

วงจรผสมสัญญาณมอสเฟตด้วยการใช้ขาบอดี้

A MOSFET MODULATOR USING BULK TERMINAL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

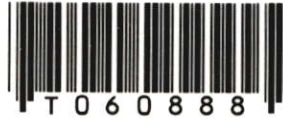
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1826-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรผสมสัญญาณมอสเฟตด้วยการใช้ขั้วบอดี้

A MOSFET MODULATOR USING BULK TERMINAL



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 60888'
- 6 ก.ศ. 2549
วัน,เดือน,ปี.....

| |
|---------|
| .b..... |
| .i..... |

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1826-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MOSFET MODULATOR USING BULK TERMINAL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
ELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

ISBN 974-15-1826-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรผสมสัญญาณมอสเฟตด้วยการใช้ขาบอดี
ชื่อนักศึกษา นายเทียนไชย นกครุฑ
รหัสประจำตัว 44061309
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ. 2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ. พลผดุง ผดุงกุล

บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอการออกแบบวงจรผสมสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแรนทร์ โดยใช้เทคโนโลยีซีมอส ซึ่งอาศัยหลักการใหม่ โดยการป้อนสัญญาณเข้าที่ขาบอดีของมอสเฟต การออกแบบเป็นการประยุกต์ใช้ขาบอดีของมอสเฟตมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งบางวงจรที่นำเสนอ สามารถทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงที่ต่ำและใช้กำลังงานน้อย การออกแบบวงจรผสมสัญญาณแอนะล็อกนี้ใช้วิธีการประมาณค่าจากอนุกรมเทย์เลอร์จากรากที่สอง ในส่วนของแรงดันซิกเรียม แล้วนำมาตัดฮาร์โมนิกส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยวิธีการบวกและลบสัญญาณ

Thesis Title A MOSFET MODULATOR USING BULK TERMINAL
Student Mr.Tienchai Nogkrut
Student ID. 44061309
Degree Master of Engineering
Programme Electronics Engineering
Year 2005
Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Polphadung Phadungkul

ABSTRACT

This Thesis presents the design of the CMOS four-quadrant analog multiplier circuit that use a new concept by driving the input signal at the body-terminal of MOSFETs. This design uses the body-terminal of MOSFETs more usefully and presents the circuits that can operate at low supply voltage and have low power consumption. In the design of analog multiplier use the approximation method from the Taylor's series for threshold voltage's square-root and eradicate the undesired series's harmonics by signal summation and subtraction to increase the electrical characteristic of the circuits.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ ด้วยคำแนะนำที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง จากอาจารย์พลผดุง ผดุงกุล ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยมีความรู้สึกราบซึ่งในความอดทนและความกรุณาจากอาจารย์เป็นอย่างสูงที่มีต่อผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบใจเพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่รัก ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครทุกคน ที่ช่วยเหลือและกอดค้ำผู้วิจัยอย่างดียิ่งเสมอมา

ขอขอบคุณคุณพ่อ และคุณแม่ ของผู้วิจัยในทุกๆกำลังใจที่ท่านให้ และท้ายสุดขอขอบคุณ อ้อย(จิราพร) ผู้เป็นทุกสิ่งของผู้วิจัย ขอคุณมาก

เทียนไชย นกรุท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 3.1 บทนำ | 15 |
| 3.2 หลักการเบื้องต้น | 15 |
| 3.3 การทำงานของวงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดัน ผลต่าง..... | 16 |
| 3.3.1 หลักการออกแบบวงจรยกกำลังสอง | 17 |
| 3.3.2 หลักการออกแบบวงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก | 18 |
| 3.3.3 ความต้านทานอินพุต | 19 |
| 3.3.4 ความต้านทานเอาต์พุต | 20 |
| 3.3.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ | 21 |
| 3.4.6 ช่วงการปฏิบัติงาน | 23 |
| 3.4 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE | 24 |
| 3.4.1 วงจรยกกำลังสอง | 24 |
| 3.4.2 วงจรคณีสัญญาณมีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง | 25 |
| 3.5 บทสรุป | 29 |
| บทที่ 4 การประยุกต์ใช้งานขาออดีของมอสเฟตในการออกแบบวงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ | 30 |
| 4.1 บทนำ | 30 |
| 4.2 หลักการเบื้องต้น | 30 |
| 4.3 การทำงานของวงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดัน เทียบกราวน์ | 31 |
| 4.3.1 หลักการออกแบบวงจรยกกำลังสอง | 31 |
| 4.3.2 หลักการออกแบบวงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก | 33 |
| 4.3.3 ความต้านทานอินพุต | 34 |
| 4.3.4 ความต้านทานเอาต์พุต | 35 |
| 4.3.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ | 36 |
| 4.3.6 ช่วงการปฏิบัติงาน | 38 |
| 4.4 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 4.4.1 วงจรยกกำลังสอง | 39 |
| 4.4.2 วงจรคูณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ | 40 |
| 4.5 บทสรุป | 44 |
| บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งานขาบอดีของมอสเฟตในการออกแบบวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 | |
| ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี..... | 45 |
| 5.1 บทนำ | 45 |
| 5.2 หลักการเบื้องต้น | 45 |
| 5.3 การทำงานของวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกต และขาบอดี..... | 46 |
| 5.3.1 หลักการออกแบบวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก | 46 |
| 5.3.2 ความต้านทานอินพุต | 49 |
| 5.3.3 ความต้านทานเอาต์พุต | 51 |
| 5.3.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ | 52 |
| 5.3.5 ช่วงการปฏิบัติงาน | 56 |
| 5.4 ผลการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม PSPICE | 58 |
| 5.5 บทสรุป | 62 |
| บทที่ 6 ผลการทดลอง | 63 |
| 6.1 บทนำ | 63 |
| 6.2 ผลการทดลองวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง | 64 |
| 6.3 ผลการทดลองวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์.... | 68 |
| 6.4 ผลการทดลองวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี | 72 |
| บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 75 |
| เอกสารอ้างอิง | 76 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|-------------------------------------|------|
| ภาคผนวก | 77 |
| ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ | 78 |
| ประวัติผู้เขียน | 84 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---------------------------------------|------|
| 2.1 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่างๆ | 7 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 โครงสร้างของมอสเฟตทั่วไป | 3 |
| 2.2 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ N-Channel | 5 |
| 2.3 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ P-Channel | 6 |
| 2.4 คุณสมบัติ $V_{gs}-I_{ds}$ ของมอสเฟตทั้ง 4 แบบ | 10 |
| 2.5 คุณสมบัติของมอสเฟต ในแต่ละช่วงการทำงาน เมื่อขาบอดี้ต่อกับขาซอร์ส | 10 |
| 2.6 วงจรสมมูลสำหรับสัญญาณขนาดเล็กรวมขาบอดี้ ของมอสเฟต | 12 |
| 3.1 วงจรยกกำลังสองที่มีสัญญาณเข้าที่ขาบอดี้ | 17 |
| 3.2 วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง | 18 |
| 3.3 วงจรยกกำลังสองที่ใช้วิเคราะห์หาความต้านทานขาเข้า | 19 |
| 3.4 วงจรสมมูลของวงจรกำลังสองที่ใช้หาความต้านทานขาเข้า | 20 |
| 3.5 วงจรสมมูลของวงจรกำลังสองที่ใช้หาความต้านทานขาออก | 21 |
| 3.6 (a) เมื่อพิจารณาเพียงครึ่งด้านของซิกซาย | 21 |
| (b) วงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่สูง | 22 |
| 3.7 วงจรสมมูลอย่างง่าย จากการประมาณค่าแล้ว | 22 |
| 3.8 วงจรสมมูลอย่างง่ายเมื่อใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์ | 23 |
| 3.9 วงจรกำลังสองที่ใช้จำลองการทำงาน | 24 |
| 3.10 ผลการจำลองการทำงานวงจรกำลังสอง | 25 |
| 3.11 วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ใช้จำลองการทำงาน | 25 |
| 3.12 ผลการจำลองการทำงานวงจรมคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณซายน์สองความถี่ $f_x=10\text{kHz}$, 50mV และ $f_y=100\text{kHz}$, 50mV | 26 |
| 3.13 ผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงวงจรมคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง | 27 |
| 3.14 ผลการจำลองการทำงานวงจรมคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณซายน์ $f=10\text{kHz}$, 50mV | 27 |
| 3.15 ผลการจำลองการทำงานวงจรมคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ | 28 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.16 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง เมื่ออินพุตทั้งสองเป็น สัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ และสัญญาณซายน์ $f=300\text{kHz}$, 50mV | 28 |
| 3.17 ผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่ วงจรคณสัญญาณแอนะลอก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง | 29 |
| 4.1 วงจรยกกำลังสอง ที่มีกระแสเป็นเอาต์พุต | 33 |
| 4.2 วงจรคณสัญญาณแอนะลอก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ | 34 |
| 4.3 วงจรยกกำลังสองที่ใช้วิเคราะห์หาความต้านทานขาเข้า | 35 |
| 4.4 วงจรสมมูลของวงจรกกำลังสองที่ใช้หาความต้านทานขาเข้า | 35 |
| 4.5 วงจรสมมูลของวงจรกกำลังสองที่ใช้หาความต้านทานขาออก | 36 |
| 4.6 (a) เมื่อพิจารณาเพียงครึ่งค้ำของซิกซาย | 36 |
| (b) วงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่สูง | 37 |
| 4.7 วงจรสมมูลอย่างง่าย จากการประมาณค่าแล้ว | 37 |
| 4.8 วงจรสมมูลอย่างง่ายเมื่อใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์ | 37 |
| 4.9 วงจรยกกำลังสองที่ใช้จำลองการทำงาน | 39 |
| 4.10 ผลการจำลองการทำงานวงจรกกำลังสอง | 39 |
| 4.11 วงจรคณสัญญาณแอนะลอก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ ที่ใช้จำลองการทำงาน | 40 |
| 4.12 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณซายน์สองความถี่ $f_x=10\text{kHz}$, 50mV และ $f_y=100\text{kHz}$, 50mV | 41 |
| 4.13 ผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ | 42 |
| 4.14 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณซายน์ $f=10\text{kHz}$, 50mV | 42 |
| 4.15 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ | 43 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.16 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ และสัญญาณซายน์ $f=300\text{kHz}$, 50mV | 43 |
| 4.17 ผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่ วงจรคณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ | 44 |
| 5.1 การป้อนสัญญาณอินพุต v_x และ v_y เมื่อ I_d เป็นกระแสเอาต์พุต | 47 |
| 5.2 วงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี สัญญาณเทียบกราวน์ v_x ป้อนเข้าขาบอดี สัญญาณคิฟเฟอเรนเชียล v_y ป้อนเข้าขาเกิด | 48 |
| 5.3 วงจรที่ใช้หาความต้านทานอินพุต | 49 |
| 5.4 วงจรที่ใช้หาความต้านทานอินพุตที่ขาบอดี | 49 |
| 5.5 วงจรที่ใช้หาค่าความต้านทานอินพุตที่ขาเกิด | 50 |
| 5.6 วงจรที่ใช้หาค่าความต้านทานเอาต์พุต | 51 |
| 5.7 วงจรที่ใช้หาผลตอบสนองเชิงความถี่ | 52 |
| 5.8 วงจรที่ใช้หาผลตอบสนองเชิงความถี่ของอินพุตที่ขาบอดี | 52 |
| 5.9 วงจรสมมูลหลังจากใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์ลดรูปวงจรรูปที่ 5.8 | 53 |
| 5.10 วงจรที่ใช้หาผลตอบสนองเชิงความถี่ของอินพุตที่ขาเกิด | 54 |
| 5.11 วงจรสมมูลหลังจากใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์ลดรูปวงจรรูปที่ 5.10 | 55 |
| 5.12 วงจรที่ใช้หาช่วงการทำงานของวงจรคณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี | 56 |
| 5.13 วงจรคณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี ที่ใช้จำลองการทำงาน | 58 |
| 5.14 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณซายน์สองความถี่ $f_x=10\text{kHz}$, 50mV และ $f_y=100\text{kHz}$, 50mV | 59 |
| 5.15 ผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี | 60 |
| 5.16 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณซายน์ $f=10\text{kHz}$, 50mV | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.17 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขา บอดี เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ | 61 |
| 5.18 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขา บอดี เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ และสัญญาณชายนี้น $f=300\text{kHz}$, 50mV | 61 |
| 5.19 ผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่ วงจรคณสัญญาณแอนะลอก 4 ควอด แดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี | 62 |
| 6.1 วงจรภายในของไอซี CD14007UB | 63 |
| 6.2 กราฟคุณสมบัติ I_{ds} ของ MOS ในไอซี CD14007UB ที่ $V_{ds} = 5\text{V}$ | 64 |
| 6.3 วงจรสร้างสัญญาณผลรวม และสัญญาณผลต่าง สำหรับวงจรคณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบ แรงดันผลต่าง และวงจรคณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง..... | 65 |
| 6.4 วงจรคณสัญญาณแอนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ประกอบเสร็จ | 65 |
| 6.5 การต่อทดลองวงจรคณสัญญาณแอนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง..... | 66 |
| 6.6 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคณสัญญาณแอนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ได้จากการคณ สัญญาณชายนี้น ความถี่ 1kHz , 250mVp และสัญญาณชายนี้นความถี่ 10kHz , 250mVp | 67 |
| 6.7 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคณสัญญาณแอนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ได้จากการคณ สัญญาณชายนี้น ความถี่ 10kHz , 250mVp และสัญญาณชายนี้นความถี่ 100kHz , 250mVp ... | 67 |
| 6.8 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคณสัญญาณแอนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ได้จากการคณ สัญญาณชายนี้น ความถี่ 100kHz , 250mVp และสัญญาณชายนี้นความถี่ 1MHz , 250mVp | 68 |
| 6.9 วงจรยกระดับแรงดันสัญญาณผลรวม และสัญญาณผลต่าง สำหรับวงจรคณสัญญาณ มีเอาต์พุต แบบแรงดันเทียบกราวน์ และวงจรคณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์..... | 69 |
| 6.10 วงจรคณสัญญาณแอนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ที่ประกอบเสร็จ | 70 |
| 6.11 การต่อทดลองวงจรคณสัญญาณแอนะลอกมีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์..... | 70 |
| 6.12 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคณสัญญาณแอนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ ที่ได้จาก การคณสัญญาณชายนี้น ความถี่ 1kHz , 250mVp และสัญญาณชายนี้นความถี่ 10kHz , 250mVp | 71 |
| 6.13 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคณสัญญาณแอนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ ที่ได้จาก การคณสัญญาณชายนี้น ความถี่ 10kHz , 250mVp และสัญญาณชายนี้นความถี่ 100kHz , 250mVp | 71 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| | 71 |
| 6.14 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ที่ได้จากการคณสัญญาณชายน์ ความถี่ 1000kHz ,250mVp และสัญญาณชายน์ความถี่ 1MHz ,250mVp | 72 |
| 6.15 วงจรยกระดับแรงดันสัญญาณอินพุต สำหรับวงจรคณสัญญาณ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ และวงจรคณสัญญาณ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ | 73 |
| 6.16 วงจรคณสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ ที่ประกอบเสร็จ | 74 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเรายังมีความจำเป็นต้องใช้วงจรประมวลผลสัญญาณแบบแอนะล็อกควบคู่กับแบบดิจิทัล ถึงแม้ว่าการออกแบบวงจรแอนะล็อกจะมีความยุ่งยากกว่าการออกแบบวงจรดิจิทัลก็ตาม แต่เพราะตามธรรมชาติสัญญาณจะอยู่ในรูปแบบแอนะล็อก ดังนั้นในการออกแบบวงจรโดยการประมวลผลด้วยดิจิทัล จึงจำเป็นต้องมีส่วนของวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และส่วนวงจรแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ดังนั้นจึงยังมีความจำเป็นต้องค้นคว้าวงจรประมวลผลแบบแอนะล็อกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในที่นี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรรวมที่เป็นวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อก จำนวนสามวงจร โดยทั้งสามวงจรมีอาศัยหลักการของการยกกำลังสองสัญญาณแอนะล็อก โดยวงจรคุณสัญญาณทั้งสามแบบใช้เทคโนโลยีซิลิคอน ซึ่งในการนำเสนองานวิจัยนี้เป็นการออกแบบวงจรโดยการประยุกต์ใช้งานมอสเฟตในรูปแบบใหม่ โดยใช้แกนขาบอดี้หรือฐานรองของมอสเฟตเป็นอินพุตของสัญญาณซึ่งจะได้กล่าวถึงผลดีและผลเสียของการนำขาบอดี้มาใช้งานต่อไป

โดยในที่นี้จะอ้างอิงจากโครงสร้างภายในของมอสเฟตในส่วนของฐานรองหรือขาบอดี้ ซึ่งโดยปกติจะเป็นส่วนที่กำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ของตัวมอสเฟต เมื่อควบคุมขาบอดี้โดยการไบแอสกลับ จะทำให้ช่องทางเดินกระแส ถูกกำหนดด้วยพื้นที่พลอตประจุ (Depletion Region) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการทำงานของมอสเฟตโดยใช้แกนขาบอดี้จะเหมือนการทำงานของเจฟเฟต จึงมีแนวความคิดว่าน่าจะนำขาบอดี้มาใช้ประโยชน์ โดยใช้เป็นขาอินพุตของสัญญาณได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “วงจรผสมสัญญาณมอสเฟตแบบใหม่ด้วยการใช้ขาบอดี้ (A NOVEL MOSFET MODULATOR USING BULK TERMINAL)” ได้กำหนดวัตถุประสงค์ไว้ดังนี้

1. เพื่อค้นคว้าการนำขาบอดี้ของมอสเฟตมาประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์มากขึ้น
2. เพื่อวิจัยหลักการใหม่ในการออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์
3. วิเคราะห์และพิสูจน์ข้อดีและข้อเสียของการนำขาบอดี้ของมอสเฟตมาใช้งาน
4. สามารถนำวงจรที่ได้ออกแบบมาประยุกต์ใช้งาน โดยสร้างเป็นวงจรรวมได้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การควบคุมปริมาณกระแสของมอสเฟต นอกจากจะควบคุมได้จากแรงดันที่ขาเกตเทียบกับขาซอร์สแล้ว ยังสามารถควบคุมได้จากแรงดันที่ขาบอดี้เทียบกับขาซอร์ส จึงได้นำหลักการนี้ มา
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้โดยไม่แจ้งชื่อผู้แต่ง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการค้นคว้าและวิจัยออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอหลักการใหม่ไว้ดังนี้

1. วงจรที่ออกแบบใช้ขาบอดี้ของมอสเฟตเป็นขาอินพุตของคุณสัญญาณแอนะล็อก
2. การออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ใช้เพียง NMOS แล้วป้อนสัญญาณอินพุตแบบผลรวมและผลต่างเข้าที่ขาบอดี้
3. การออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ใช้ NMOS และ PMOS แล้วป้อนสัญญาณอินพุตแบบผลรวมและผลต่างเข้าที่ขาบอดี้
4. การออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ใช้ NMOS และ PMOS แล้วป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขาบอดี้ และขาเกต
5. การออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ทั้งสามวงจร อาศัยหลักการประมาณค่าจากอนุกรมเทย์เลอร์ จากรากที่สองในส่วนของแรงดันซิกเริ่ม แล้วนำมาตัดผลของความถี่ฮาร์โมนิกออก ทั้งสามวงจรสามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์
2. จำลองการทำงานของวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ ด้วย PSPICE
3. วิเคราะห์หาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจร
4. ประกอบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ตามที่ได้ออกแบบไว้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานของ MOSFET เมื่อมีแรงดันที่ขาบอดี้เข้ามาเกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและประกอบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง
3. ออกแบบและประกอบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์
4. ออกแบบและประกอบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี้
5. วิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต

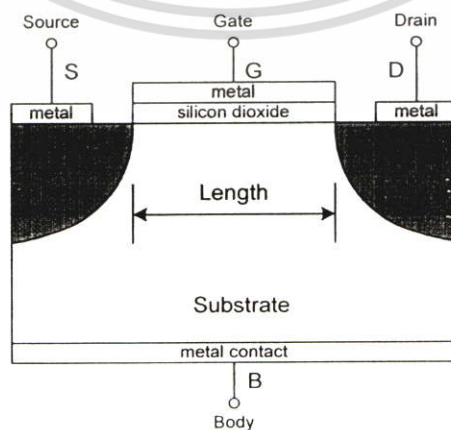
2.1 บทนำ

มอสเฟต(MOSFET) เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดขนาดของช่องทางเดินกระแส มอสเฟตแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ มอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์(Enhancement MOSFET) และมอสเฟตแบบดีพลีชัน(Depletion MOSFET) โดยทั้งสองแบบจะใช้แรงดันไฟฟ้า (Electric Field) ที่เกิดจากการป้อนแรงดันที่ขาคเกตเป็นตัวกำหนดขนาดช่องทางเดินกระแส ระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส และโดยปรกติเราจะใช้งานขาของมอสเฟตเพียง 3 ขาคู่ด้วยกัน คือ ขาคาเดรน ขาคาเกต และขาซอร์ส ส่วนขาบอดี้ หรือบริเวณฐานรอนั้น มักจะถูกใช้กำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ให้มีค่าคงที่ การใช้งานปรกติจะต่อขาบอดี้เข้ากับขาซอร์ส เพื่อให้ผลของแรงดันขีดเริ่มมีค่าต่ำสุดเท่ากับ V_{TO} แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนอการนำขาบอดี้ของมอสเฟตมาใช้งานเป็นขาอินพุตของสัญญาณ ร่วมอีกขาหนึ่ง

2.2 โครงสร้างของมอสเฟต

จากที่กล่าวมาแล้วว่ามอสเฟต เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้า(Field Effect Devices) ซึ่งมีลักษณะเด่นที่ต้องการกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ จึงเป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบวงจรร่วมทั่วไป และเมื่อศึกษา โครงสร้างการทำงานของมอสเฟตสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 เป็นภาพตัดขวาง ของโครงสร้างมอสแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ซึ่งประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 4 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนเดรน(Drain Region), ส่วนเกต(Gate Region), ส่วนซอร์ส(Source Region) และส่วนบอดี้(Body Region) โดยแต่ละส่วนมีการทำงานต่างกันดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอสเฟตทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนเดรน เป็นบริเวณสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิดกัน กับฐานรองหรือส่วนบอดี แต่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับส่วนซอร์ส โดยทำหน้าที่เป็นทางเข้าหรือออกของกระแสเดรน(กระแสระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส)

- ส่วนซอร์ส เป็นบริเวณสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิดกัน กับฐานรองหรือส่วนบอดี แต่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับส่วนเดรน โดยทำหน้าที่เป็นทางออกหรือเข้าของกระแสเดรน(กระแสระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส)

- ส่วนเกต เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างส่วนเดรนและส่วนซอร์ส โดยชั้นที่อยู่ใต้ส่วนเกตประกอบด้วยส่วนฉนวนของซิลิกอนออกไซด์ และส่วนที่อยู่บนสุดเป็นบริเวณของตัวนำ ส่วนเกตนี้ จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสที่ไหลระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส

