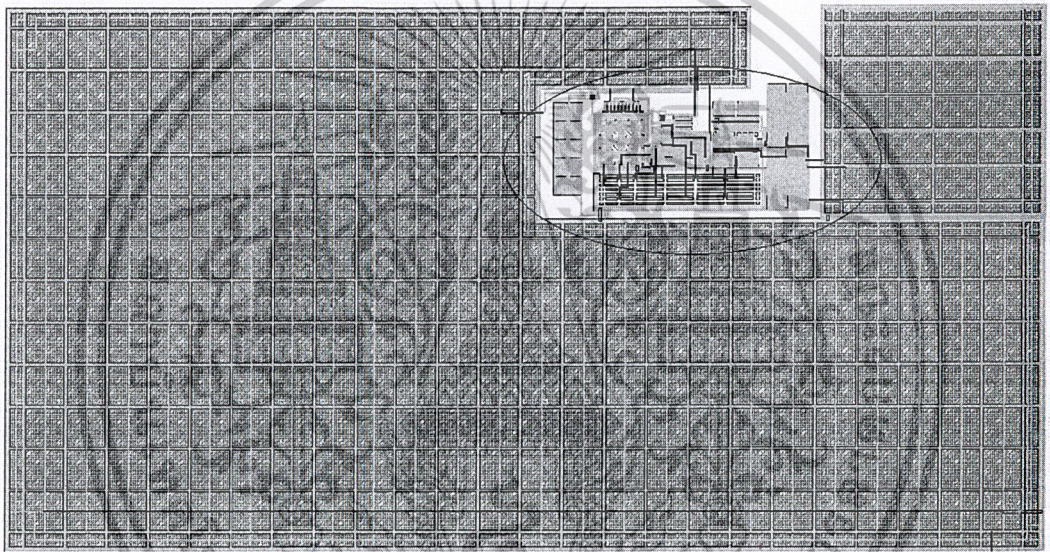


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

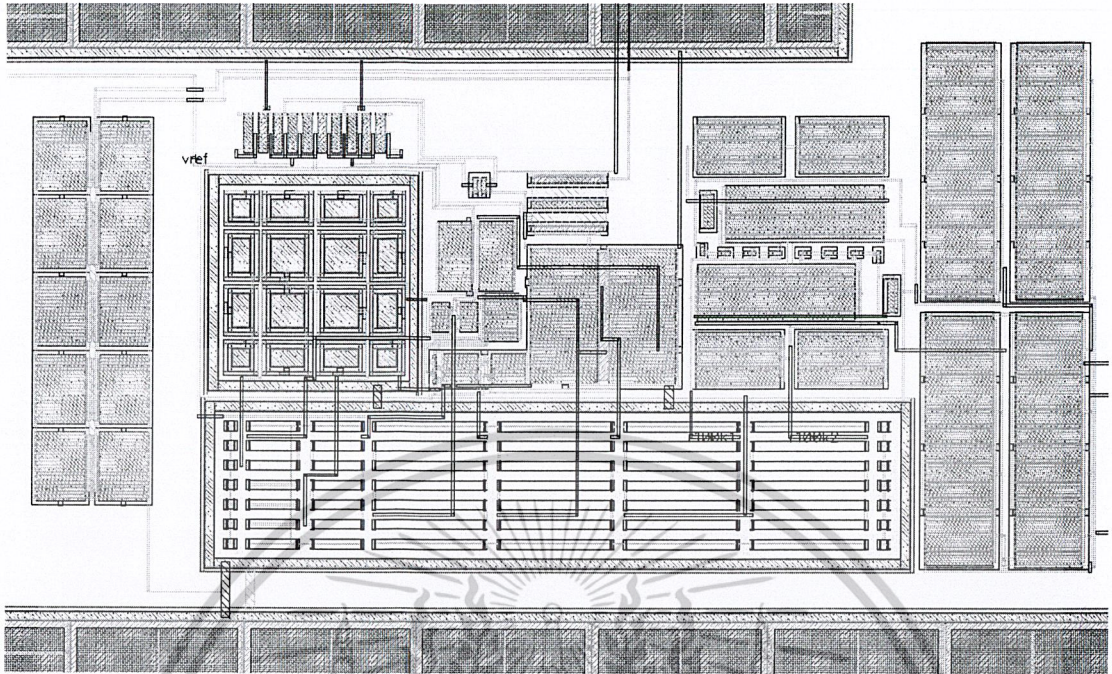
ภาคผนวก

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการศึกษาการออกแบบวงจรตั้งแต่การศึกษาการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ หลักการทำงานของวงจรที่ทำการศึกษา รวมไปถึงการออกแบบผังภูมิวงจหรือ Layout เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลจำลองการทำงานระหว่างวงจรที่ออกแบบกับผลจำลองของผังภูมิวงจร ดังนั้น จึงได้แสดงผังภูมิของวงจรที่ทำการศึกษาทั้งหมดไว้ในภาคผนวก โดยได้ทำการทดสอบความถูกต้อง DRC(Design Rule Check) และทำการ Extract ออกมาเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ ผ1 และรูปที่ ผ6 ส่วนผลการจำลองการทำงานจากผังภูมิได้แสดงไว้ในบทที่ 6