- ส่วนบอดี หรือฐานรอง เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นฐานรองรับของส่วนอื่นๆ ปรกติจะต่ออยู่กับขาซอร์ส หรือต่อให้เกิดการรีเวอร์สไบแอส โดยทำหน้าที่กำหนดแรงดันขีดเริ่มให้กับมอสเฟต โดยมีลักษณะการควบคุมกระแสเดรนซอร์ส ผ่านบริเวณปลดประจุเช่นเดียวกับเจเฟต

จากลักษณะ โครงสร้างดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากระแสที่ขาเกตมีค่าน้อยมาก ๆ เนื่องจากความเป็นฉนวนของชั้นซิลิกอนออกไซด์ ดังนั้นการควบคุมกระแสเดรน-ซอร์ส จึงไม่ต้องการกระแสที่ขาเกต โดยต้องการเพียงแรงดันที่ขาเกตเทียบกับขาซอร์สเท่านั้น สำหรับในส่วนเดรนและส่วนซอร์สนั้น โดยปรกติแล้วจะมีโครงสร้างเหมือนกันทุกประการจึงสามารถสลับกันได้ อันเป็นคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของมอสเฟต เรียกว่ามีความสมมาตร(Bilaterally Symmetric) แต่โดยทั่วไปสำหรับ โครงสร้างของมอสเฟตเพื่อสะดวกในการใช้งานมักจะต่อขาซอร์ส เข้ากับขาบอดี ดังนั้นบางสัญลักษณ์ของมอสเฟตจึงต่อขาซอร์สเข้ากับขาบอดี หรืออาจจะเว้นไม่เขียนขาบอดีไว้ในสัญลักษณ์ โดยให้เข้าใจเองว่าขาซอร์สต่ออยู่กับขาบอดี แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำส่วนของขาบอดีมาใช้งาน ดังนั้นจึงใช้สัญลักษณ์ที่มีขาบอดีรวมอยู่ไว้ด้วย

เมื่อให้ไบแอสที่เหมาะสมกับขาต่างๆของมอสเฟต กระแสจะสามารถไหลผ่านระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส (I_{DS}) ผ่านช่องทางเดินกระแสได้ขาเกตได้ โดยช่องทางเดินของกระแสบริเวณฐานรองได้ชั้นเกต เกิดจากการเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำจาก P เป็น N หรือ จาก N เป็น P เนื่องจากแรงดันที่ขาเกตเทียบกับขาซอร์ส โดยกระแสที่ไหลระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส เกิดจากพาหะหลัก (พาหะอิเล็กตรอนสำหรับ N-Channel และพาหะโฮลสำหรับ P-Channel) เพียงชนิดเดียว ด้วยเหตุนี้มอสเฟตจึงเป็นอุปกรณ์ชนิด พาหะเดียว (Unipolar Transistor) และสามารถแบ่งชนิดของมอสเฟตได้จาก ชนิดของพาหะหลักที่ก่อให้เกิดกระแสเดรน-ซอร์ส ได้เป็นสองชนิดคือ

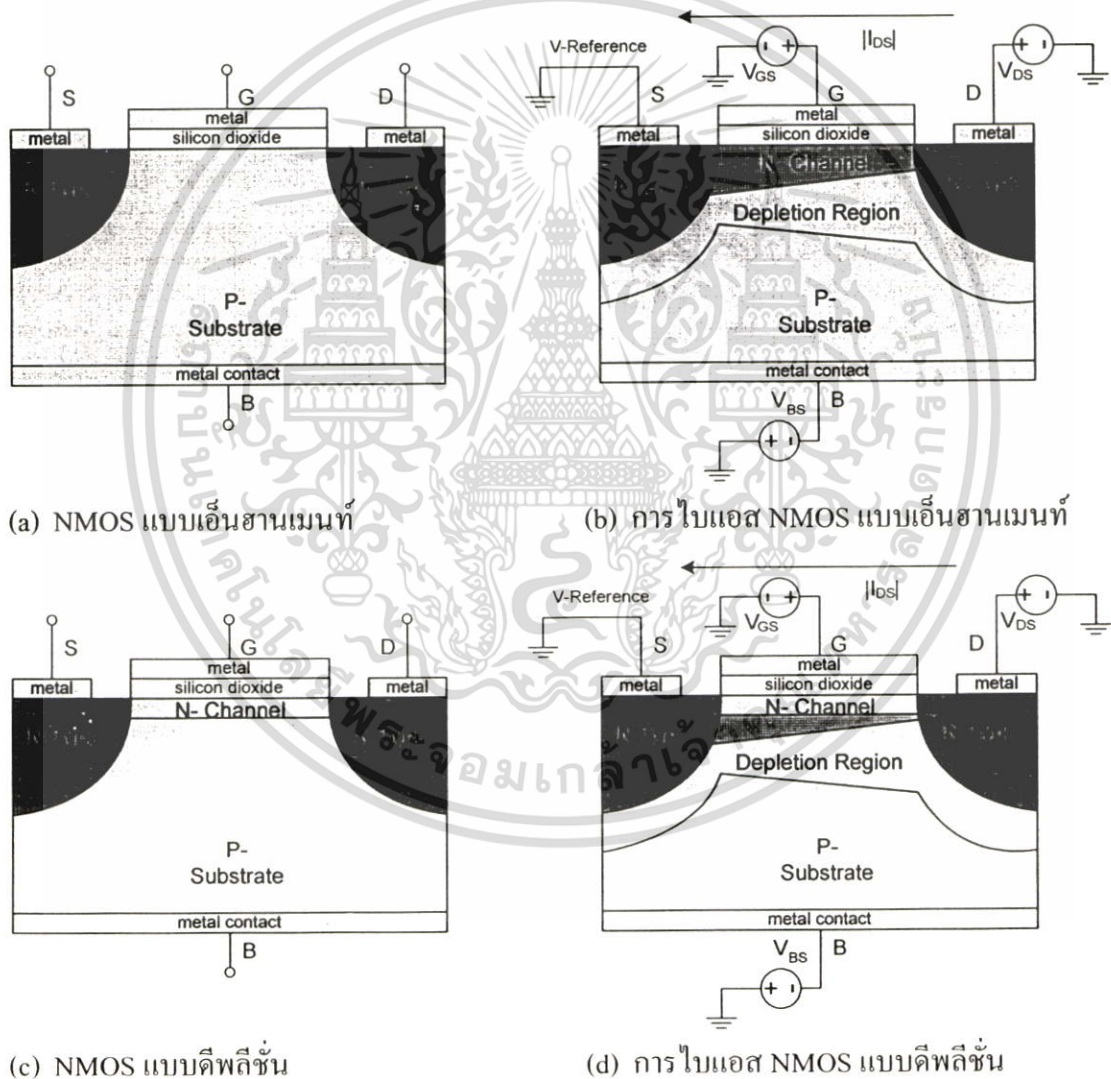
- N-Channel MOSFET :NMOS ซึ่งหมายถึงมอสเฟตที่มีประจุลบหรืออิเล็กตรอน เป็นประจุหลัก ดังนั้นมอสเฟตชนิดนี้ จะมีส่วนเดรนและซอร์สเป็นแบบ สารกึ่งตัวนำชนิด N

- P-Channel MOSFET :PMOS ซึ่งหมายถึงมอสเฟตที่มีประจุบวกหรือโฮล เป็นประจุหลัก ดังนั้นมอสเฟตชนิดนี้ จะมีส่วนเดรนและซอร์สเป็นแบบ สารกึ่งตัวนำชนิด P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามยังแบ่งมอสเฟตตามชนิดของช่องทางเดินกระแสบริเวณฐานรองได้ชั้นเกิดในสภาวะก่อนการไบแอสได้เป็นอีก 2 ชนิด คือ

- สำหรับมอสเฟตแบบเอ็นฮานเมนต์ในสภาวะก่อนการไบแอส กระแสเดรน-ซอร์สจะไหลผ่านบริเวณฐานรองได้ชั้นเกิดไม่ได้เนื่องจาก ฐานรองได้ชั้นเกิดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับส่วนเดรนและส่วนซอร์ส
- ในขณะที่มอสเฟตแบบดีฟิชั่นในสภาวะก่อนการไบแอส กระแสเดรน-ซอร์สจะไหลผ่านบริเวณฐานรองได้ชั้นเกิดได้เนื่องจาก ฐานรองได้ชั้นเกิดมีสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับส่วนเดรนและส่วนซอร์สเป็นชั้นบางๆอยู่ก่อนแล้ว



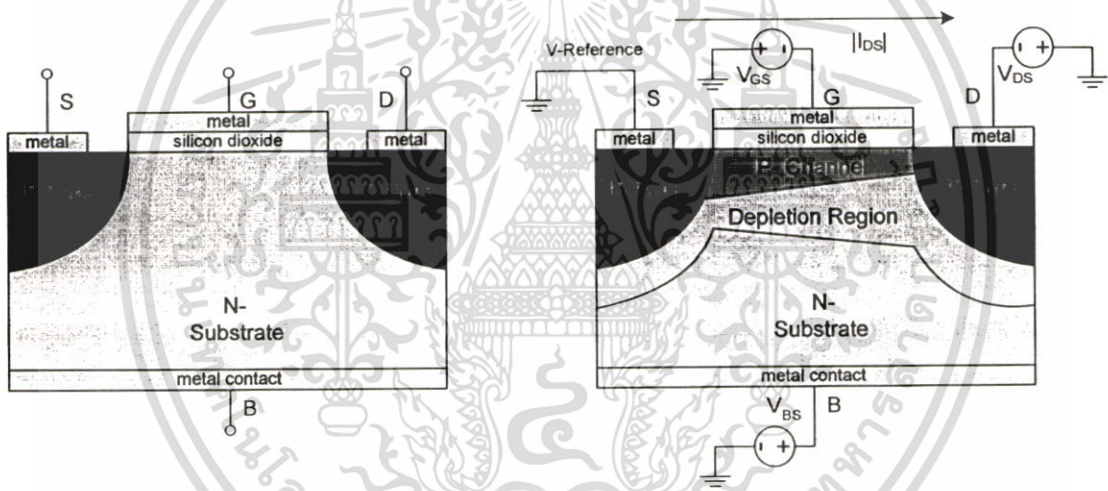
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ N-Channel

ดังนั้นจึงสามารถแบ่งมอสเฟตได้เป็น 4 แบบพร้อมการไบแอส ตามรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3

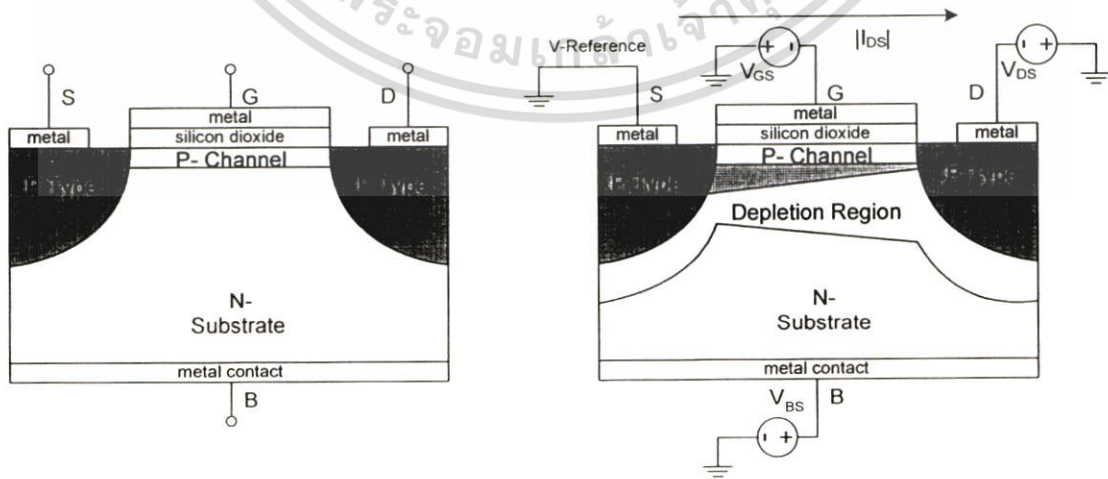
โดยรูปที่ 2.2 (a) แสดง NMOS แบบเอ็นฮานเมนต์ก่อนการไบแอส จะเห็นได้ว่า ยังไม่มีช่องทางเดินเอกสารนเป็นเอกสารที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสวิกฤตระหว่างขาเดรน-ซอร์ส จากนั้นเมื่อไบแอสให้ NMOS แบบเอ็นฮานสมেন্টตามรูปที่ 2.2(b) โดยใช้แรงดันที่ขาซอร์สเป็นแรงดันอ้างอิง , ให้แรงดันที่ขาเกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับขาซอร์ส เพื่อก่อให้เกิดช่องทางเดินกระแสบนฐานรองได้ชัดเจน , ให้แรงดันที่ขาเดรนเป็นบวกเทียบกับขาซอร์ส เพื่อให้กระแสไบแอสไหลจากขาเดรนไปขาซอร์ส ส่วนแรงดันที่ขาบอดี้เท่ากับขาซอร์ส หรือให้เป็นลบเทียบกับขาซอร์สเพื่อกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม และไม่ให้เกิดกระแสรั่วผ่านขาบอดี้

ส่วนรูปที่ 2.2(c) แสดง NMOS แบบดีพลีชันก่อนการไบแอส โดยจะเห็นได้ว่ามีช่องทางเดินกระแสเดรน-ซอร์ส อยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นถ้าต้องการไบแอสให้กระแสเดรน-ซอร์สมีค่าเป็นศูนย์ตามรูปที่ 2.2(d) จึงต้องให้แรงดันที่ขาเกตมีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับขาซอร์สซึ่งเป็นขาแรงดันอ้างอิง , ให้แรงดันที่ขาเดรนเป็นบวกเทียบกับขาซอร์ส เพื่อให้กระแสไบแอสไหลจากขาเดรนไปขาซอร์ส ส่วนแรงดันที่ขาบอดี้เท่ากับขาซอร์ส หรือให้เป็นลบเทียบกับขาซอร์สเพื่อกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม และไม่ให้เกิดกระแสรั่วผ่านขาบอดี้ เช่นเดียวกับแบบเอ็นฮานสมেন্ট



(a) PMOS แบบเอ็นฮานสมেন্ট (b) การไบแอส PMOS แบบเอ็นฮานสมেন্ট



(c) PMOS แบบดีพลีชัน (d) การไบแอส PMOS แบบดีพลีชัน

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ P-Channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 (a) แสดง PMOS แบบเอ็นฮานเมนต์ก่อนการไบแอส จะเห็นได้ว่า ยังไม่มีช่องทางเดินกระแสระหว่างขาเกต-ซอร์ส จากนั้นเมื่อไบแอสให้ PMOS แบบเอ็นฮานเมนต์ตามรูปที่ 2.3(b) โดยใช้แรงดันที่ขาซอร์สเป็นแรงดันอ้างอิง , ให้แรงดันที่ขาเกตเป็นลบเมื่อเทียบกับขาซอร์ส เพื่อก่อให้เกิดช่องทางเดินกระแสบนฐานรองได้ขึ้นเกต , ให้แรงดันที่ขาเกตเป็นลบเทียบกับขาซอร์ส เพื่อให้กระแสไบแอสไหลจากขาซอร์สไปขาเกต ส่วนแรงดันที่ขาบอดีเท่ากับขาซอร์ส หรือให้เป็นบวกเทียบกับขาซอร์สเพื่อกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม และไม่ให้เกิดกระแสรั่วผ่านขาบอดี

ส่วนรูปที่ 2.3(c) แสดง PMOS แบบดีพลีชันก่อนการไบแอส โดยจะเห็นได้ว่ามีช่องทางเดินกระแสเกต-ซอร์ส อยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นถ้าต้องการไบแอสให้กระแสเกต-ซอร์สมีค่าเป็นศูนย์ตามรูปที่ 2.3(d) จึงต้องให้แรงดันที่ขาเกตมีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับขาซอร์สซึ่งเป็นขาแรงดันอ้างอิง , ให้แรงดันที่ขาเกตเป็นลบเทียบกับขาซอร์ส เพื่อให้กระแสไบแอสไหลจากขาซอร์สไปขาเกต ส่วนแรงดันที่ขาบอดีเท่ากับขาซอร์ส หรือให้เป็นบวกเทียบกับขาซอร์สเพื่อกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม และไม่ให้เกิดกระแสรั่วผ่านขาบอดี เช่นเดียวกับแบบเอ็นฮานเมนต์

2.3 สัญลักษณ์ของมอสเฟต

ลักษณะของมอสเฟตทั้ง 4 แบบ ข้างต้นสามารถเขียนสัญลักษณ์แต่ละแบบ เพื่อให้ทราบถึงโครงสร้างภายในได้ตามตารางที่ 2.1 โดยแถวที่ A แสดงขาใช้งานทั้ง 4 ขา (ขาเกต(G), ขาเกต(D), ขาซอร์ส(S) และขาบอดี(B)) ในขณะที่แถวที่ B แสดงขาใช้งานเพียง 3 ขา โดยกำหนดค่าให้ขาซอร์สต่ออยู่กับขาบอดี

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่างๆ

| แถวที่ | N-Channel | | P-Channel | |
|--------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | Enhancement | Depletion | Enhancement | Depletion |
| A | | | | |
| B | | | | |

สัญลักษณ์ 4 ขา แบบเอ็นฮานเมนต์นั้น ตามสัญลักษณ์ขาเกต, ขาเกต และขาซอร์ส จะไม่ต่อกัน แสดงด้วยเส้นประ ในขณะที่แบบดีพลีชันนั้น ตามสัญลักษณ์ ขาเกต, ขาเกต และขาซอร์ส จะเชื่อมถึงกัน แสดงด้วยเส้นตรง ส่วนหัวลูกศรของขาบอดีแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าระหว่างขาบอดีและช่องนำกระแสได้ขึ้นเกต(แบบ N-Channel นั้น ขาบอดีเป็น P-Type ในขณะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องนำกระแสเป็น N-Type ดังนั้นหัวลูกศรจึงชี้จากขาบอดี้ไปยังช่องนำกระแส ส่วนแบบ P-Channel นั้น ขาบอดี้เป็น N-Type ในขณะที่ช่องนำกระแสเป็น P-Type ดังนั้นหัวลูกศรจึงชี้จากช่องนำกระแสไปยังขาบอดี้) และการไหลของกระแสเดรน-ซอร์ส ของ N-Channel จะไหลจากขาเดรนไปขาซอร์ส ในขณะที่ของ P-Channel จะไหลจากขาซอร์สไปยังขาเดรน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำขาบอดี้ของมอสเฟตมาใช้ออกแบบวงจร จึงใช้สัญลักษณ์แบบที่มี 4 ขา(แถวที่ A) มาใช้แสดงรูปวงจรคุณสมบัติของมอสเฟตที่ได้ออกแบบ

2.4 คุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต

2.4.1 คุณสมบัติการทำงานทั่วไปของมอสเฟต

การนำมอสเฟตไปใช้งานนั้น ต้องกำหนดจุดทำงานให้เหมาะสมเสียก่อน เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{gs} และกระแส I_{ds} ของมอสเฟตทั้ง 4 แบบสามารถเขียนได้ตามรูปที่ 2.4(a) และ 2.4(b) โดยรูปที่ 2.4(a) แสดงค่าแรงดันขีดเริ่มและลักษณะการเพิ่มขึ้นของกระแส I_{ds} เมื่อแรงดัน V_{gs} มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับ NMOS จะพบว่าความสัมพันธ์ของ V_{gs} - I_{ds} ของทั้งแบบเอ็นฮานเมนท์และแบบดีฟิซิชั่นมีลักษณะเดียวกัน แต่แรงดันขีดเริ่มของแบบเอ็นฮานเมนท์เป็นบวก เพราะก่อนไบแอสยังไม่มีช่องนำกระแส จึงต้องใช้แรงดันบวกค่าหนึ่งเพื่อสร้างช่องนำกระแส ในขณะที่แบบดีฟิซิชั่นนั้นก่อนการไบแอสมีช่องนำกระแสอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นที่ $V_{gs}=0$ จึงมีกระแสไหลได้ (ถ้ามีแรงดัน V_{ds} ต่ออยู่) และถ้าต้องการให้กระแส I_{ds} หยุดไหลจำเป็นต้องจ่ายแรงดัน V_{gs} ที่มีค่าเป็นลบ(ลักษณะการควบคุมกระแสเหมือนเจเฟต)

ในขณะที่รูปที่ 2.4(b) แสดงลักษณะการเพิ่มขึ้นของกระแส I_{ds} เมื่อแรงดัน $|V_{gs}|$ มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับ PMOS จะพบว่าความสัมพันธ์ของ V_{gs} - I_{ds} ของทั้งแบบเอ็นฮานเมนท์และแบบดีฟิซิชั่นมีลักษณะเดียวกัน แต่แรงดันขีดเริ่มของแบบเอ็นฮานเมนท์เป็นลบ เพราะก่อนไบแอสยังไม่มีช่องนำกระแส จึงต้องใช้แรงดันลบค่าหนึ่งเพื่อสร้างช่องนำกระแส นั้น ในขณะที่แบบดีฟิซิชั่นนั้นก่อนการไบแอสมีช่องนำกระแสอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นที่ $V_{gs}=0$ จึงมีกระแสไหลได้ (ถ้ามีแรงดัน V_{ds} ต่ออยู่) และถ้าต้องการให้กระแส I_{ds} หยุดไหลจำเป็นต้องจ่ายแรงดัน V_{gs} ที่มีค่าเป็นบวก

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{ds} และ V_{ds} ของมอสเฟตแบบ NMOS ตามรูปที่ 2.5 แล้ว สามารถแบ่งช่วงการทำงานของมอสเฟต ออกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ

- ช่วงที่ 1 ช่วงหยุดนำกระแส(Cutoff Region)

เป็นช่วงที่ ($V_{gs} < V_{th}$) ซึ่งในช่วงนี้มอสเฟตจะยังไม่ทำงาน ทำให้กระแสเดรนมีค่าเป็นศูนย์

$$I_{d} = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad V_{gs} < V_{th} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงที่ 2 ช่วงการทำงานแบบเชิงเส้น (Linear Region และ Triode Region)
เป็นช่วงที่ ($V_{gs} > V_{th}$) ซึ่งในช่วงนี้มอสเฟตจะเริ่มทำงานแล้ว ทำให้มีกระแสครนเท่ากับ

$$I_d = \frac{\mu C_{ox} W}{2L} \left[2(V_{gs} - V_{th}) - V_{ds} \right] V_{ds} (1 + \lambda V_{ds}) \quad (2.2)$$

เมื่อ $V_{gs} > V_{th}$ และ $0 < V_{ds} < (V_{gs} - V_{th})$

- ช่วงที่ 3 ช่วงการทำงานแบบอิ่มตัว (Saturation Region)
เป็นช่วงที่ ($V_{gs} > V_{th}$) ซึ่งในช่วงนี้มอสเฟตจะทำงานจนอิ่มตัว ทำให้มีกระแสครนเท่ากับ

$$I_d = \frac{\mu C_{ox} W}{2L} (V_{gs} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{ds}) \quad (2.3)$$

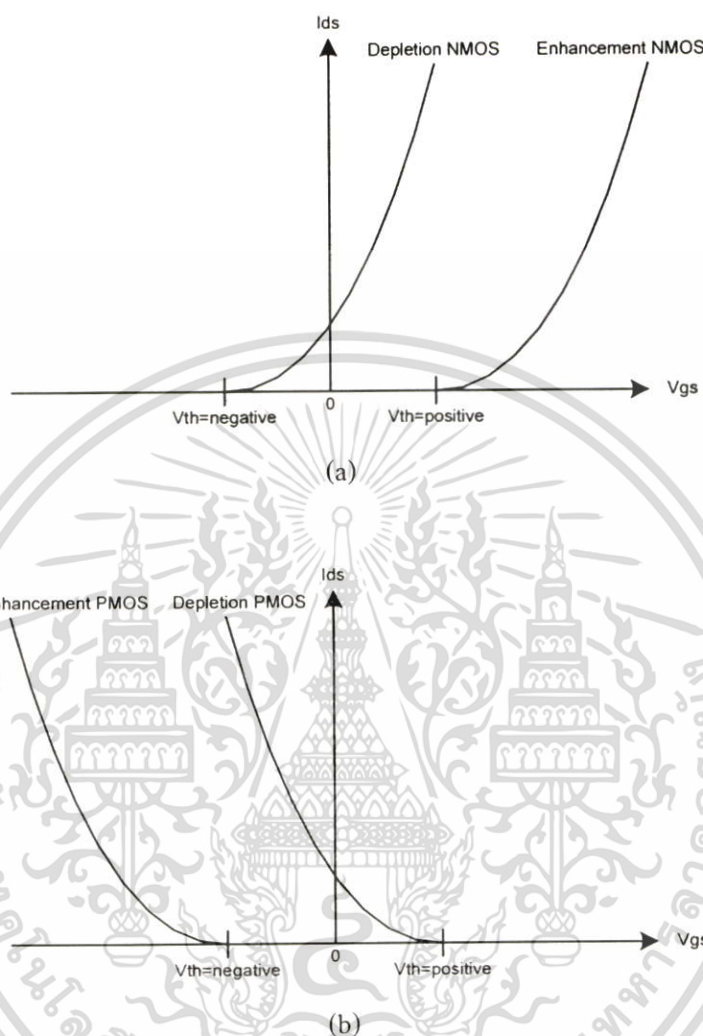
เมื่อ $V_{gs} > V_{th}$ และ $0 < (V_{gs} - V_{th}) < V_{ds}$

| | | |
|-------|-----------|--|
| เมื่อ | I_d | : กระแสครน (Drain Current) |
| | V_{gs} | : แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์ส (Gate-Source Voltage) |
| | V_{ds} | : แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส (Drain-Source Voltage) |
| | μ_n | : ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน ใช้สำหรับ NMOS (Electron Mobility) |
| | μ_p | : ค่าความคล่องตัวของโฮล ใช้สำหรับ PMOS (Hole Mobility) |
| | C_{ox} | : ค่าความจุต่อหน่วยพื้นที่ของชั้นเกตและฐานรองใต้ชั้นเกต (Oxide Capacitance per Area) |
| | W | : ค่าความกว้างของช่องนำกระแสใต้ชั้นเกต (Channel Width) |
| | L | : ค่าความยาวของช่องนำกระแสใต้ชั้นเกต (Channel Length) |
| | V_{th} | : ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) |
| | λ | : ค่ามอดูเลชันความยาวช่องนำกระแส (Channel Length Modulation Parameter) |

จากรูปที่ 2.5 กราฟที่มีความชันไม่เท่ากับศูนย์ ในช่วงอิ่มตัวนี้ เกิดจากปรากฏการณ์มอดูเลชันความยาวของช่องทางเดินกระแส แทนได้ด้วยพารามิเตอร์แลมบ์ดา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดันเดรน-ซอร์ส โดยถ้าผลของปรากฏการณ์มอดูเลชันความยาวช่องนำกระแส จะพบว่าในช่วงอิ่มตัว ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสครน และแรงดันเกต-ซอร์ส มีลักษณะที่เป็นยกกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอง ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถนำไปใช้สร้างวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกต่างๆ เช่น วงจรทวีความถี่, วงจรคูณสัญญาณ เป็นต้น

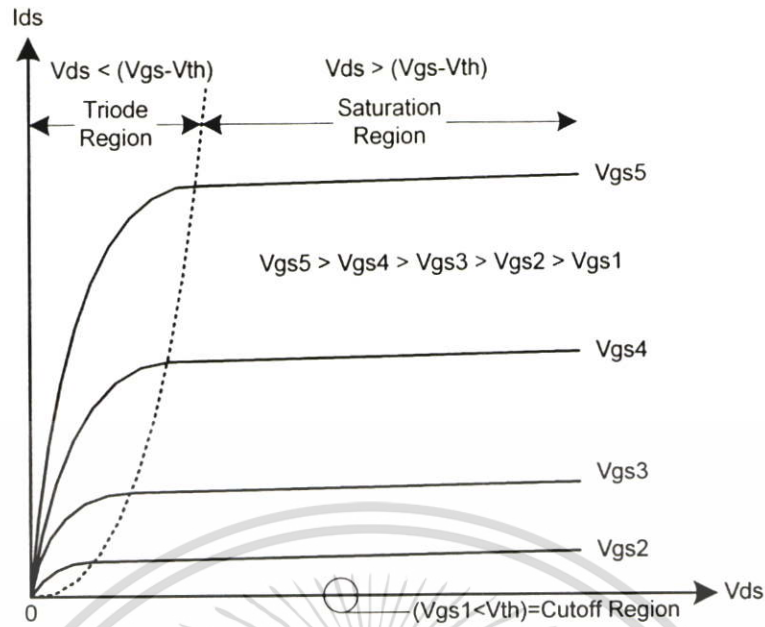


รูปที่ 2.4 คุณสมบัติ V_{gs} - I_{ds} ของมอสเฟตทั้ง 4 แบบ

2.4.2 คุณสมบัติการทำงานขาบอดี้ของมอสเฟต

ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างจากมอสเฟตชนิด NMOS แบบเอ็นฮานเมนท์ โดยถ้ากำหนดจุดทำงานของมอสเฟตให้อยู่ในช่วงอิ่มตัว โดยให้แรงดันเกต-ซอร์ส และแรงดันเดรน-ซอร์ส มีค่าคงที่ไว้ จากนั้นทำการปรับค่าแรงดันบอดี้-ซอร์ส จะทำให้บริเวณปลอดพาหะ(Depletion Region) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามแรงดันบอดี้-ซอร์ส ไปควบคุมขนาดของช่องทางเดินกระแสได้ ซึ่งเปรียบเสมือนการทำงานในแบบดีฟลิชัน ของเจฟต์นั่นเอง โดยแรงดันบอดี้-ซอร์ส ที่ป้อนเข้ามานั้นต้องเป็นแรงดันขนาดเล็ก เพราะถ้าแรงดันนี้มีขนาดมากเกินไปอาจทำให้เกิดการนำกระแสระหว่างขาบอดี้และช่องนำกระแสได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของมอสเฟต ในแต่ละช่วงการทำงาน เมื่อขาบอดี้ต่อกับขาซอร์ส

ค่าแรงดันบอดี้-ซอร์ส (V_{bs}) นี้ จะเป็นส่วนหนึ่งของค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{th}) ดังสมการที่ 2.4

$$V_{th} = V_{TO} + \gamma \left[\sqrt{2|\phi_F| - V_{bs}} - \sqrt{2|\phi_F|} \right] \quad (2.4)$$

- เมื่อ
- V_{th} : ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage)
 - V_{bs} : แรงดันระหว่างขาบอดี้และขาซอร์ส (Gate-Source Voltage)
 - V_{TO} : ค่าแรงดันขีดเริ่ม ในขณะที่ V_{bs} เท่ากับ 0
 - γ : บอดี้ เทรสโวล พารามิเตอร์ (Bulk Threshold Parameter) เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต
 - ϕ_F : ค่าความต่างศักย์ ที่พื้นผิวบริเวณสตรองอินเวอร์ชัน (Strong Inversion Surface Potential) เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของการโดปสาร

ดังนั้นการทำงานของมอสเฟตในช่วงอิ่มตัว โดยถ้าผลของปรากฏการณ์มอดูเลชันความยาวช่องนำกระแส ตามสมการที่ 2.3 และนำค่าแรงดันบอดี้-ซอร์ส ที่แฝงอยู่ในค่าแรงดันขีดเริ่ม ตามสมการที่ 2.4 มาคิดรวมกันจะได้ว่า

$$I_d = \frac{\mu C_{ox} W}{2L} \left(V_{gs} - \left(V_{TO} + \gamma \left[\sqrt{2|\phi_F| - V_{bs}} - \sqrt{2|\phi_F|} \right] \right) \right)^2 \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการที่ 2.5 นี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบวงจรคุณสมบัติสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอด แครนท์ ทั้งสองวงจรในวิทยานิพนธ์นี้ ในสองบทต่อไป

2.5 แบบจำลองของมอสเฟต

แบบจำลองของมอสเฟตที่ใช้ถูกแบ่งออกเป็นหลายระดับ(Level) โดยระดับที่ 1 เป็นระดับ การจำลองที่พื้นฐานที่สุด และไม่รวมผลของปรากฏการณ์มอดูเลตความยาวแขนแนลไว้ แต่ก็ยังสามารถใช้ได้ดีสำหรับทดสอบแบบจำลองในอุดมคติ ในขณะที่แบบจำลองระดับที่ 2 จะมีความถูกต้องยิ่งขึ้น สำหรับแบบจำลองในระดับที่สูงๆขึ้นไปนั้น มิได้หมายความว่าแบบจำลองที่สูงกว่าจะดี หรือละเอียดถูกต้องกว่าแบบจำลองที่ระดับน้อยกว่า เพราะขึ้นอยู่กับเจ้าของแบบจำลองในระดับ นั้นๆจะคิดแบบจำลองออกมาในแบบไหน

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในแบบจำลองของมอสเฟตประกอบด้วย

W = ค่าความกว้างของช่องนำกระแส

L = ค่าความยาวของช่องนำกระแส

V_{to} = ค่าแรงดันขีดเริ่ม ในขณะที่แรงดันบอดี้-ซอร์ส เท่ากับ 0

Γ = ค่า γ ตามสมการที่ 2.4

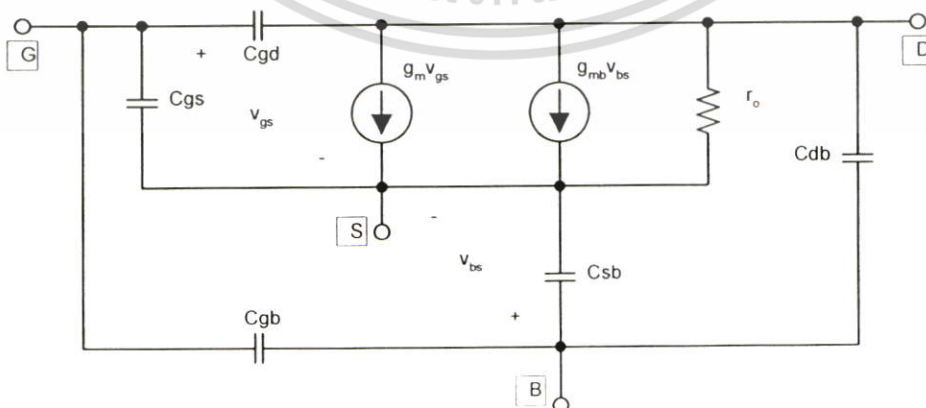
Φ_s = ค่า ϕ_s ตามสมการที่ 2.4

K_p = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ μC_{ox}

λ = ค่าส่วนกลับของแรงดันเอตตี้ แสดงความสัมพันธ์ของ V_{ds} ต่อ d

2.6 วงจรสมมูลย์ และสมการแสดงความสัมพันธ์ สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก

สามารถเขียนวงจรสมมูลย์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กของมอสเฟตได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลย์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กโดยรวมขาคือของมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อนุญญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กของมอสเฟต มีค่าดังต่อไปนี้

- C_{gs} คือค่าความจุไฟฟ้ารวม ระหว่างขาเกต-ขาซอร์ส ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดย

$$C_{gs} = \left(\frac{2}{3}\right) C_{ox} \left[\frac{(1+2\alpha)}{(1+\alpha)^2} \right] \quad (2.6)$$

โดย $\alpha = 1 - \left(\frac{V_{DS}}{V_{GS} - V_{th}} \right)$ เมื่อ $V_{DS} \leq (V_{GS} - V_{th})$

และ $\alpha = 0$ เมื่อ $V_{DS} > (V_{GS} - V_{th})$

- C_{gd} คือค่าความจุไฟฟ้ารวม ระหว่างขาเกต-ขาเดรน ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดย

$$C_{gd} = \left(\frac{2}{3}\right) C_{ox} \left[\frac{(\alpha^2 + 2\alpha)}{(1+\alpha)^2} \right] \quad (2.7)$$

- C_{sb} คือค่าความจุไฟฟ้ารวม ระหว่างขาซอร์ส-ขาบอดี ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดย

$$C_{sb} = C_{gs} \delta_1 \quad \text{เมื่อ} \quad \delta_1 = \left(\frac{\gamma}{2\sqrt{2|\phi_f| + V_{SB}}} \right) \quad (2.8)$$

- C_{db} คือค่าความจุไฟฟ้ารวม ระหว่างขาเดรน-ขาบอดี ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดย

$$C_{db} = C_{gs} \delta_1 \quad \text{เมื่อ} \quad \delta_1 = \left(\frac{\gamma}{2\sqrt{2|\phi_f| + V_{SB}}} \right) \quad (2.9)$$

- C_{gb} คือค่าความจุไฟฟ้ารวม ระหว่างขาเกต-ขาบอดี ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดย

$$C_{gb} = \left[\frac{\delta_1}{3(1+\delta_1)} \right] C_{ox} \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^2 \quad \text{เมื่อ} \quad \delta_1 = \left(\frac{\gamma}{2\sqrt{2|\phi_f| + V_{SB}}} \right) \quad (2.10)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์ (Transconductance: g_m) มีดังนี้

$$g_m = \left(\mu C_{ox} \frac{W}{L} \right) V_{DS} \quad \text{เมื่อ} \quad V_{DS} \leq (V_{GS} - V_{th})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_m = \left(\mu C_{ox} \frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th}) \quad \text{เมื่อ} \quad V_{DS} > (V_{GS} - V_{th}) \quad (2.11)$$

$$g_{mb} = g_m \delta_1 \quad \text{เมื่อ} \quad \delta_1 = \left(\frac{\gamma}{2\sqrt{2|\phi_F| + V_{SB}}} \right) \quad (2.12)$$

2.7 บทสรุป

จากทฤษฎีการทำงานของมอสเฟตที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้ทราบถึงโครงสร้างและรายละเอียดต่างๆ ในการนำมอสเฟตไปใช้งาน ซึ่งมอสเฟตจะทำงานได้โดยการใช้แรงดันขาคัดเทียบขาซอร์ส ไปควบคุมปริมาณกระแสที่ไหลระหว่างขาคอนและขาซอร์ส และสามารถแบ่งช่วงการทำงานของมอสเฟตได้เป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงหยุดนำกระแส (Cutoff Region), ช่วงการทำงานแบบเชิงเส้น (Linear Region หรือ Triode Region) และช่วงการทำงานแบบอิ่มตัว (Saturation Region) โดยได้แสดงความสัมพันธ์ของกระแส I_{ds} และแรงดัน V_{gs}, V_{ds}, V_{bs} ในช่วงการทำงานแบบเชิงเส้น และช่วงการทำงานแบบอิ่มตัว ซึ่งใช้สมการอธิบายที่ต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้งานมอสเฟตจำเป็นต้องกำหนดช่วงการใช้งานที่ถูกต้องก่อนเสมอ

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้งานขาบอดีของมอสเฟต

ในการออกแบบวงจรคุณลักษณะแวนะลอก 4 ควอดแดรนต์

มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง

3.1 บทนำ

วงจรแวนะลอกที่ใช้มอสเฟตโดยทั่วไปจะใช้งานขาเกตเป็นอินพุตหลัก หากแต่มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ 4 ขา ซึ่งปกติจะต่อขาบอดีเข้ากับขาซอร์ส ทำให้เหลือขาใช้งานเพียง 3 ขา บทที่ 3 นี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้งานขาบอดีของมอสเฟตในลักษณะอินพุต โดยนำมาใช้สร้างวงจรถักกำลังสอง และวงจรคุณลักษณะแวนะลอก 4 ควอดแดรนต์ ที่มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง และสามารถใช้งานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำได้

3.2 หลักการเบื้องต้น

สมการกระแสของมอสเฟตในโหมดกระแสอิ่มตัว ไม่คิดผลของแอมป์ค่าจะได้ว่า

$$I_d = K(V_{gs} - V_{th})^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ

$$K = \left(\frac{\mu C_{ox} W}{2L} \right)$$

V_{th} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม

V_{gs} คือค่าแรงดันเกตเทียบกับซอร์ส

μ คือค่าความคล่องของประจุภายในแชนแนล

C_{ox} คือค่าความประจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ บริเวณแชนแนล

W คือความกว้างของแชนแนล

L คือความยาวของแชนแนล

สมมุติว่าแรงดัน V_{gs} ประกอบด้วย แรงดันไฟตรง V_{GS} และแรงดันไฟสลับสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก v_{gs}

$$V_{gs} = V_{GS} + v_{gs} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันขีดเริ่ม V_{th} เขียนในเทอมของแรงดัน v_{bs} ได้ว่า

$$V_{th} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \quad (3.3)$$

- เมื่อ V_{TO} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่ไม่รวมผลของปรากฏการณ์บอดี้
 γ คือค่าปัจจัยของบอดี้ หรือพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้าง
 ϕ_F คือบอดี้โพเทนเชียล ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการโคปสารในบอดี้
 v_{bs} คือค่าแรงดันขาบอดี้เทียบกับขาซอร์ส

แทนสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

$$I_d = K \left(V_{GS} + v_{gs} - V_{TO} - \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \right)^2 \quad (3.4)$$

ถ้ากำหนดให้ $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ แล้ว ใช้อนุกรมเทย์เลอร์กระจายเทอม $\gamma \sqrt{2\phi_F \pm v_{bs}}$ จะได้ว่า [1]

$$\gamma \left(\sqrt{2\phi_F \pm v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \cong \left(\pm \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F}} v_{bs} - \frac{\gamma}{16\sqrt{2\phi_F^3}} v_{bs}^2 \right) \quad (3.5)$$

แทนสมการที่ (3.5) ลงในสมการที่ (3.4) จากนั้นประมาณเทอม v_{bs}^2 ทิ้ง แล้วจัดรูปใหม่

$$\frac{I_d}{K} \cong \left(v_{gs} + (V_{GS} - V_{TO}) \mp \frac{\gamma v_{bs}}{2\sqrt{2\phi_F}} \right)^2 \quad (3.6)$$

สมการที่ (3.6) จะปรากฏเทอมของ v_{bs} ในสมการกระแสเดรน

3.3 การทำงานของวงจรถูกสัญญาณแอนะล็อก 4 กวอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง

วงจรถูกสัญญาณแอนะล็อกมีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ออกแบบ จะอาศัยการยกกำลังสองสัญญาณผลรวม และสัญญาณผลต่าง จากนั้นนำมารวมกันเป็นสัญญาณการคูณ ดังนั้นจึงได้ออกแบบวงจรถูกกำลังสองสัญญาณที่มีอินพุตเข้ามาที่ขาบอดี้ จากนั้นนำวงจรถูกกำลังสองนั้นไปใช้สร้างวงจรถูกอีกที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 หลัการออกแบบวงจรยกกำลังสอง

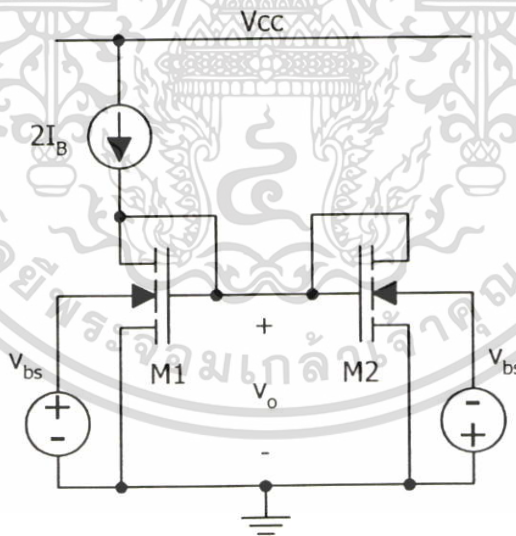
จากสมการที่ (3.6) สมมติว่ามอสเฟต M1 และ M2 จากรูปที่ 3.1 มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ถ้าป้อนอินพุต +v_{bs} ให้มอสเฟตตัวซ้าย และ -v_{bs} ให้มอสเฟตตัวขวา จะได้สมการกระแส

$$\frac{I_{d1}}{K} \cong \left(v_{gs1} + (V_{GS} - V_{TO}) - \frac{\gamma v_{bs}}{2\sqrt{2\phi_F}} \right)^2 \tag{3.7}$$

$$\frac{I_{d2}}{K} \cong \left(v_{gs2} + (V_{GS} - V_{TO}) + \frac{\gamma v_{bs}}{2\sqrt{2\phi_F}} \right)^2 \tag{3.8}$$

จากสมการที่ (3.7) และสมการที่ (3.8) ถ้าบังคับให้ (I_{d1} + I_{d2}) = 2I_B, (v_{gs} = v_{gs1} = v_{gs2}) และ (V_{GS} - V_{TO}) = ค่าคงที่, นำสมการที่ (3.7) + (3.8) แล้วจัดรูป จะได้ว่า

$$\sqrt{\frac{I_B}{K} - \left(\frac{\gamma^2}{8\phi_F}\right) v_{bs}^2} \cong v_{gs} + (V_{GS} - V_{TO}) \tag{3.9}$$



รูปที่ 3.1 วงจรยกกำลังสองที่มีสัญญาณเข้าที่ขาบอดี

และถ้ากำหนดให้ $\left(\frac{2\sqrt{2\phi_F}}{\gamma} \sqrt{\frac{I_B}{K}}\right) \gg v_{bs}$, แล้ว สามารถประมาณสมการที่ (3.9) ได้ว่า

$$\left(\sqrt{\frac{I_B}{K}}\right) - \left(\frac{\gamma^2}{16\phi_f} \sqrt{\frac{K}{I_B}}\right) v_{bs}^2 \cong v_{gs} + (V_{GS} - V_{TO}) \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.10) พบว่าเทอมไฟตรงจะมีค่าเป็น