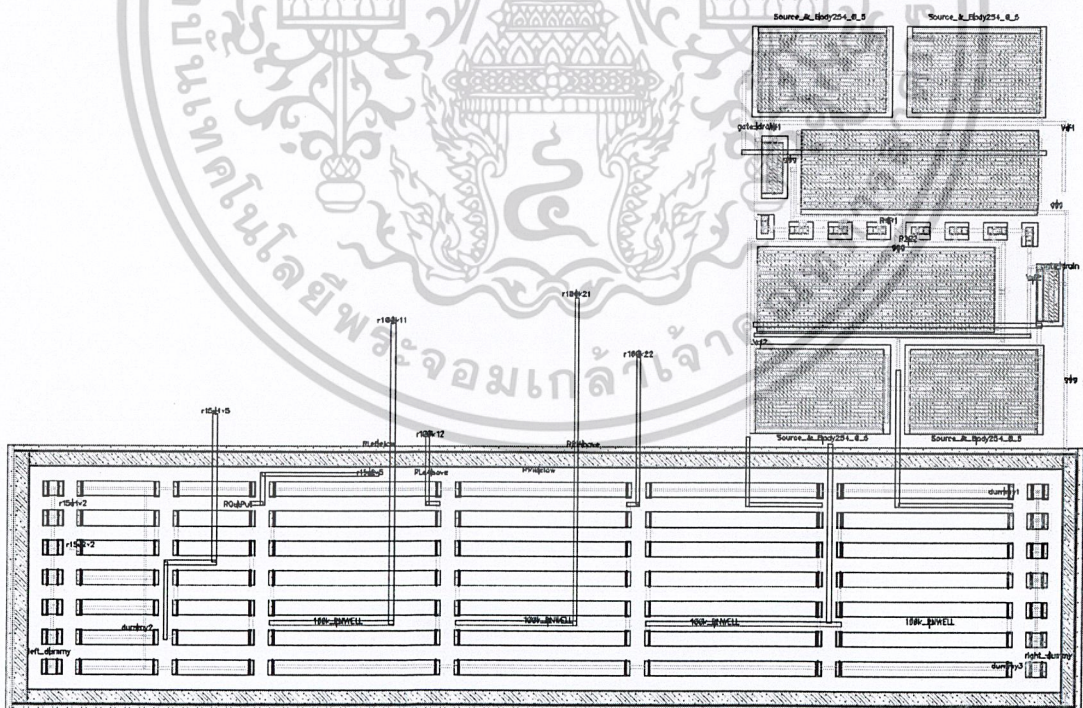


รูปที่ ผ1 แสดงผังภูมิของวงจรทั้งหมด

จะสังเกตได้จากรูปที่ ผ1 ว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ในวงจรนี้ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุเสียบเป็นจำนวนมาก ก็เนื่องจากว่า วงจรที่ทำศึกษานี้ เป็นวงจรในส่วนของวงจรแรงดันให้กับวงจรรวมที่ใช้ในสมาร์ทการ์ด ซึ่งจะต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ในการกรองแรงดันไฟตรงเพื่อให้วงจรรักษาระดับแรงดันสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนของการเดินลายผังภูมิของวงจรหลัก จึงได้แสดงรูปขยายบริเวณที่วงกลมไว้ในรูปที่ ผ1 ไว้ในรูปที่ ผ2 แล้ว ส่วนวงจรส่วนต่างของการเดินผังภูมิได้แสดงไว้ในรูปที่ ผ3 ถึง ผ4



รูปที่ ผ2 แสดงผังภูมิบริเวณส่วนของมอสทรานซิสเตอร์และวงจรหลักทั้งหมด



รูปที่ ผ3 แสดงผังภูมิบริเวณส่วนวงจรจำกัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] U. Kaiser and W. Steinhagen , “A Low-Power Transponder IC for High-Performance Identification Systems”,IEEE J. of Solid-State Circuits, Vol. 30 No. 3, March 1995, pp.306-310.
- [2] P. Villard,C. Bour,E. Dallard,D. Lattard,J. de Pontcharra,G. Robert and S. Roux, “A low-voltage mixed-mode CMOS/SOI integrated circuit for 13.56MHz applications”,2002 IEEE International SOI Conference,10/02,pp.163-164.
- [3] K. Finkenzeller,“RFID Handbook:Radio-Frequency Identification Fundamentals and Applications:translated by R. Waddington”,1999,John Wiley and Sons Ltd.
- [4] N. Panitantum¹ ,A. Yordthein¹, W. Noothong¹ ,A. Worapishet² and M.Thamsirianunt¹, “A CMOS RFID transponder”, ¹Thailand IC Design Incubator (TIDI), National Electronics and Computer Technology Center, THAILAND,²Mahanakorn Microelectronics Research Centre (MMRC), Mahanakorn University of Technology, THAILAND.
- [5] RDE2 IC Design Group Special Project TIDI, “Design Specifications,III National IC Design Contest 2003”,Electronic Reserch and Development Division,National Electronics and Computer Technology Center,THAILAND.
- [6] B. Razavi, ”Design of Analog CMOS Integrated Ciecuits”,2001,McGraw-Hill.
- [7] P.R. Gray,P.J. Hurst,S.H. Lewis,R.G. Meyer, ”Analysis and Design of Analog Integrated Circuits”,4th edition,2000,John Wiley & Sons,Inc.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ได้รับคำปรึกษาจากท่านอาจารย์ ผศ.ดร.อภิวัฒน์ ธนชยานนท์ เป็นอย่างดี อีกทั้งรุ่นพี่นักศึกษาระดับปริญญาโทที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดเวลา และขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในการใช้งานโปรแกรมจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งเครื่องมือที่คอยอำนวยความสะดวกในการทำปริญญาานิพนธ์ครั้งนี้ ณ ห้อง MDRD ด้วย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่าน รวมทั้งบิดามารดาของข้าพระเจ้า ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้