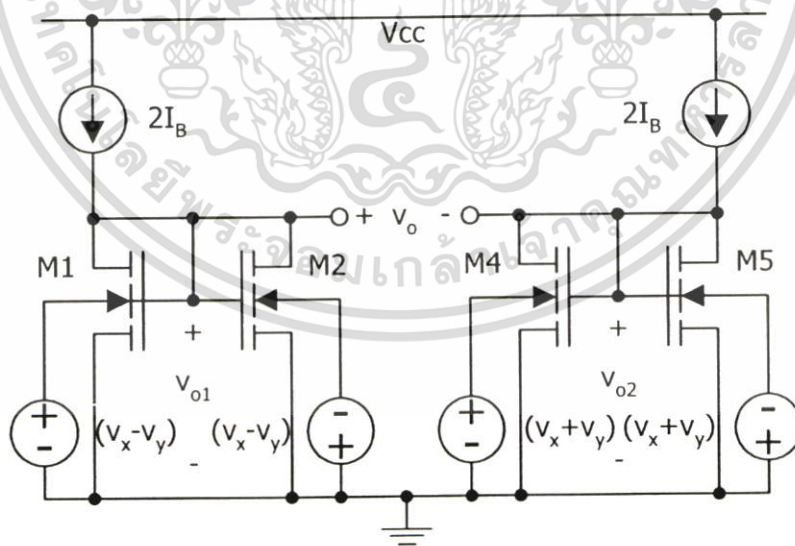
$$V_{GS} = \left(V_{TO} + \sqrt{\frac{I_B}{K}} \right) \quad (3.11)$$

และเทอมของสัญญาณขนาดเล็กมีค่าเท่ากับ

$$v_{gs} \cong - \left(\frac{\gamma^2}{16\phi_f} \sqrt{\frac{K}{I_B}} \right) v_{bs}^2 \quad (3.12)$$

โดยสมการที่ (3.12) แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง v_{gs} และ v_{bs}^2 ที่มีอัตราขยายเป็นลบ โดยมี แรงดันไฟตรงตามสมการที่ (3.11) รวมอยู่

3.3.2 หลักการออกแบบวงจรคุณสัญญาณ



รูปที่ 3.2 วงจรคุณสัญญาณแอนะล็อก 4 ทรานซิสเตอร์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง

จากคุณสมบัติของวงจรถูกกำลังสองข้างต้น [2][3] สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{gs} = (V_{GS} + v_{gs}) = (V_{GS} - nv_{bs}^2) \quad (3.13)$$

เมื่อ $V_{GS} = \left(V_{TO} + \sqrt{\frac{I_B}{K}} \right)$ และ $n = \left(\frac{\gamma^2}{16\phi_F} \sqrt{\frac{K}{I_B}} \right)$

โดยถ้าป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ V_{bs} เป็นสัญญาณผลต่าง ($v_x - v_y$) และสัญญาณผลรวม ($v_x + v_y$) ตามรูปที่ 3.2 จะได้ว่า

$$V_{gs1} = \left[V_{GS} - n (v_x - v_y)^2 \right] = \left[V_{GS} - n (v_x^2 - 2v_x v_y + v_y^2) \right] \quad (3.14)$$

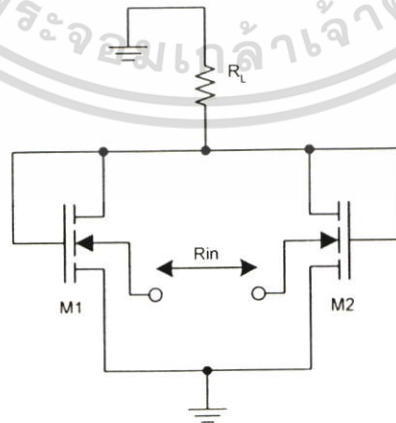
$$V_{gs2} = \left[V_{GS} - n (v_x + v_y)^2 \right] = \left[V_{GS} - n (v_x^2 + 2v_x v_y + v_y^2) \right] \quad (3.15)$$

จากนั้นวัดสัญญาณเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง สมการที่ (3.14) - (3.15) จะได้ว่า

$$V_o = (V_{gs1} - V_{gs2}) = (4n)v_x v_y \quad (3.16)$$

ดังนั้นวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก แบบแรกนี้ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง

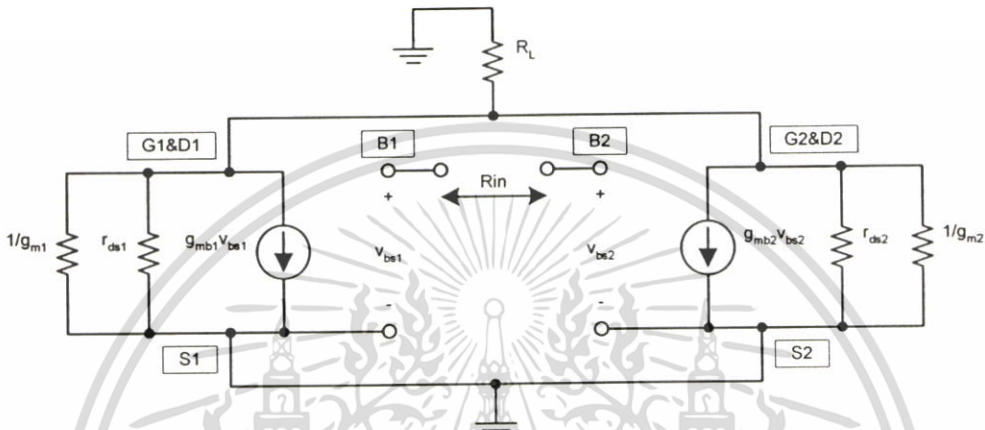
3.3.3 ความต้านทานอินพุต



รูปที่ 3.3 วงจรยกกำลังสองที่ใช้วิเคราะห์หาความต้านทานขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หาความต้านทานอินพุต ของวงจรถูกสัญญาณแวนะลอก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ห้วงจร เพียงครึ่งซีกซ้ายของวงจรถูกสัญญาณตามรูปที่ 3.2 หรือก็คือวงจรถูกกำลังสองซีกซ้าย โดยคิดความต้านทานอินพุตสำหรับสัญญาณขนาดเล็กตามรูปที่ 3.3 แรงดันเกต-ซอร์ส จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากขาเกต และขาซอร์สต่อเข้าหากัน ความต้านทานอินพุตจะมองในลักษณะคิฟเฟอเรนเชียล



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของวงจรถูกกำลังสองที่ใช้หาความต้านทานขาเข้า

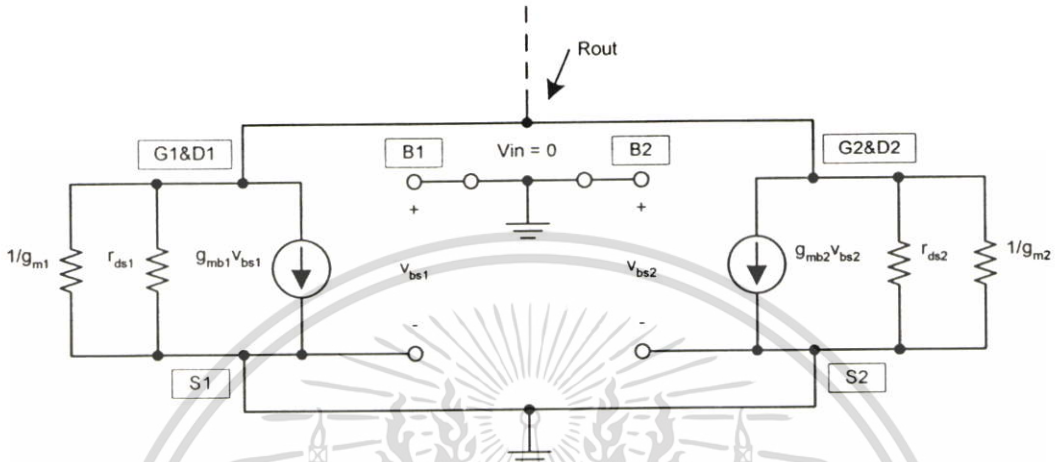
สามารถเขียนวงจรสมมูลของการวิเคราะห์หาความต้านทานขาเข้า ได้ตามรูปที่ 3.4 จะพบว่า ถ้าแรงดัน v_{bs} มีขนาดเล็ก ไม่พอที่จะทำให้เกิดการไบแอสตรงระหว่างขาบอดีและช่องนำกระแสได้ จะพบว่าความต้านทานอินพุตสำหรับวงจรถูกกำลังสองนี้ สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก มีค่าสูงมาก เสมือนเป็นวงจรเปิด (Open circuit)

ตามรูปที่ 3.4 เนื่องจาก $V_g = V_d$ ดังนั้นแหล่งจ่ายกระแส $g_m v_{gs}$ จะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ v_{gs} ดังนั้นแหล่งจ่ายกระแส $g_m v_{gs}$ อาจมองเสมือนเป็นความต้านทานขนาด $(1/g_m)$ ต่ออยู่ระหว่างขาเกตและขาซอร์ส

3.3.4 ความต้านทานเอาต์พุต

การวิเคราะห์หาค่าความต้านทานเอาต์พุต สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ของวงจรถูกสัญญาณแวนะลอกมีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่างนี้ หาได้จากความต้านทานเอาต์พุตของวงจรถูกกำลังสองเมื่อกำหนดให้แรงดันอินพุตของวงจร $v_{in} = v_{bs} = 0$ และสมมติให้ $g_m = g_{m1} = g_{m2}$, $r_{ds} = r_{ds1} = r_{ds2}$ จากนั้นวิเคราะห์เพียงแค่ครึ่งซีกซ้ายของรูปที่ 3.2 จะสามารถเขียนวงจรสมมูลได้

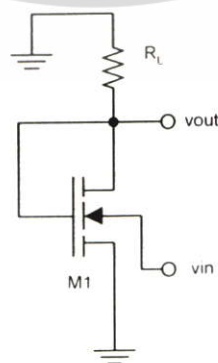
ตามรูปที่ 3.5 ดังนั้น $R_{out} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{1}{g_m} \right) // r_{ds} \right)$ (วงจรครึ่งซีกซ้าย) และเมื่อคิดรวมของวงจรทั้งสองซีก(ทั้งวงจรครึ่งซีกซ้ายและขวา) จะได้ว่า $R_{out} = \left(\left(\frac{1}{g_m} \right) // r_{ds} \right)$



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของวงจรยกกำลังสองที่ใช้หาความต้านทานขาออก

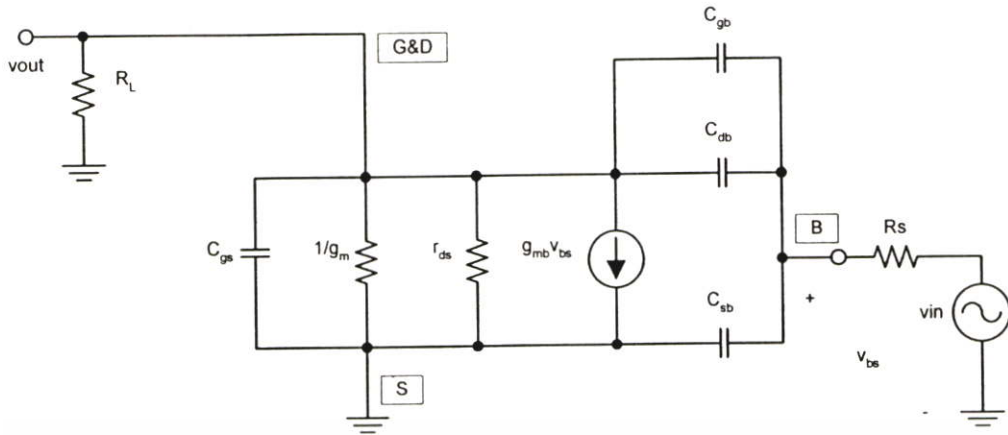
3.3.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่

เนื่องจากความสมมาตรของวงจร ดังนั้นจะแบ่งวงจรออกเป็น 4 ส่วนที่สมมาตรกันตามรูปที่ 3.6(a) สำหรับวิเคราะห์หาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรยกกำลังสอง จากนั้นแทนวงจรสมมูลที่ความถี่สูงของมอสเฟต ตามรูปที่ 2.6 ลงในรูปที่ 3.6(a) จะได้วงจรสมมูลสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรยกกำลังสองที่ความถี่สูงตามรูปที่ 3.6(b) เนื่องจาก $V_G = V_D$ ดังนั้นแหล่งจ่ายกระแส $g_m v_{gs}$ แทนได้ด้วยความต้านทานขนาด $(1/g_m)$ และ $C_{gd} = 0$ และ $R_X = (R_L // r_{ds} // (1/g_m))$



(a)

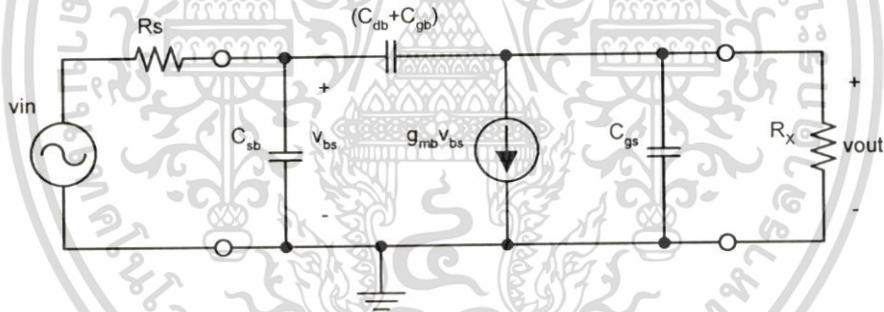
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 3.6 (a) เมื่อพิจารณาเพียงครึ่งด้านของซีกซ้าย
(b) วงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่สูง

จัดวงจรสมมูลรูปที่ 3.6(b) เสียใหม่จะได้ วงจรสมมูลตามรูปที่ 3.7



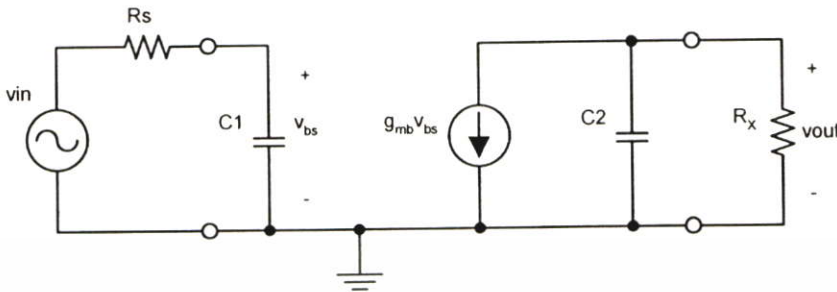
รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลอย่างง่ายจากการประมาณค่าแล้ว

จากนั้นใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์แยก $(C_{db} + C_{gb})$ ออกเป็นเทอม $(1 + g_{mb} R_X)(C_{db} + C_{gb})$ ทางด้านซ้าย และเป็นเทอม $\left(1 + \frac{1}{g_{mb} R_X}\right)(C_{db} + C_{gb})$ ทางด้านขวา จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายตามรูปที่ 3.8

เมื่อ
$$C_1 \cong [C_{sb} + (1 + g_{mb} R_X)(C_{db} + C_{gb})] \tag{3.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ
$$C_2 \cong \left[C_{gs} + \left(1 + \frac{1}{g_{mb} R_X} \right) (C_{db} + C_{gb}) \right] \quad (3.18)$$



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลอย่างง่ายเมื่อใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์

จากทฤษฎีค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจร (Open-circuit time constant) [4] ตามสมการที่ 3.19

$$f_c \cong \frac{1}{2\pi \left[\sum_i C_i R_{io} \right]} \quad (3.19)$$

สามารถประมาณหาค่าความถี่คัตออฟของวงจรคูณสัญญาณจากรูปที่ 3.8 ได้ว่า

$$f_c \cong \left(\frac{1}{2\pi [C_1 R_s + C_2 R_X]} \right) \quad (3.20)$$

3.3.6 ช่วงการปฏิบัติงาน

การวิเคราะห์หาช่วงการทำงานของวงจรคูณสัญญาณแบบที่สอง จะพิจารณาจากช่วงการทำงานของวงจรกำลังสอง โดยจากค่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{th} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right)$ เนื่องจาก $V_m = v_{bs}$ ดังนั้นเงื่อนไขของ V_m ในซีกบวก จะมีค่าเท่ากับ $V_m \leq 2\phi_F$ หรือ

$$V_m (\text{max}) = 2\phi_F \quad (3.21)$$

สำหรับการวิเคราะห์หาค่า V_m ในซีกลบ หรือ $V_m (\text{min})$ นั้น พิจารณาจากค่า $V_m (\text{min})$ ที่ส่งผลให้แรงดันขีดเริ่ม V_{th} มีค่ามากพอทำให้กระแสเดรน $I_d = 0$ นั่นคือ $(V_{GS} - V_{th}) = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

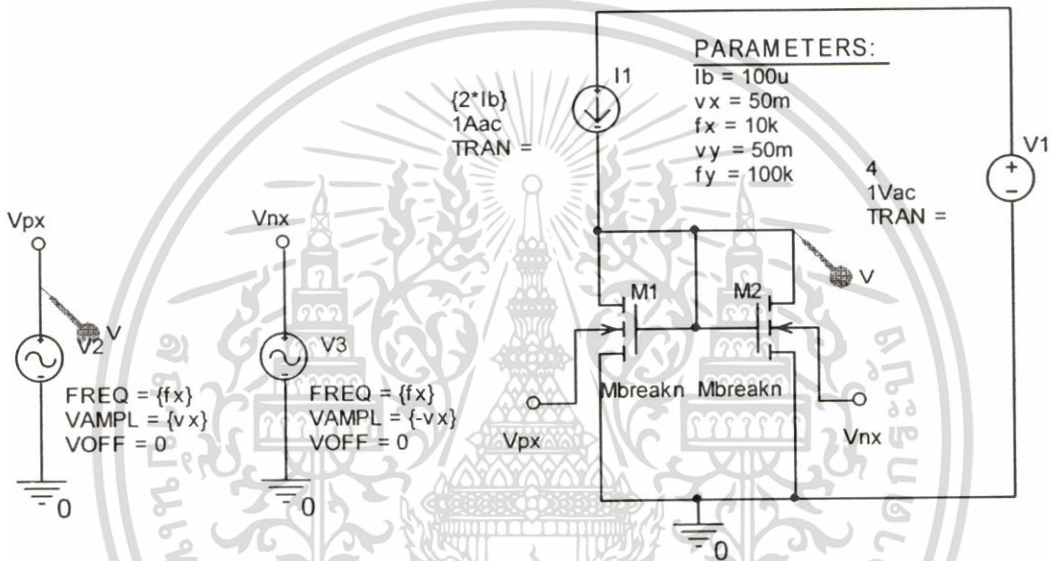
$$(V_{GS} - V_{th}) = 0 = \left[V_{GS} - V_{TO} - \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - V_m(\min)} - \sqrt{2\phi_F} \right) \right] \quad (3.22)$$

ดังนั้น

$$V_m(\min) = 2\phi_F - \left[\left(\frac{V_{GS} - V_{TO}}{\gamma} \right) + \sqrt{2\phi_F} \right]^2 \quad (3.23)$$

3.4 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

3.4.1 วงจรยกกำลังสอง

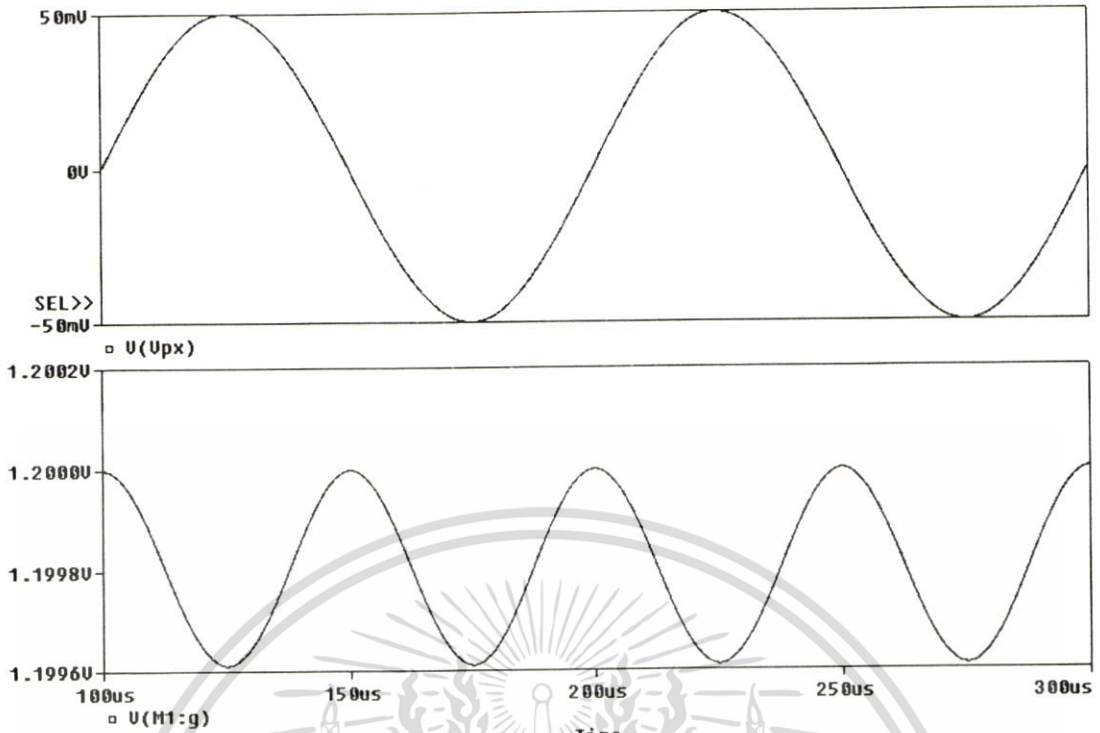


รูปที่ 3.9 วงจรยกกำลังสองที่ใช้จำลองการทำงาน

มอดเฟตที่ใช้จำลองการทำงานตามรูปที่ 3.9 มีพารามิเตอร์ดังนี้

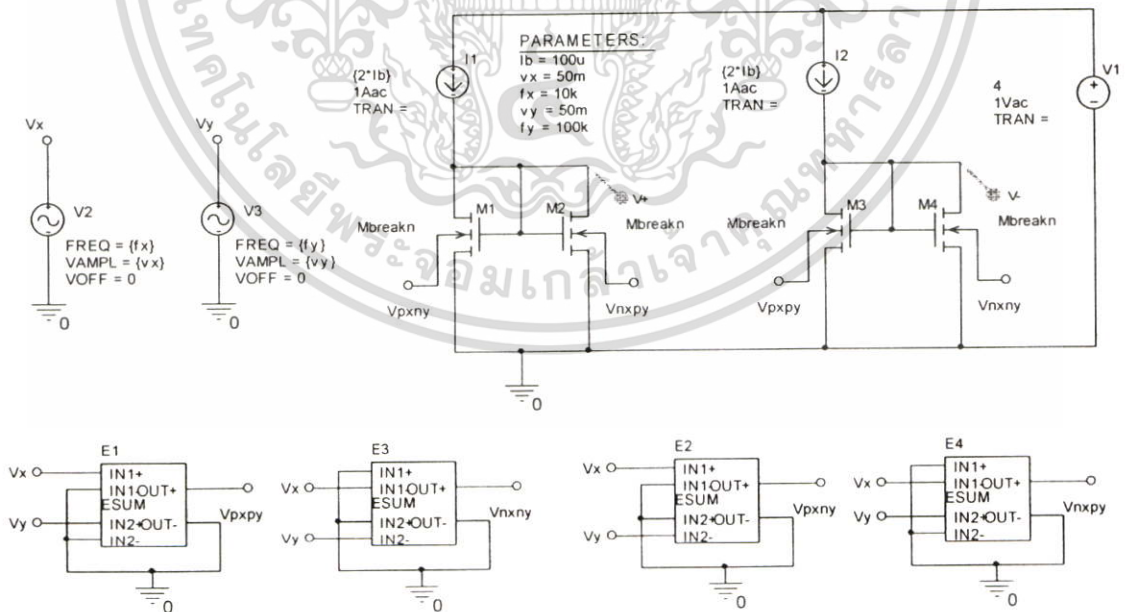
M1,M2 มีค่า $W=100\mu$, $L=1\mu$, $V_{to}=1$, $\Gamma=0.35$, $\Phi=0.65$, $K_p=50\mu$, $CGSO=10n$, $CGDO=10n$, $CGBO=10n$, $CBD=1p$, $CBS=1p$, $CJSW=1p$, $MJ=0.5$, $MJSW=0.3$, $FC=0.5$, $PB=0.1$

ใช้เป็นแกนหลักของวงจรยกกำลังสอง โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ ค่าโดยทั่วไป $2\phi_F = 0.65$ ดังนั้น $0.65V \gg |v_{bs}|$ การจำลองการทำงาน กำหนดให้ $v_{bs} = 50mV$, $freq = 10kHz$, $I_b = 100\mu A$ ผลการจำลองการทำงานแสดงตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการทำงานวงจรยกกำลังสอง

3.4.2 วงจรคูลล์สัญญาณมีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง



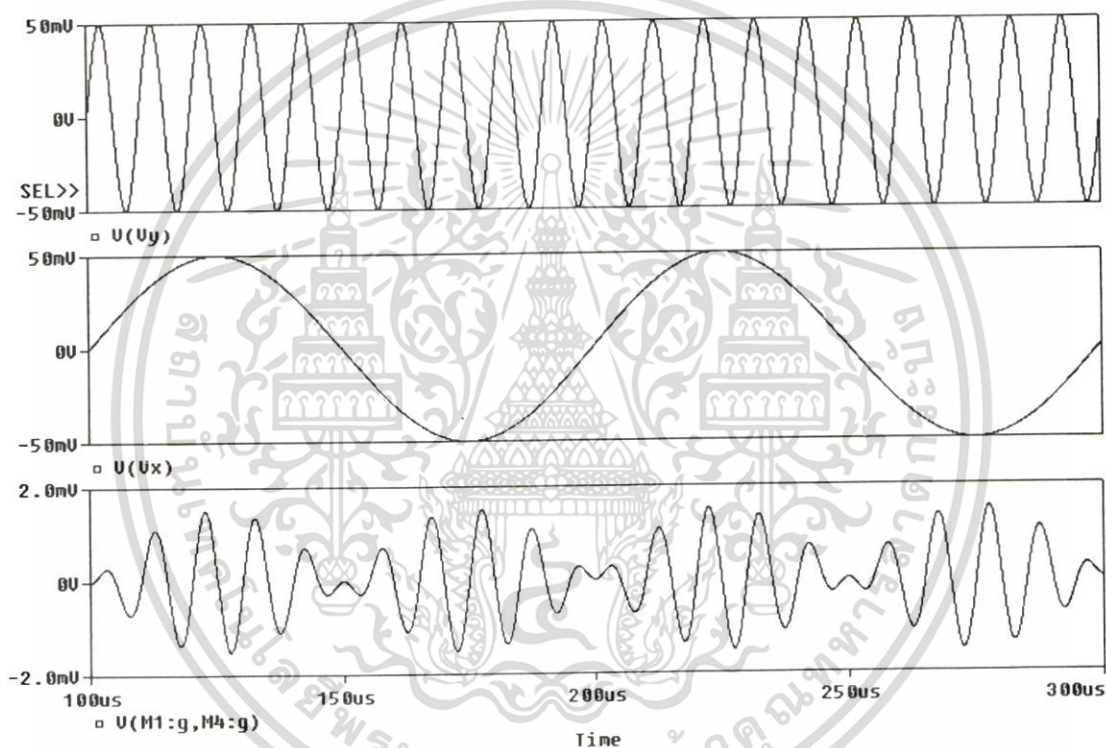
รูปที่ 3.11 วงจรคูลล์สัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ใช้จำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟตที่ใช้จำลองการทำงานตามรูปที่ 3.11 มีพารามิเตอร์ดังนี้

M1,M2,M3,M4 มีค่า $W=100\mu$, $L=1\mu$, $V_{to}=1$, $\Gamma=0.35$, $\Phi=0.65$, $K_p=50\mu$, $C_{GSO}=10n$, $C_{GDO}=10n$, $C_{GBO}=10n$, $C_{BD}=1p$, $C_{BS}=1p$, $C_{JSW}=1p$, $MJ=0.5$, $MJSW=0.3$, $FC=0.5$, $PB=0.1$

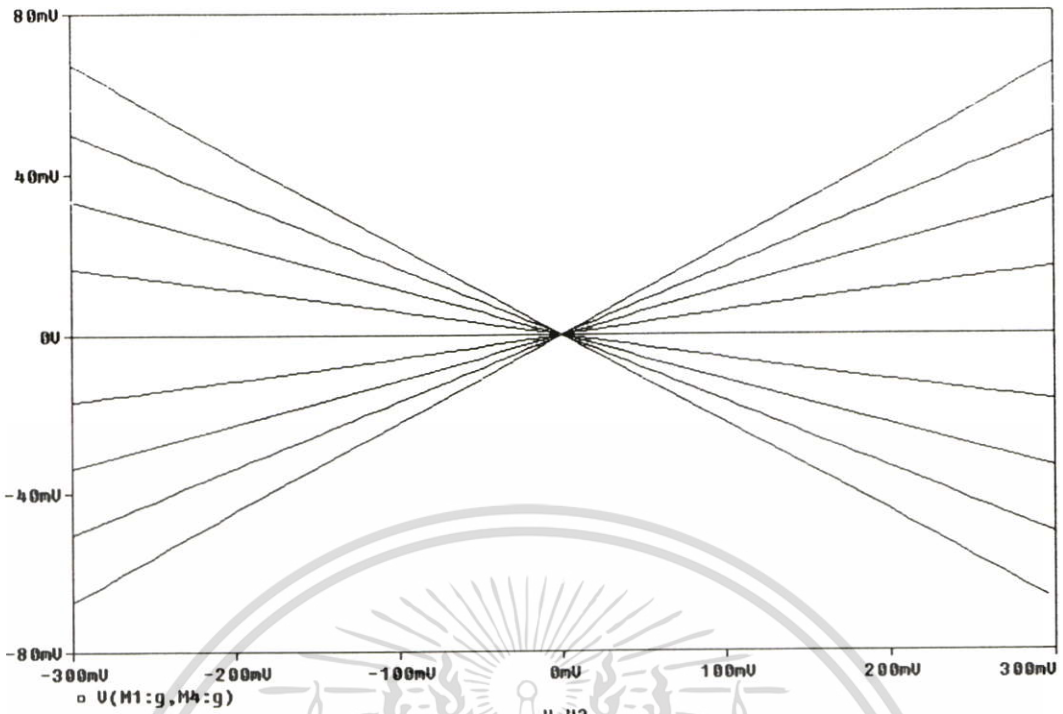
ใช้เป็นแกนหลักของวงจรยกกำลังสอง โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ ถ้าโดยทั่วไป $2\phi_F = 0.65$ ดังนั้น $0.65V \gg |v_x \pm v_y|$ ในการจำลองการทำงาน $|v_x \pm v_y| = 100mV$ การจำลองการทำงานตามรูปที่ 3.11 กำหนดให้อินพุตมีค่า $v_x = 50mV$, $freq_x = 10kHz$ และ $v_y = 50mV$, $freq_y = 100kHz$ ผล



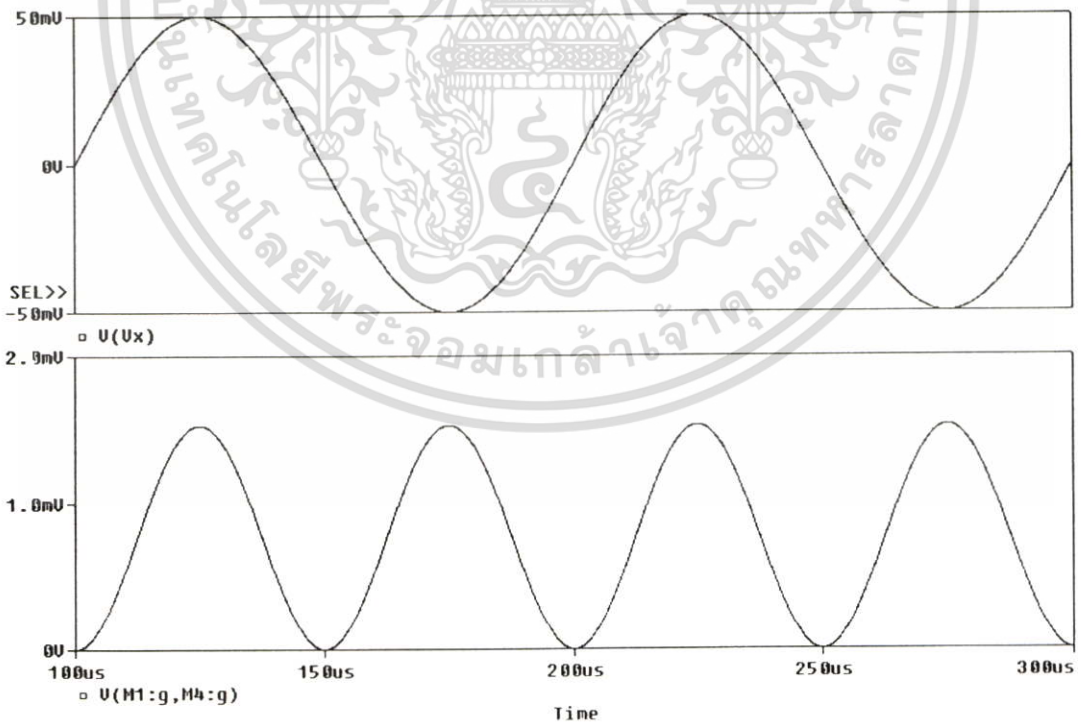
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองการทำงานวงจรคณสัญญาณแอนะล็อก 4 ทรานซิสเตอร์ที่มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณไซน์สองความถี่ $f_x=10kHz$, $50mV$ และ $f_y=100kHz$, $50mV$

รูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.16 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของผลการจำลองการทำงาน ของวงจรคณสัญญาณแอนะล็อก 4 ทรานซิสเตอร์ที่มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ประกอบด้วยผลการคณของสัญญาณรูปแบบต่างๆ และคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรคณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง และรูปที่ 3.17 แสดงผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่วงจรคณสัญญาณแอนะล็อก 4 ทรานซิสเตอร์ที่มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



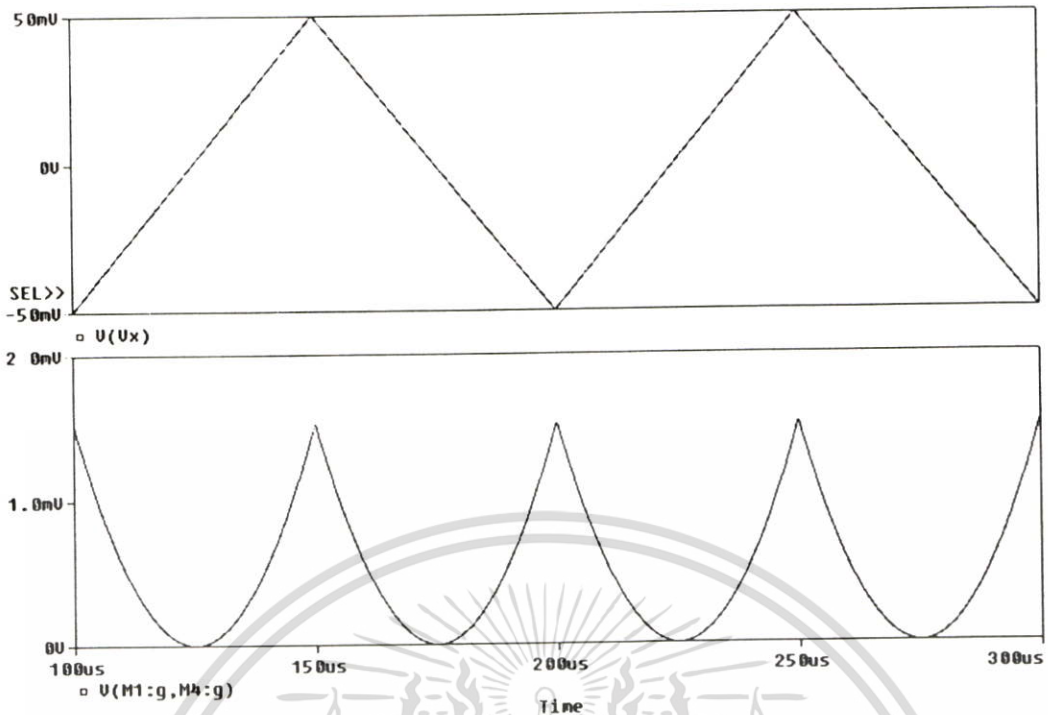
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง



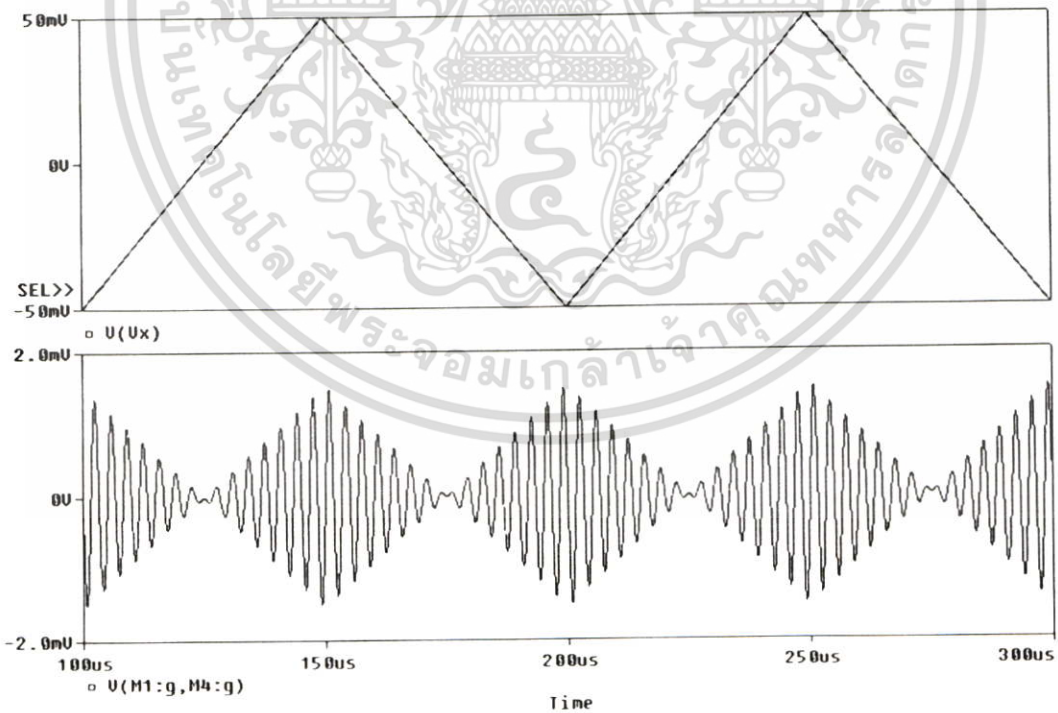
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองการทำงานวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบ

แรงดันผลต่าง เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณไซน์ $f=10\text{kHz}$, 50mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

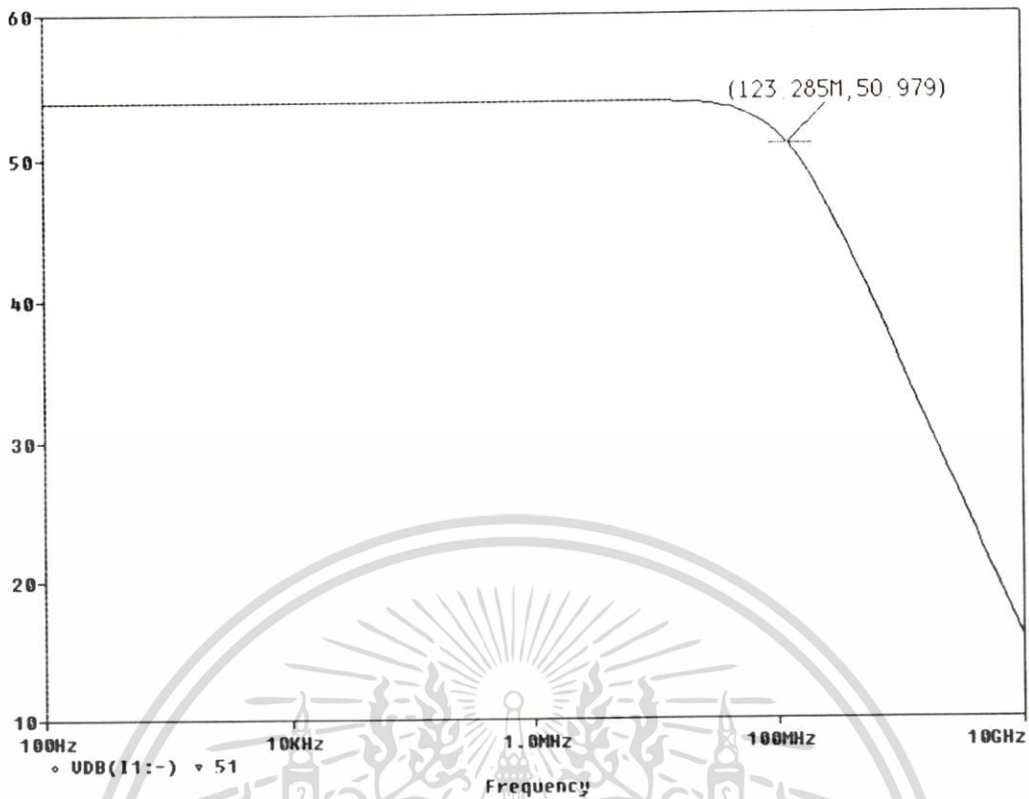


รูปที่ 3.15 ผลการจำลองการทำงานวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$



รูปที่ 3.16 ผลการจำลองการทำงานวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ และสัญญาณซายน์ $f=300\text{kHz}$, 50mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่วงจรรวมสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดเรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง

3.5 บทสรุป

จากวงจรตัวอย่างข้างต้นแสดงให้เห็นว่า สามารถนำขาบอดี้ของมอสเฟต มาใช้สร้างวงจรรักษาพลังงานสอง จากนั้นนำคุณสมบัติยกกำลังสองที่ได้ นำมาสร้างวงจรรวมสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดเรนต์แบบใหม่ ที่มีคุณสมบัติสามารถป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขาบอดี้ โดยมีสองเงื่อนไขที่สำคัญคือ $2\phi_F \gg (|v_{bs}| = |v_x \pm v_y|)$ และ $\left(\frac{2\sqrt{2}\phi_F}{\gamma} \sqrt{\frac{I_B}{K}}\right) \gg v_{bs}$ เมื่อ $|v_{bs}| = |v_x \pm v_y|$ วงจรที่ได้มีความน่าสนใจ เนื่องจากประกอบด้วย NMOS เท่านั้น และใช้มอสเฟตเพียงสองชั้นระหว่างไฟเลี้ยงกับกราวด์ ทำให้สามารถใช้งานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงที่ต่ำได้ แต่มีข้อจำกัดที่อัตราขยายของวงจรรวมสัญญาณยังมีค่าต่ำอยู่ แต่สามารถเพิ่มวงจรรขยายในภาคถัดไปได้

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้งานขาบอดีของมอสเฟต ในการออกแบบวงจรคุณลักษณะแอนะลอก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์

4.1 บทนำ

วงจรแอนะลอกที่ใช้มอสเฟต โดยทั่วไปจะใช้งานขาเกตเป็นอินพุตหลัก หากแต่มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ 4 ขา ซึ่งปกติจะต่อขาบอดีเข้ากับชาออร์ส ทำให้เหลือขาใช้งานเพียง 3 ขา บทที่ 4 นี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้งานขาบอดีของมอสเฟต ในลักษณะอินพุต นำมาใช้สร้างวงจรคุณลักษณะแอนะลอก 4 ควอดแดรนต์ ที่มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ โดยสามารถใช้งานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำได้

4.2 หลักการเบื้องต้น

สมการกระแสของมอสเฟตซึ่งทำงานในช่วงอิ่มตัว ไม่คิดผลของแอมป์ไคจะได้ว่า

$$I_d = K(V_{gs} - V_{th})^2 \quad (4.1)$$

เมื่อ

$$K = \left(\frac{\mu C_{ox} W}{2 L} \right)$$

V_{th} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม

V_{gs} คือค่าแรงดันเกตเทียบกับชาออร์ส

μ คือค่าความคล่องของประจุภายในแชนแนล

C_{ox} คือค่าความประจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ บริเวณแชนแนล

W คือความกว้างของแชนแนล

L คือความยาวของแชนแนล

สมมุติว่าแรงดัน V_{gs} ประกอบด้วย แรงดันไฟตรง V_{GS} และแรงดันไฟสลับสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก v_{gs}

$$V_{gs} = V_{GS} + v_{gs} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันขีดเริ่ม V_{th} เขียนในเทอมของแรงดัน v_{bs} ได้ว่า

$$V_{th} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \quad (4.3)$$

- เมื่อ V_{TO} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่ไม่รวมผลของปรากฏการณ์บอดี้
 γ คือค่าปัจจัยของบอดี้ หรือพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้าง
 ϕ_F คือบอดี้โพเทนเชียล ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการโคปสารในบอดี้
 v_{bs} คือค่าแรงดันขาบอดี้เทียบกับขาซอร์ส

แทนสมการที่ (4.2) และสมการที่ (4.3) ลงในสมการที่ (4.1)

$$I_d = K \left(V_{GS} + v_{gs} - V_{TO} - \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \right)^2 \quad (4.4)$$

4.3 การทำงานของวงจรมัลติพลายเออร์ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์

วงจรมัลติพลายเออร์ 4 ควอดแดรนต์มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ที่ได้ออกแบบ จะอาศัยการยกกำลังสองสัญญาณผลรวม และสัญญาณผลต่าง จากนั้นนำมาบวกกันเป็นสัญญาณการคูณ ดังนั้นจึงได้ออกแบบวงจรมัลติพลายเออร์ที่มีอินพุตเข้ามาที่ขาบอดี้ จากนั้นนำวงจรมัลติพลายเออร์นั้นไปใช้สร้างวงจรมัลติพลายเออร์อีกที

4.3.1 หลักการออกแบบวงจรมัลติพลายเออร์ยกกำลังสอง

จากการกระจายเทอม $\sqrt{C \pm x}$ ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ [1] จะได้ว่า

$$\sqrt{C \pm x} = \sqrt{C} \pm \frac{x}{2\sqrt{C}} - \frac{x^2}{4.2!\sqrt{C^3}} \pm \frac{3x^3}{8.3!\sqrt{C^5}} - \frac{15x^4}{16.4!\sqrt{C^7}} \pm \dots \quad (4.5)$$

$$\text{ดังนั้น } \sqrt{C+x} - \sqrt{C} = +\frac{x}{2\sqrt{C}} - \frac{x^2}{4.2!\sqrt{C^3}} + \frac{3x^3}{8.3!\sqrt{C^5}} - \frac{15x^4}{16.4!\sqrt{C^7}} + \dots \quad (4.6)$$

$$\text{และ } \sqrt{C-x} - \sqrt{C} = -\frac{x}{2\sqrt{C}} - \frac{x^2}{4.2!\sqrt{C^3}} - \frac{3x^3}{8.3!\sqrt{C^5}} - \frac{15x^4}{16.4!\sqrt{C^7}} - \dots \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (4.6) + (4.7) จะได้ว่า

$$(\sqrt{C+x}-\sqrt{C})+(\sqrt{C-x}-\sqrt{C})\cong -\frac{x^2}{4\sqrt{C^3}} \quad ; \quad x \ll C \quad (4.8)$$

นำการประมาณจากสมการที่ (4.8) มาแทนในเทอมด้านซ้ายของสมการที่ (4.9) แล้วจัดรูปสมการที่ (4.9) เสียใหม่ จะได้ว่า

$$\left(D-(\sqrt{C+x}-\sqrt{C})\right)^2 + \left(D-(\sqrt{C-x}-\sqrt{C})\right)^2 = 2D^2 + \left(\frac{D+\sqrt{C}}{2C\sqrt{C}}\right)x^2 \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.4) จัดรูปให้เหมือนสมการที่ (4.9) โดยมีเงื่อนไขว่า $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ และกำหนดให้ $v_{gs} = 0$ จะได้ว่า

$$\frac{I_{d1}}{K\gamma^2} = \left(\left(\frac{V_{GS}-V_{TO}}{\gamma} \right) - \left(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \right)^2 \quad (4.10)$$

$$\frac{I_{d2}}{K\gamma^2} = \left(\left(\frac{V_{GS}-V_{TO}}{\gamma} \right) - \left(\sqrt{2\phi_F + v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \right)^2 \quad (4.11)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (4.9) และสมการที่ (4.10) กับ (4.11) จะพบความสัมพันธ์ว่า

$$D = \left(\frac{V_{GS}-V_{TO}}{\gamma} \right), \quad C = 2\phi_F \quad \text{และ} \quad x = v_{bs} \quad (4.12)$$

นำสมการที่ (4.10) + (4.11) แล้วจัดให้อยู่ในรูป $I_o = (I_{d1} + I_{d2})$ ตามรูปที่ 4.1 จะได้ว่า

$$I_o = 2K(V_{GS}-V_{TO})^2 + \left(\frac{K}{4\phi_F\sqrt{2\phi_F}} \right) (\gamma(V_{GS}-V_{TO}) + \gamma^2\sqrt{2\phi_F}) v_{bs}^2 \quad (4.13)$$

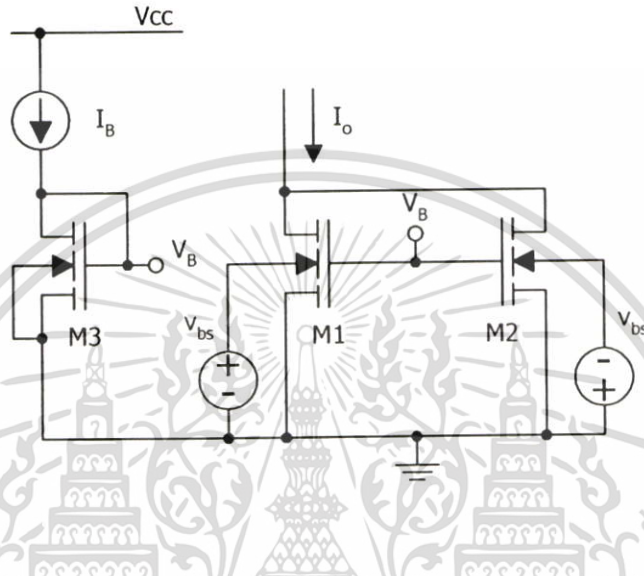
สามารถเขียนสมการที่ (4.13) ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ยกกำลังสองอย่างง่ายได้ว่า

$$I_o = (I_{DO} + mv_{bs}^2) \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $I_{DO} = 2K(V_{GS} - V_{TO})^2$

และ $n = \left(\frac{K}{4\phi_F \sqrt{2\phi_F}} \right) \left(\gamma(V_{GS} - V_{TO}) + \gamma^2 \sqrt{2\phi_F} \right)$ (4.14)



รูปที่ 4.1 วงจรยกกำลังสอง ที่มีกระแสเป็นเอาต์พุต

4.3.2 หลักการออกแบบวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก

ถ้าป้อนสัญญาณเข้า v_{bs} เป็นสัญญาณผลรวม ($v_x + v_y$) และสัญญาณผลต่าง ($v_x - v_y$) ตามรูปที่ 4.2 จะได้ว่า [2][3]

$$I_1 = I_{DO} + n(v_x + v_y)^2 = I_{DO} + n(v_x^2 + 2v_x v_y + v_y^2) \quad (4.15)$$

$$I_2 = I_{DO} + n(v_x - v_y)^2 = I_{DO} + n(v_x^2 - 2v_x v_y + v_y^2) \quad (4.16)$$

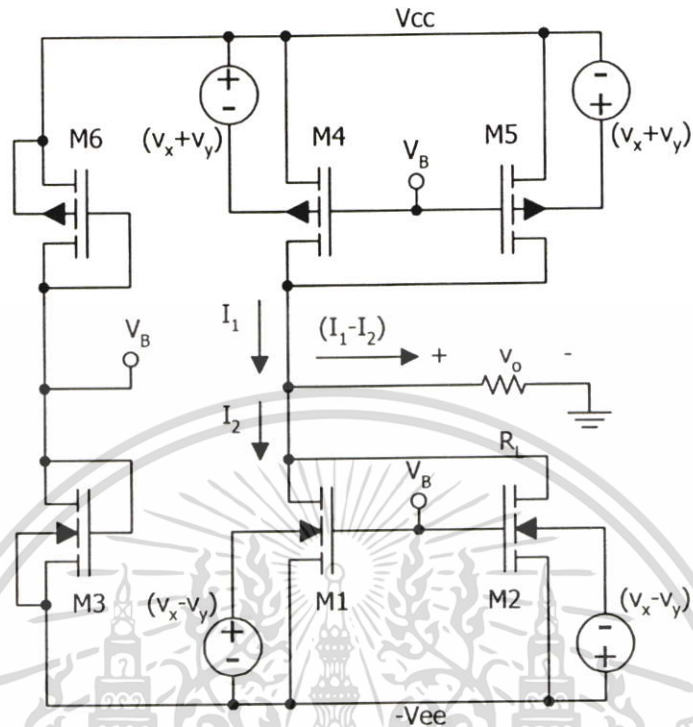
หาผลต่างของกระแสทรานซิสเตอร์ทั้งสองสมการ (4.15) - (4.16) จะได้ว่า

$$(I_1 - I_2) = (4n)v_x v_y \quad (4.17)$$

แปลงผลต่างกระแสที่ได้ เป็นแรงดันเอาต์พุต เทียบกราวณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = R_L (I_1 - I_2) = (4R_L n) v_x v_y \quad (4.18)$$

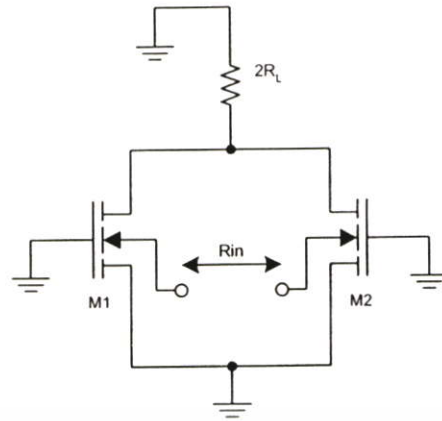


รูปที่ 4.2 วงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก 4 ทรานซิสเตอร์ ที่มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์

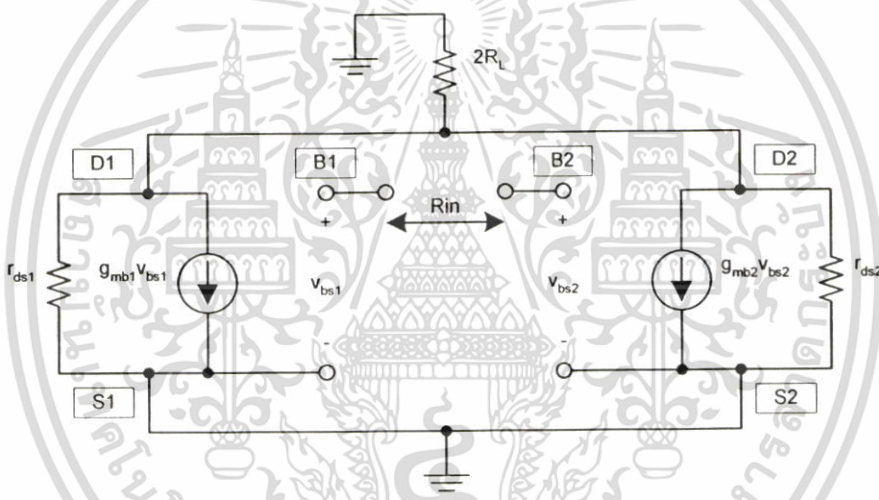
4.3.2 ความต้านทานอินพุต

การวิเคราะห์หาความต้านทานอินพุต ของวงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก ที่มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ สามารถหาได้จากการวิเคราะห์เพียงครึ่งซีกล่างของวงจรยกกำลังสองตามรูปที่ 4.3 โดยคิดความต้านทานอินพุตสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก แรงดันเกต-ซอร์ส จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากถูกไบแอสด้วยแรงดันค่าคงที่ และทำการแตก R_L ออกเป็น $2R_L$ สองตัวขนานกัน ความต้านทานอินพุตจะมองในลักษณะคิฟเฟอเรนเชียล

สามารถเขียนวงจรสมมูลของการวิเคราะห์หาความต้านทานขาเข้า ได้ตามรูปที่ 4.4 จะพบว่า ถ้าแรงดัน v_{bs} มีขนาดเล็ก ไม่พอที่จะทำให้เกิดการไบแอสตรงระหว่างขาอินพุตและช่องนำกระแสได้ จะพบว่าความต้านทานอินพุตสำหรับวงจรยกกำลังสองนี้ สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก มีค่าสูงมาก เสมือนเป็นวงจรเปิด (Open circuit)



รูปที่ 4.3 วงจรยกกำลังสองที่ใช้วิเคราะห์หาความต้านทานขาเข้า

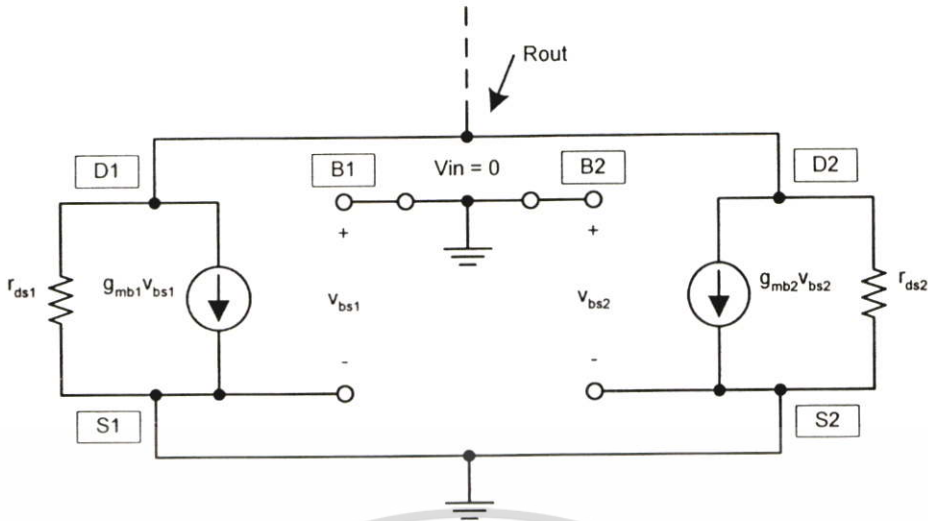


รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลของวงจรยกกำลังสองที่ใช้หาความต้านทานขาเข้า

4.3.3 ความต้านทานเอาต์พุต

การวิเคราะห์หาค่าความต้านทานเอาต์พุต สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ของวงจรคู่สัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวนด์นี้ หาได้จากความต้านทานเอาต์พุตของวงจรยกกำลังสอง เมื่อกำหนดให้แรงดันอินพุตของวงจร $v_{in} = v_{bs} = 0$ จากนั้นวิเคราะห์เพียงแค่ครึ่งซีกล่างของรูปที่ 4.2 จะสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ตามรูปที่ 4.5 ดังนั้น $R_{out} = \left(\frac{r_{ds}}{2} \right)$ (วงจรครึ่งซีกล่าง) และเมื่อคิดรวมของวงจรทั้งสองซีก(ทั้งวงจรครึ่งซีกบนและล่าง) จะได้ว่า $R_{out} = \left(\frac{r_{dsN}}{2} + \frac{r_{dsP}}{2} \right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



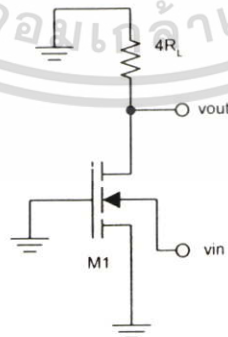
รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลของวงจรยกกำลังสองที่ใช้หาความต้านทานขาออก

4.3.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่

เนื่องจากความสมมาตรของวงจร ดังนั้นจะแบ่งวงจรออกเป็น 4 ส่วนที่สมมาตรกันตามรูปที่ 4.6(a) สำหรับวิเคราะห์หาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรยกกำลังสอง

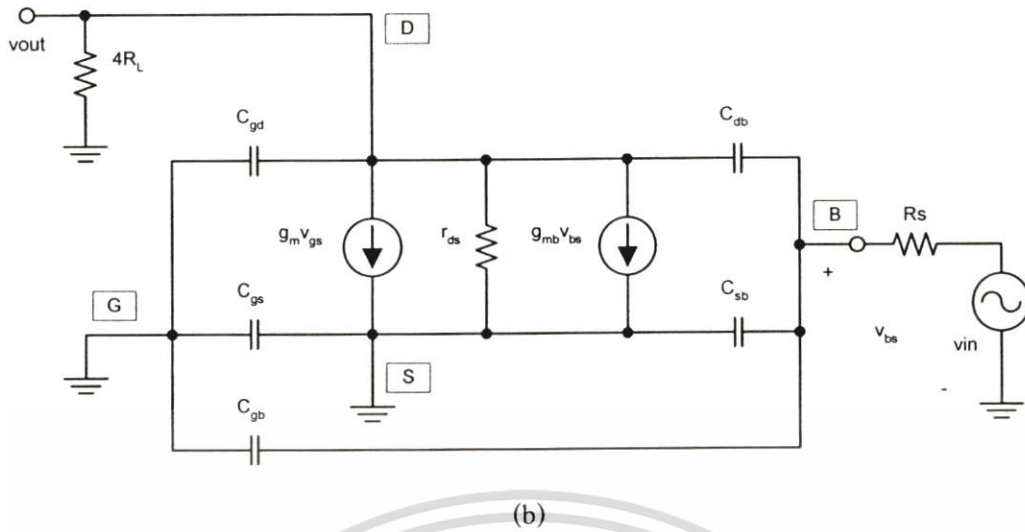
จากนั้นแทนวงจรสมมูลที่ความถี่สูงของมอสเฟต ตามรูปที่ 2.6 ลงในรูปที่ 4.6(a) จะได้วงจรสมมูลสำหรับสัญญาณขนาดเล็ของวงจรยกกำลังสองที่ความถี่สูงตามรูปที่ 4.6(b)

เนื่องจาก $v_{gs} = 0$ ดังนั้น $C_{gs} \cong 0$ และ $g_m v_{gs} \cong 0$ และ $R_x = (4R_L // r_{ds})$ ดังนั้นจัดวงจรสมมูลรูปที่ 4.6(b) เสียใหม่จะได้ วงจรสมมูลตามรูปที่ 4.7

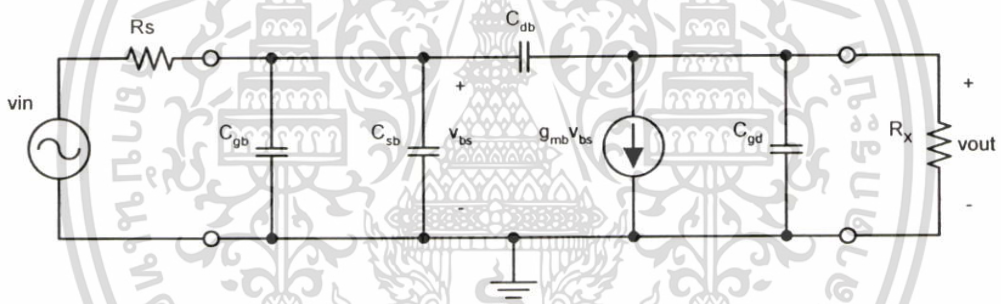


(a)

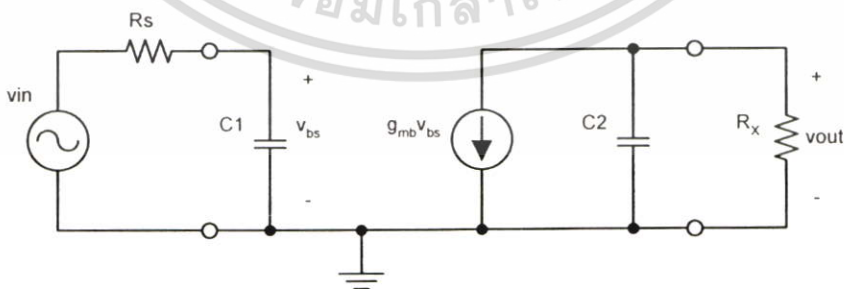
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 (a) เมื่อพิจารณาเพียงกริ่งด้านของซิกซ์ช้าย
 (b) วงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่สูง



รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลอย่างง่ายจากการประมาณค่าแล้ว



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลอย่างง่ายเมื่อใช้ทฤษฎีของมิลเลออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์แยก C_{db} ออกเป็นเทอม $(1 + g_{mb}R_X)C_{db}$ ทางด้านซ้าย และ เป็นเทอม $\left(1 + \frac{1}{g_{mb}R_X}\right)C_{db}$ ทางด้านขวา จะได้วงจรมูลอย่างง่ายตามรูปที่ 4.8

$$\text{เมื่อ} \quad C_1 \cong [C_{gb} + C_{sb} + (1 + g_{mb}R_X)C_{db}] \quad (4.19)$$

$$\text{และ} \quad C_2 \cong \left[C_{gd} + \left(1 + \frac{1}{g_{mb}R_X}\right)C_{db} \right] \quad (4.20)$$

จากทฤษฎีค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจร (Open-circuit time constant) [4] ตามสมการที่ 4.21

$$f_c \cong \frac{1}{2\pi \left[\sum_i C_i R_{io} \right]} \quad (4.21)$$

สามารถประมาณหาค่าความถี่คัตออฟของวงจรมูลอย่างง่ายจากรูปที่ 4.8 ได้ว่า

$$f_c \cong \left(\frac{1}{2\pi [C_1 R_X + C_2 R_X]} \right) \quad (4.22)$$

4.3.5 ช่วงการปฏิบัติงาน

การวิเคราะห์หาช่วงการทำงานของวงจรมูลอย่างง่าย มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ นี้ จะพิจารณา จากช่วงการทำงานของวงจรมูลอย่างง่ายสอง จากรูปที่ 4.1 โดยจากค่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{th} = V_{TO} + \gamma(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F})$ เนื่องจาก $V_{in} = v_{bs}$ ดังนั้นเงื่อนไขของ V_{in} ในซีกบวก จะมีค่าเท่ากับ $V_{in} \leq 2\phi_F$ หรือ

$$V_m(\max) = 2\phi_F \quad (4.23)$$

สำหรับการวิเคราะห์หาค่า V_m ในซีกลบ หรือ $V_m(\min)$ นั้น พิจารณาจากค่า $V_m(\min)$ ที่ส่งผลให้แรงดันขีดเริ่ม V_{th} มีค่ามากพอทำให้กระแสทราน $I_d = 0$ นั่นคือ $(V_{GS} - V_{th}) = 0$

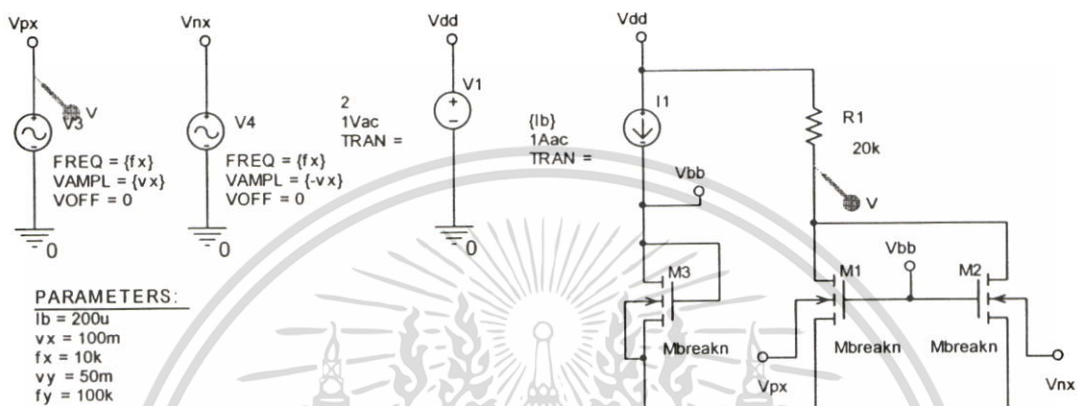
$$(V_{GS} - V_{th}) = 0 = [V_{GS} - V_{TO} - \gamma(\sqrt{2\phi_F - V_m(\min)} - \sqrt{2\phi_F})] \quad (4.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

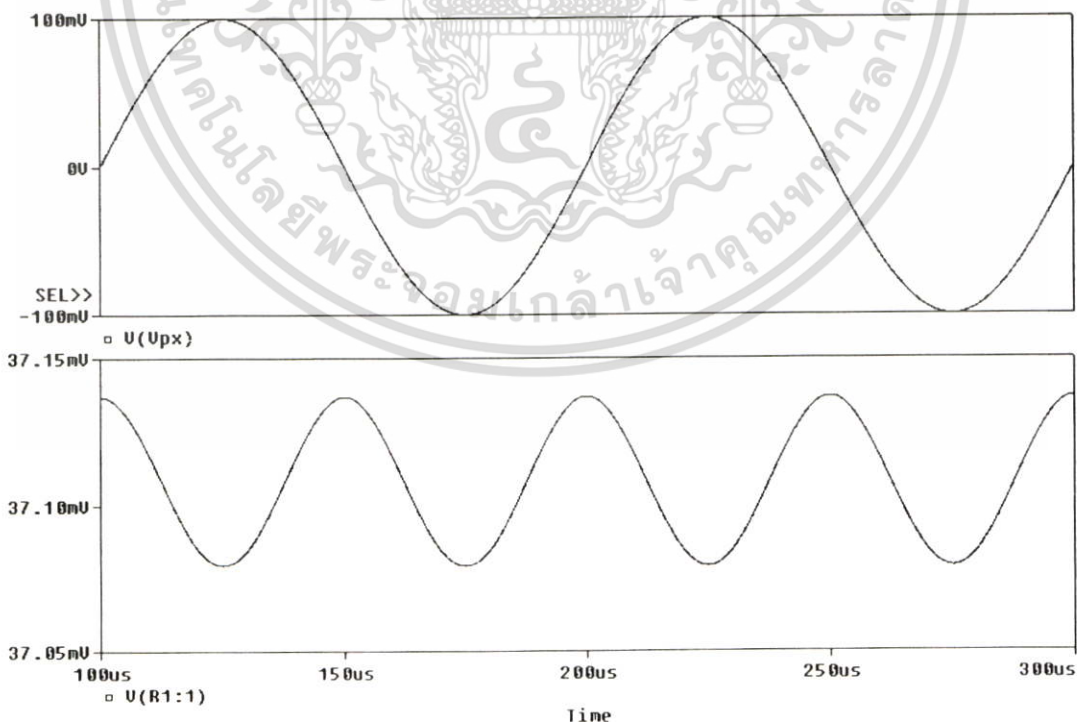
ดังนั้น
$$V_m (\text{min}) = 2\phi_F - \left[\left(\frac{V_{GS} - V_{TO}}{\gamma} \right) + \sqrt{2\phi_F} \right]^2 \tag{4.25}$$

4.4 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

4.4.1 วงจรยกกำลังสอง



รูปที่ 4.9 วงจรยกกำลังสองที่ใช้จำลองการทำงาน



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการทำงานวงจรยกกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟตที่ใช้จำลองการทำงานตามรูปที่ 4.9 มีพารามิเตอร์ดังนี้

M1,M2 มีค่า $W=100\mu$, $L=1\mu$, $V_{to}=1$, $\Gamma=0.35$, $\Phi=0.65$, $K_p=50\mu$, $CGSO=10n$, $CGDO=10n$, $CGBO=10n$, $CBD=1p$, $CBS=1p$, $CJSW=1p$, $MJ=0.5$, $MJSW=0.3$, $FC=0.5$, $PB=0.1$ ใช้เป็นแกนหลักของวงจรยกกำลังสอง โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ ค่าโดยทั่วไป $2\phi_F = 0.65$ ดังนั้น $0.65V \gg |v_{bs}|$ การจำลองการทำงาน กำหนดให้ $v_{bs} = 100mV$, $freq = 10kHz$, $I_b = 200\mu A$ ผลการจำลองการทำงานตามรูปที่ 4.10

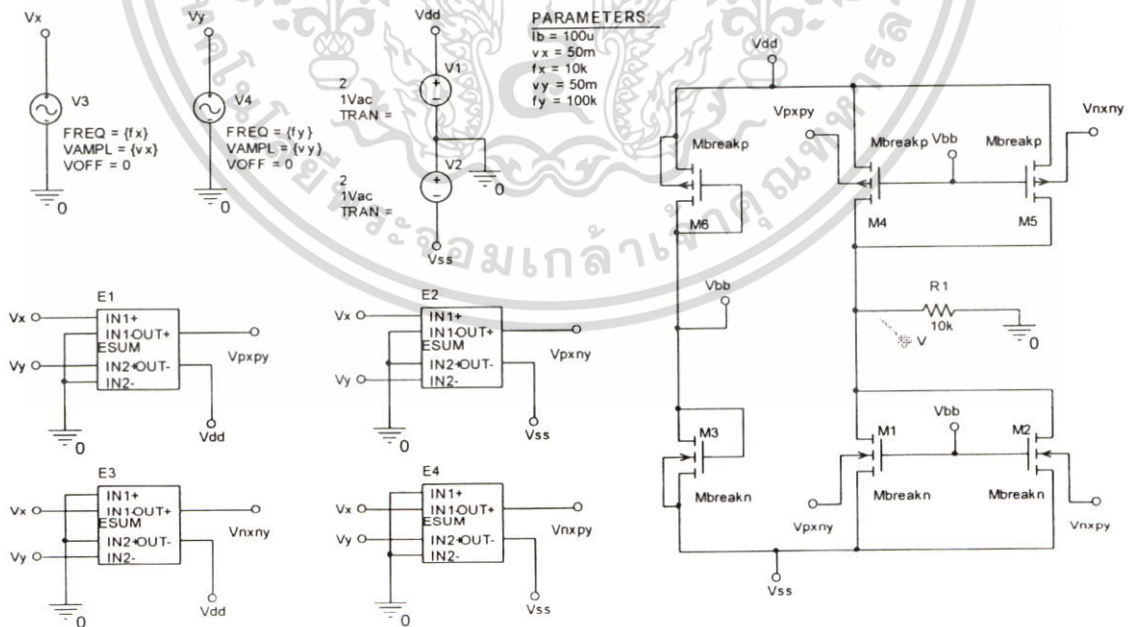
4.4.2 วงจรคุณสมบัติสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์

มอสเฟตที่ใช้จำลองการทำงานตามรูปที่ 4.11 มีพารามิเตอร์ดังนี้

M1,M2,M3 เป็น NMOS มีค่า $W=100\mu$, $L=1\mu$, $V_{to}=1$, $\Gamma=0.35$, $\Phi=0.65$, $K_p=50\mu$, $CGSO=10n$, $CGDO=10n$, $CGBO=10n$, $CBD=1p$, $CBS=1p$, $CJSW=1p$, $MJ=0.5$, $MJSW=0.3$, $FC=0.5$, $PB=0.1$

โดย M1,M2 เป็นแกนหลักของวงจรยกกำลังสอง ส่วน M3 ใช้สร้างแรงดันไบแอสให้แก่ M1,M2

M4,M5,M6 เป็น PMOS มีค่า $W=100\mu$, $L=1\mu$, $V_{to}=-1$, $\Gamma=0.35$, $\Phi=0.65$, $K_p=50\mu$ โดย M5,M6 เป็นแกนหลักของวงจรยกกำลังสอง ส่วน M6 ใช้สร้างแรงดันไบแอสให้แก่ M4,M5



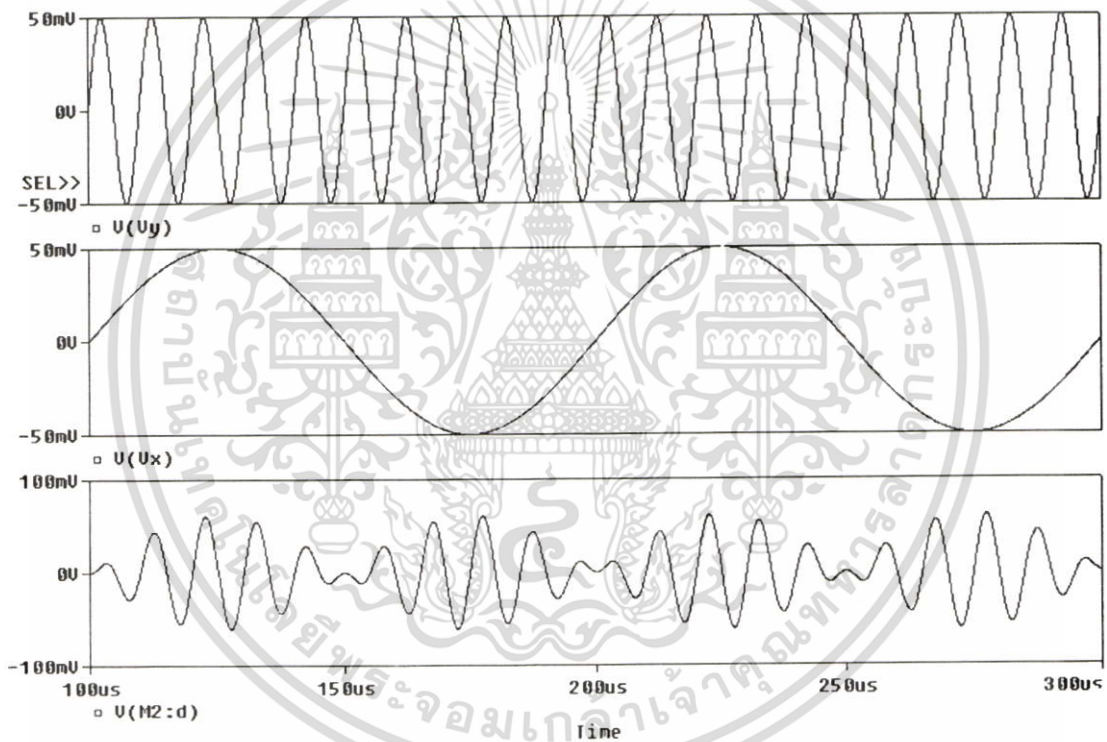
รูปที่ 4.11 วงจรคุณสมบัติสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

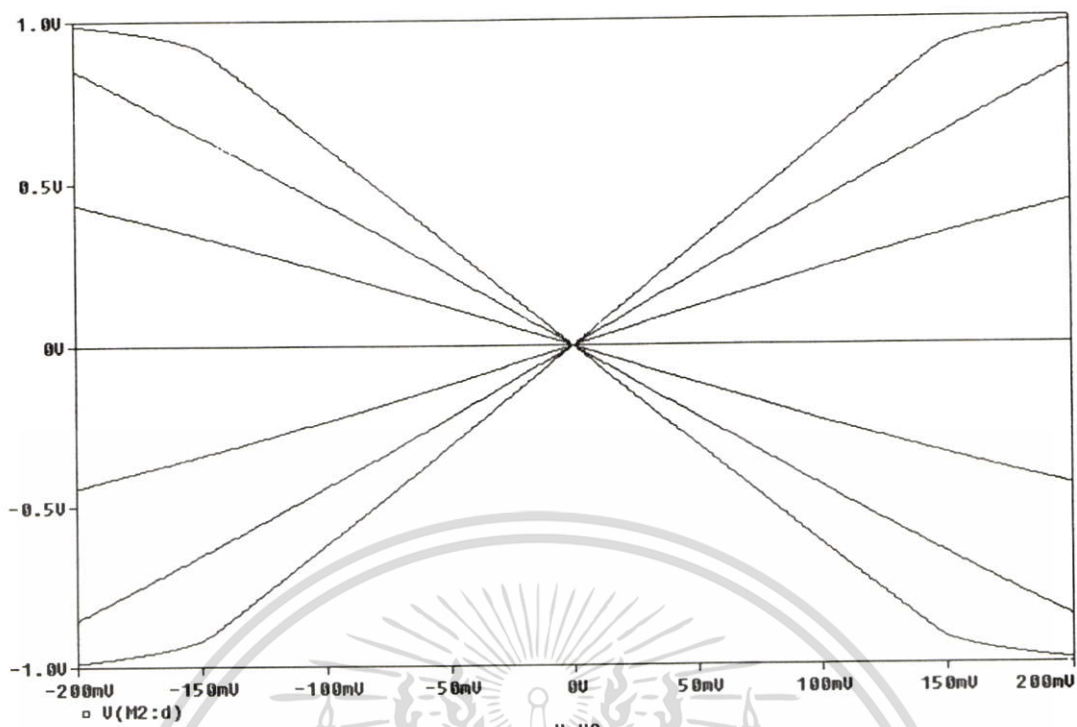
โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ ค่าโดยทั่วไป $2\phi_F = 0.65$ ดังนั้น $0.65V \gg |v_x \pm v_y|$

การจำลองการทำงานตามรูปที่ 4.11 กำหนดให้อินพุตมีค่า $v_x = 50mV$, $freq, x = 10kHz$ และ $v_y = 50mV$, $freq, y = 100kHz$ ผลการจำลองการทำงานให้ $|v_x \pm v_y| = 100mV$

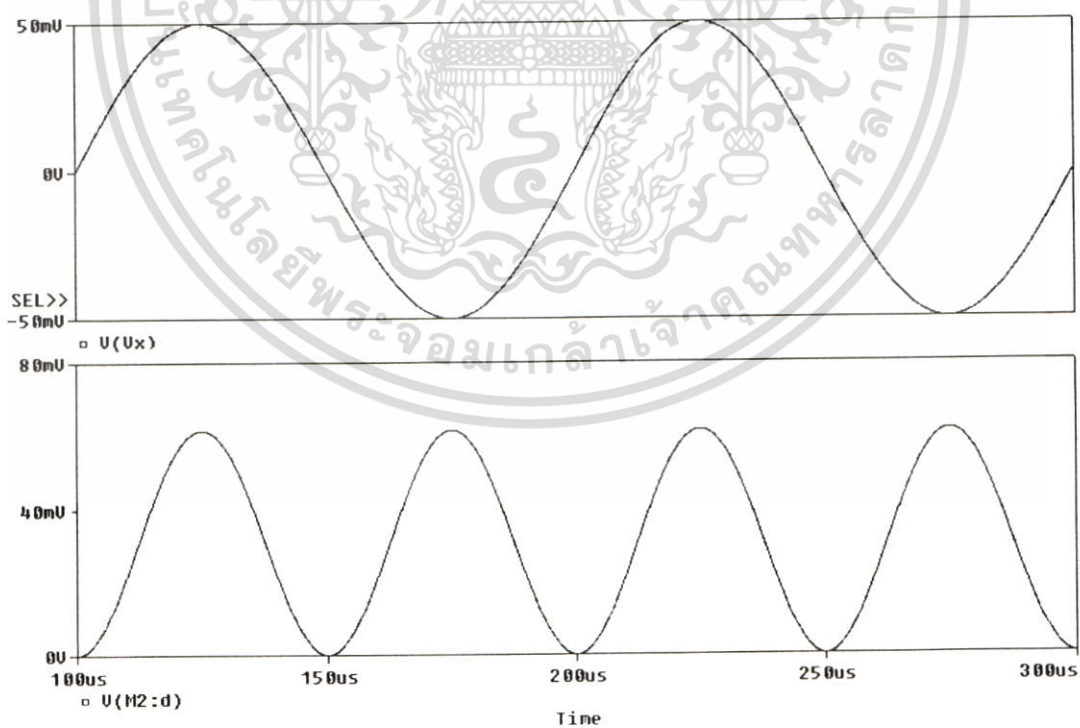
รูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.16 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของผลการจำลองการทำงาน ของวงจรมอดูลีสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์แบบที่สอง ประกอบด้วยผลการคูณของสัญญาณรูปแบบต่าง และคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรมอดูลีสัญญาณแบบที่สอง และรูปที่ 4.17 แสดงผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรมอดูลีสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการทำงานวงจรมอดูลีสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์ เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณไซน์สองความถี่ $f_x = 10kHz$, $50mV$ และ $f_y = 100kHz$, $50mV$



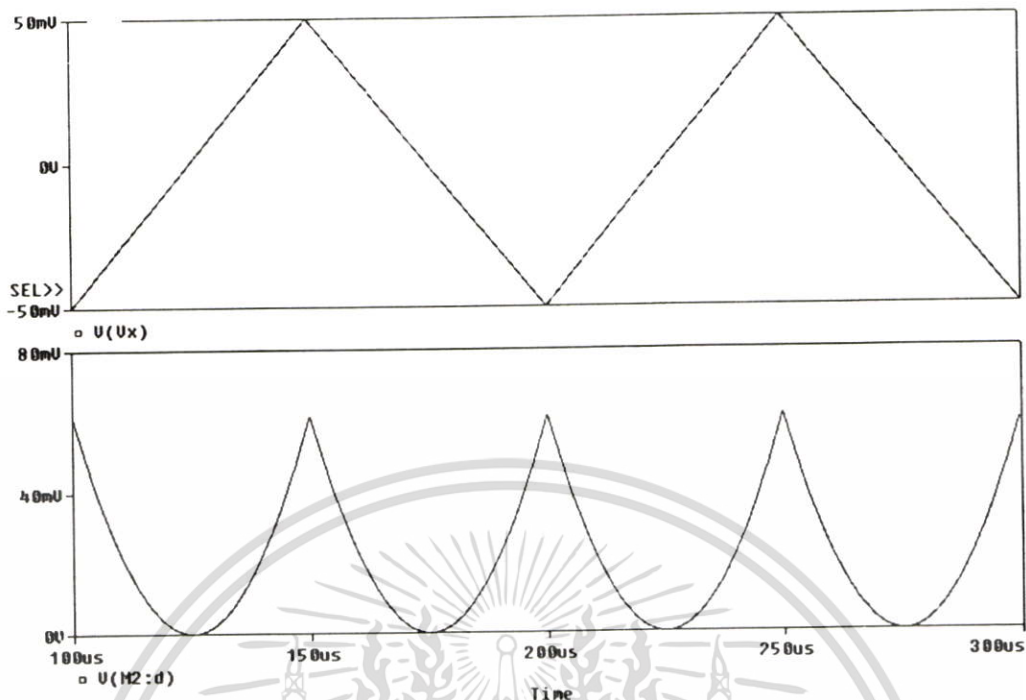
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงวงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวน์



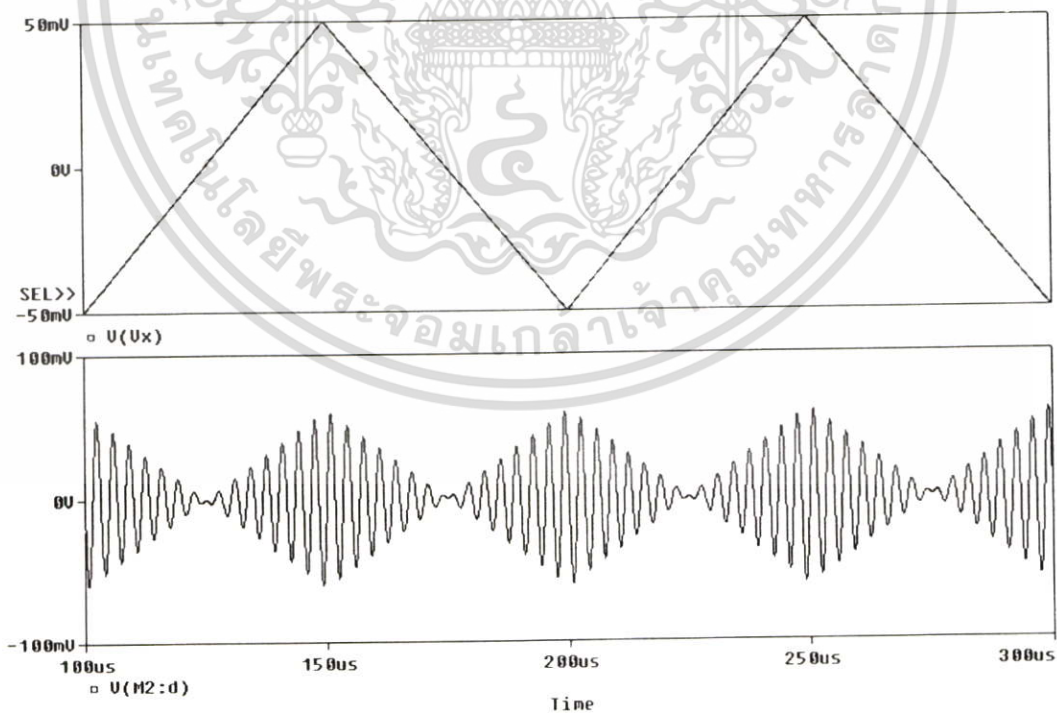
รูปที่ 4.14 ผลการจำลองการทำงานวงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบ

กราวน์ เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณไซน์ $f=10\text{kHz}$, 50mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

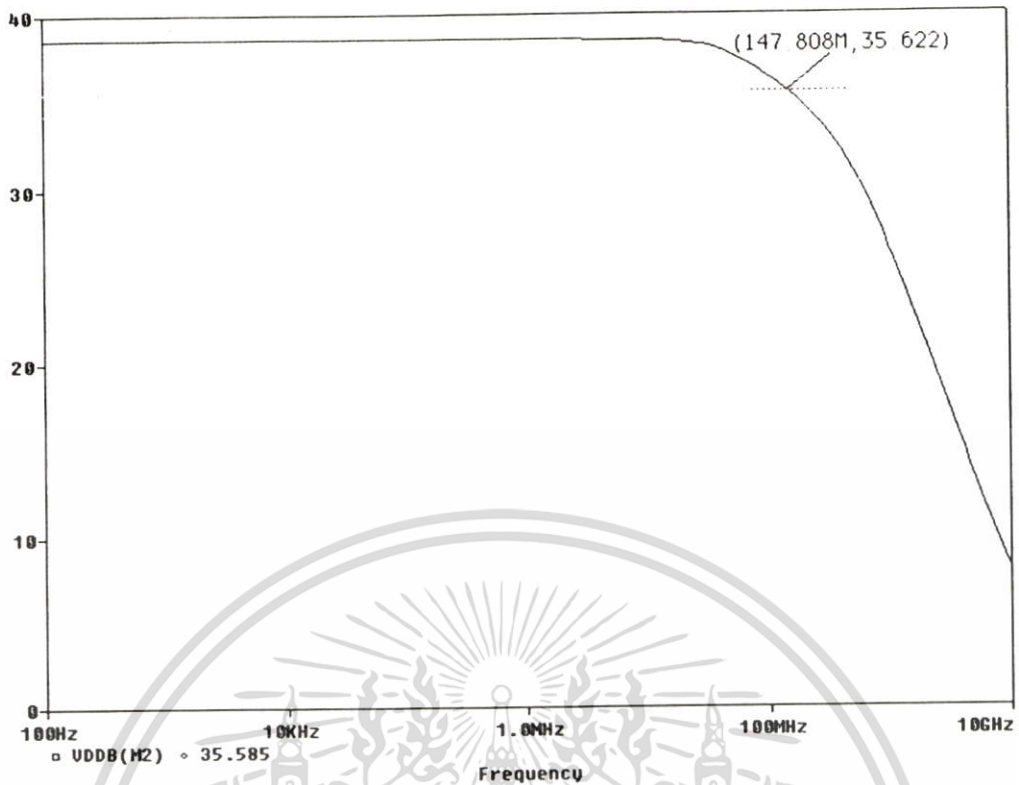


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการทำงานวงจรคุณสมบัติ 4 ทรานซิสเตอร์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการทำงานวงจรคุณสมบัติ 4 ทรานซิสเตอร์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบ

กราวด์ เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ และสัญญาณซายน์ $f=300\text{kHz}$, 50mV
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อก 4 วัตต์
 วัตต์ครอนท์ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์

4.5 บทสรุป

จากวงจรคุณสัญญาณมีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ แสดงให้เห็นว่า สามารถนำขา
 บอค์ของมอสเฟต มาใช้สร้างวงจรขั้วกำลังสอง จากนั้นนำคุณสมบัติขั้วกำลังสองที่ได้ ไปสร้าง
 วงจรคุณสัญญาณแอนะล็อก 4 วัตต์ครอนท์แบบใหม่ได้อีกแบบ โดยมีเงื่อนไขสำคัญคือ
 $2\phi_F \gg (|v_{bs}| = |v_x \pm v_y|)$ โดยอินพุตมีช่วงการทำงานที่ค่อนข้างแคบ และต้องใช้ไฟเลี้ยงบวก/ลบ
 แต่างจรมีความเรียบง่าย และมีชั้นของทรานซิสเตอร์ระหว่างไฟเลี้ยงทั้งสองเพียง 2 ชั้นเท่านั้น ทำ
 ให้สามารถทำงานที่ไฟเลี้ยงค่าต่ำได้ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้มอสเฟตทั้งชนิด NMOS และ PMOS ซึ่ง
 จะเกิดผลของการไม่เท่ากันของคุณสมบัติของมอสเฟตทั้งสองชนิด ดังจะเห็นได้จากการทดลองต่อ
 วงจรในบทที่ 6

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้งานขาบอดี้ของมอสเฟต ในการออกแบบวงจรคุณสมบัติแวนเอะลอก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี้

5.1 บทนำ

วงจรแวนเอะลอกที่ใช้มอสเฟตโดยทั่วไปจะใช้งานขาเกตเป็นอินพุตหลัก หากแต่มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ 4 ขา ซึ่งปกติจะต่อขาบอดี้เข้ากับขาซอร์ส ทำให้เหลือขาใช้งานเพียง 3 ขา บทที่ 5 นี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้งานขาบอดี้ของมอสเฟต ในลักษณะอินพุต ร่วมกับขาเกต นำมาใช้สร้างวงจรคุณสมบัติแวนเอะลอก 4 ควอดแดรนต์ ที่มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง โดยสามารถใช้งานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำได้

5.2 หลักการเบื้องต้น

สมการกระแสของมอสเฟตซึ่งทำงานในช่วงอิ่มตัว ไม่คิดผลของแอมปีตา จะได้ว่า

$$I_d = K(V_{gs} - V_{th})^2 \quad (5.1)$$

เมื่อ

$$K = \left(\frac{\mu C_{ox} W}{2 L} \right)$$

V_{th} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม

V_{gs} คือค่าแรงดันเกตเทียบกับซอร์ส

μ คือค่าความคล่องของประจุภายในแชนแนล

C_{ox} คือค่าความประจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ บริเวณแชนแนล

W คือความกว้างของแชนแนล

L คือความยาวของแชนแนล

สมมุติว่าแรงดัน V_{gs} ประกอบด้วย แรงดันไฟตรง V_{GS} และแรงดันไฟสลับสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก v_{gs}

$$V_{gs} = V_{GS} + v_{gs} \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันขีดเริ่ม V_{th} เขียนในเทอมของแรงดัน v_{bs} ได้ว่า

$$V_{th} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \quad (5.3)$$

- เมื่อ V_{TO} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่ไม่รวมผลของปรากฏการณ์บอดี้
 γ คือค่าปัจจัยของบอดี้ หรือพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้าง
 ϕ_F คือบอดี้โพเทนเชียล ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการโดปสารในบอดี้
 v_{bs} คือค่าแรงดันขาบอดี้เทียบกับชาซอร์ส

แทนสมการที่ (5.2) และสมการที่ (5.3) ลงในสมการที่ (5.1)

$$I_d = K \left(V_{GS} + v_{gs} - V_{TO} - \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \right)^2 \quad (5.4)$$

5.3 การทำงานของวงจรถูกสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี้

5.3.2 หลักการออกแบบวงจรถูกสัญญาณแอนะล็อก

จากการกระจายเทอม $\sqrt{C \pm x}$ ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ [1] จะได้ว่า

$$\sqrt{C \pm x} = \sqrt{C} \pm \frac{x}{2\sqrt{C}} - \frac{x^2}{4 \cdot 2! \sqrt{C}^3} \pm \frac{3x^3}{8 \cdot 3! \sqrt{C}^5} - \frac{15x^4}{16 \cdot 4! \sqrt{C}^7} \pm \dots \quad (5.5)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \sqrt{C+x} = \sqrt{C} + \frac{x}{2\sqrt{C}} - \frac{x^2}{4 \cdot 2! \sqrt{C}^3} + \frac{3x^3}{8 \cdot 3! \sqrt{C}^5} - \frac{15x^4}{16 \cdot 4! \sqrt{C}^7} + \dots \quad (5.6)$$

$$\text{และ} \quad \sqrt{C-x} = \sqrt{C} - \frac{x}{2\sqrt{C}} - \frac{x^2}{4 \cdot 2! \sqrt{C}^3} - \frac{3x^3}{8 \cdot 3! \sqrt{C}^5} - \frac{15x^4}{16 \cdot 4! \sqrt{C}^7} - \dots \quad (5.7)$$

นำสมการที่ (5.6) - (5.7) จะได้ว่า

$$\sqrt{C+x} - \sqrt{C-x} = \frac{x}{\sqrt{C}} \quad \because x \ll C \quad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก } (D - \sqrt{C-x} + y)^2 - (D - \sqrt{C-x} - y)^2 = 2D - 2y\sqrt{C-x} \quad (5.9)$$

$$(D - \sqrt{C+x} + y)^2 - (D - \sqrt{C+x} - y)^2 = 2D - 2y\sqrt{C+x} \quad (5.10)$$

นำสมการที่ (5.9) – (5.10) แล้วใช้การประมาณจากสมการที่ (5.8) จะได้ว่า

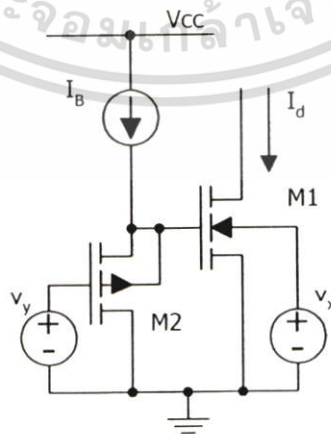
$$\begin{aligned} & \left[(D - \sqrt{C-x} + y)^2 - (D - \sqrt{C-x} - y)^2 \right] \\ & - \left[(D - \sqrt{C+x} + y)^2 - (D - \sqrt{C+x} - y)^2 \right] = \frac{2}{\sqrt{C}} yx \end{aligned} \quad (5.11)$$

จัดสมการที่ (5.4) ให้เหมือนกับเทอมแรกของสมการที่ (5.11) ตามรูปที่ 5.1 โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญว่า $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ จะได้ว่า

$$\frac{I_d}{K\gamma^2} = \left(\left(\frac{V_{GS} - V_{TO} + \gamma\sqrt{2\phi_F}}{\gamma} \right) - \sqrt{2\phi_F} - v_{bs} + \left(\frac{v_{gs}}{\gamma} \right) \right)^2 = (D - \sqrt{C-x} + y)^2 \quad (5.12)$$

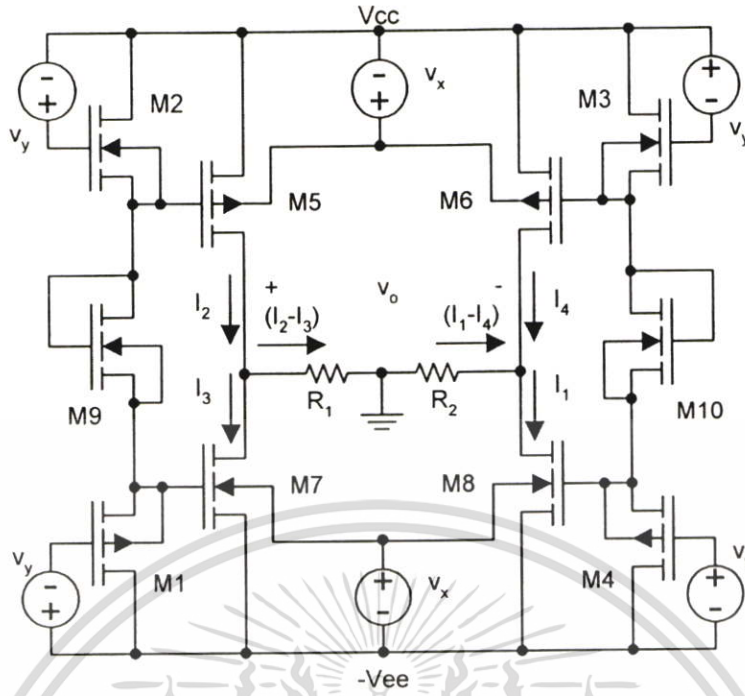
เมื่อ

$$\begin{aligned} D &= \left(\frac{V_{GS} - V_{TO} + \gamma\sqrt{2\phi_F}}{\gamma} \right) \\ C &= 2\phi_F \\ x &= v_{bs} \\ y &= \left(\frac{v_{gs}}{\gamma} \right) \end{aligned} \quad (5.13)$$



รูปที่ 5.1 การป้อนสัญญาณอินพุต v_x และ v_y เมื่อ I_d เป็นกระแสเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 วงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี สัญญาณเทียบกราวด์ v_x ป้อนเข้าขาบอดี สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล v_y ป้อนเข้าขาเกต

จากสมการที่ (5.12) จะพบว่า ประกอบด้วยเทอมบวก 2 เทอมคือ $+(+x, +y)$, $+(-x, -y)$ และเทอมลบอีก 2 เทอมคือ $-(+x, -y)$, $-(-x, +y)$

เทอม $+(+x, +y)$ ทำให้เกิด I_1 เทอมแรก ของสมการที่ (5.12)

$+(-x, -y)$ ทำให้เกิด I_2 เทอมที่สี่ ของสมการที่ (5.12)

$-(+x, -y)$ ทำให้เกิด I_3 เทอมที่สอง ของสมการที่ (5.12)

$-(-x, +y)$ ทำให้เกิด I_4 เทอมที่สาม ของสมการที่ (5.12)

ดังนั้นจากรูปที่ 5.2 และสมการ (5.12)จะได้ว่า

$$\text{จัดรูปใหม่} \quad (I_1 - I_3) + (I_2 - I_4) = (I_2 - I_3) + (I_1 - I_4) \quad (5.14)$$

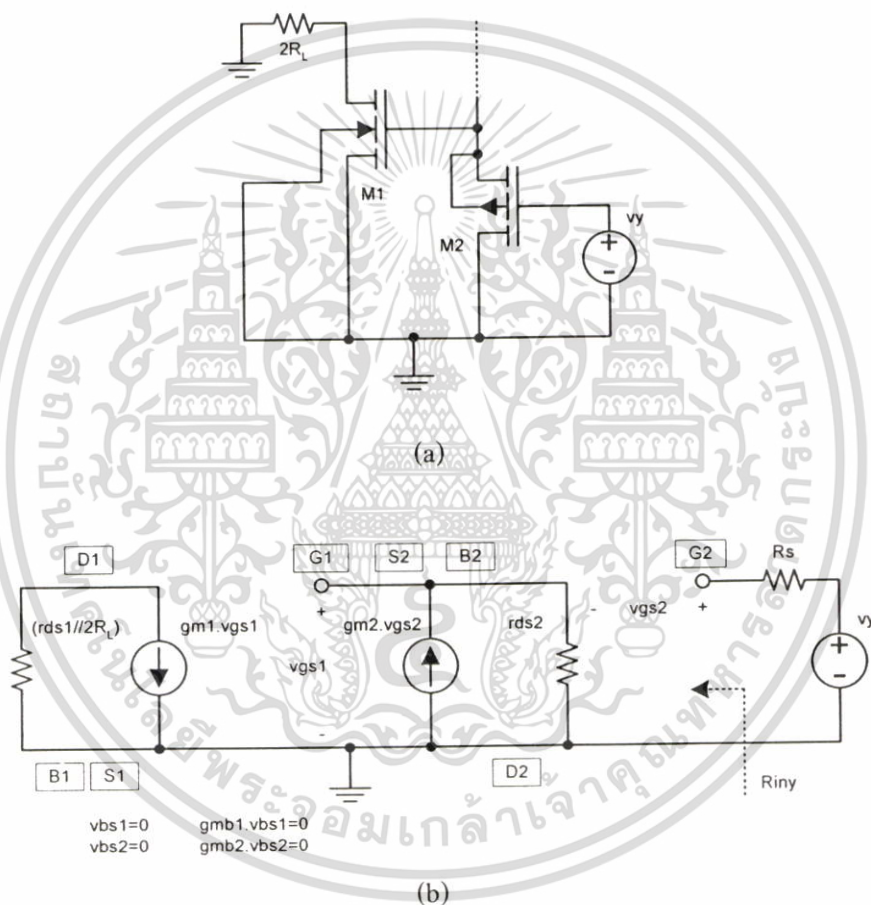
$$\text{ดังนั้น} \quad v_o = R((I_2 - I_3) + (I_1 - I_4)) = \left(\frac{2RK\gamma}{\sqrt{2}\phi_t} \right) v_{bx} v_{gs} \quad (5.15)$$

เนื่องจาก PMOS จะทำงานที่ระดับแรงดัน กลับกันกับ NMOS ดังนั้นการป้อน $+x$ ให้ PMOS จะเท่ากับป้อน $-x$ ให้ NMOS และการป้อน $\pm y$ ให้ PMOS จะเท่ากับป้อน $\mp y$ ให้ NMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของวงจรคุณสมบัติสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี ตามรูปที่ 5.2 สามารถดัดนำมาพิจารณาหาความต้านทานอินพุต เพียง 1 ใน 4 ส่วน ได้ตามรูปที่ 5.3 ทั้งนี้จะทำการพิจารณาความต้านทานอินพุตทั้งที่มองจากขาบอดี และที่มองเข้ามาจากขาเกต

ความต้านทานอินพุตที่มองจากขาบอดี แสดงตามรูปที่ 5.4(a) โดยในขณะที่คำนวณหาจะสมมุติให้สัญญาณอินพุตที่ขาเกตมีค่าเท่ากับศูนย์ วงจรสมมูลที่ได้แสดงตามรูปที่ 5.4(b) จะพบว่า สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก ความต้านทานอินพุตที่มองจากขาบอดี มีค่าสูงเป็นอนันต์

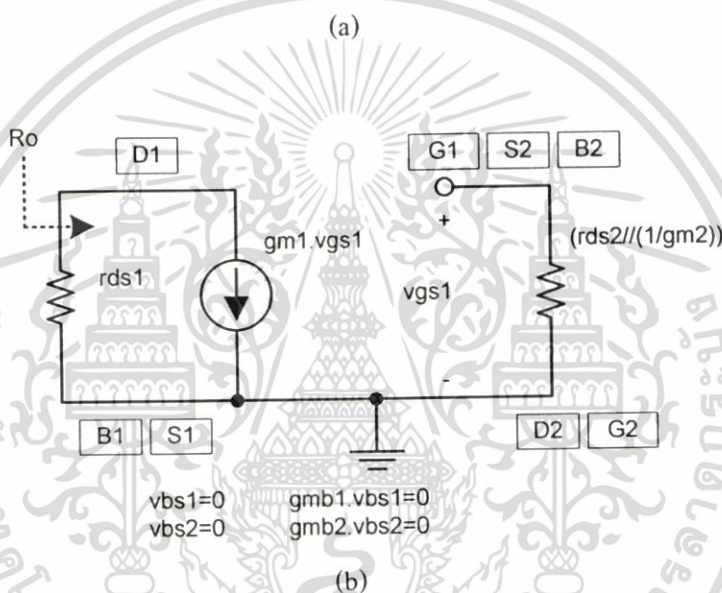
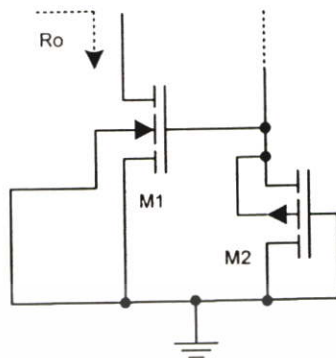


รูปที่ 5.5 วงจรที่ใช้หาค่าความต้านทานอินพุตที่ขาเกต

สำหรับความต้านทานอินพุตที่มองจากขาเกต แสดงตามรูปที่ 5.5(a) โดยในขณะที่คำนวณหาจะสมมุติให้สัญญาณอินพุตที่ขาบอดีมีค่าเท่ากับศูนย์ วงจรสมมูลที่ได้แสดงตามรูปที่ 5.5(b) เช่นเดียวกัน จะพบว่า สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก ความต้านทานอินพุตที่มองจากขาเกต จะมีค่าสูงเป็นอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ความต้านทานเอาต์พุต



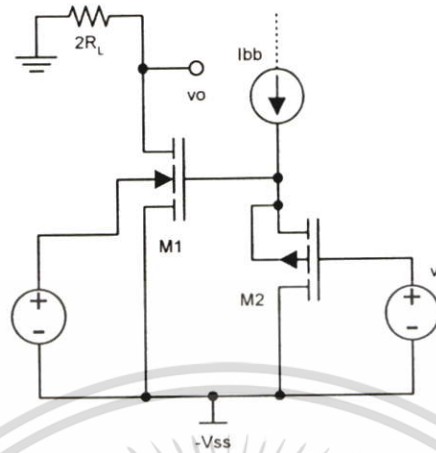
รูปที่ 5.6 วงจรที่ใช้หาค่าความต้านทานเอาต์พุต

จากความสัมพันธ์ของวงจรสัญญาณแวนลาบ 4 ควอดเรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี ตามรูปที่ 5.2 สามารถดัดนำมาพิจารณาหาความต้านทานเอาต์พุต เพียง 1 ใน 4 ส่วนได้ตามรูปที่ 5.6(a) โดยจากวงจรสมมูลรูปที่ 5.6(b) เมื่อ $v_{gs1} = 0$ ทำให้แหล่งจ่ายกระแส $g_{m1}v_{gs1} = 0$ แสดงให้เห็นว่า $R_o = r_{ds1}$ ซึ่งเป็นความต้านทานเอาต์พุตเพียงส่วนหนึ่ง ดังนั้นเมื่อรวมผลของความต้านทานเอาต์พุตของวงจรทุกส่วนเข้าด้วยกัน โดยสมมติว่า NMOS ทุกตัวเหมือนกัน และ PMOS ทุกตัวเหมือนกัน แล้วจะได้ว่าความต้านทานเอาต์พุตรวมมีค่าเท่ากับ

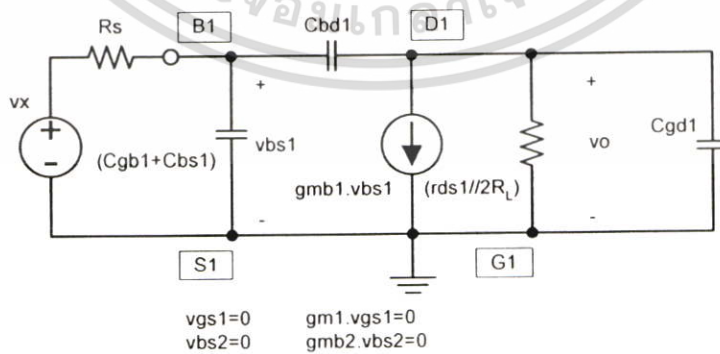
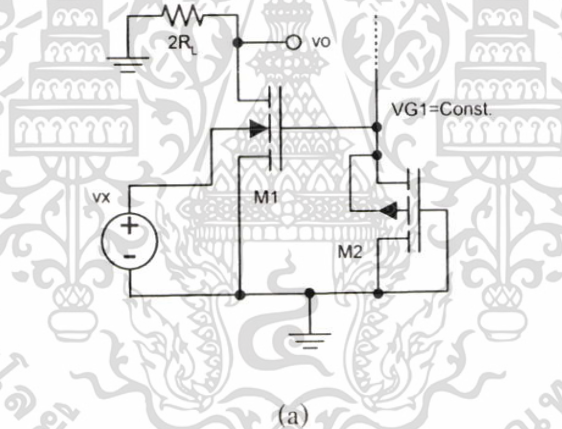
$$R_{out} = ((r_{dsN} \parallel r_{dsP}) + (r_{dsN} \parallel r_{dsP})) = 2(r_{dsN} \parallel r_{dsP}) \tag{5.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่



รูปที่ 5.7 วงจรที่ใช้หาผลตอบสนองเชิงความถี่



(b)

รูปที่ 5.8 วงจรที่ใช้หาผลตอบสนองเชิงความถี่ของอินพุตที่ขาบอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

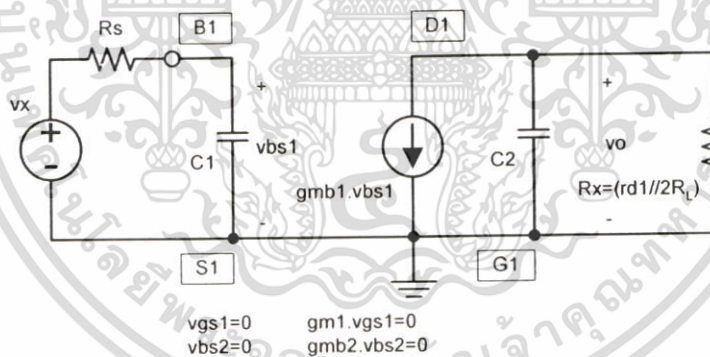
จากความสัมพันธ์ของวงจรคุณสมบัติสัญญาณแวนะลอก 4 กวอดแคเรนท์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี ตามรูปที่ 5.2 สามารถค้นมาพิจารณาหาผลตอบสนองเชิงความถี่ โดยพิจารณาเพียง 1 ใน 4 ส่วนได้ตามรูปที่ 5.7 ทั้งนี้จะทำการพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ ทั้งที่มองจากขาบอดี และที่มองเข้ามาจากขาเกต

วงจรที่ใช้หาผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มองจากขาบอดี แสดงตามรูปที่ 5.8(a) โดยในขณะคำนวณหาจะสมมุติให้สัญญาณอินพุตที่ขาเกตมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้แรงดันที่ขาเกตมีค่าคงที่ วงจรสมมูลที่ได้แสดงตามรูปที่ 5.8(b) จะพบว่าเมื่อใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์ช่วย จะสามารถจัดรูปวงจรได้ใหม่ตามรูปที่ 5.9 โดย

$$C_1 \cong [C_{gb1} + C_{bs1} + (1 + g_{mb1}R_X)C_{bd1}] \quad (5.17)$$

$$C_2 \cong \left[C_{gd1} + \left(1 + \frac{1}{g_{mb1}R_X} \right) C_{bd1} \right] \quad (5.18)$$

$$R_X = (r_{ds1} // 2R_L) \quad (5.19)$$



รูปที่ 5.9 วงจรสมมูลหลังจากใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์จัดรูปวงจร

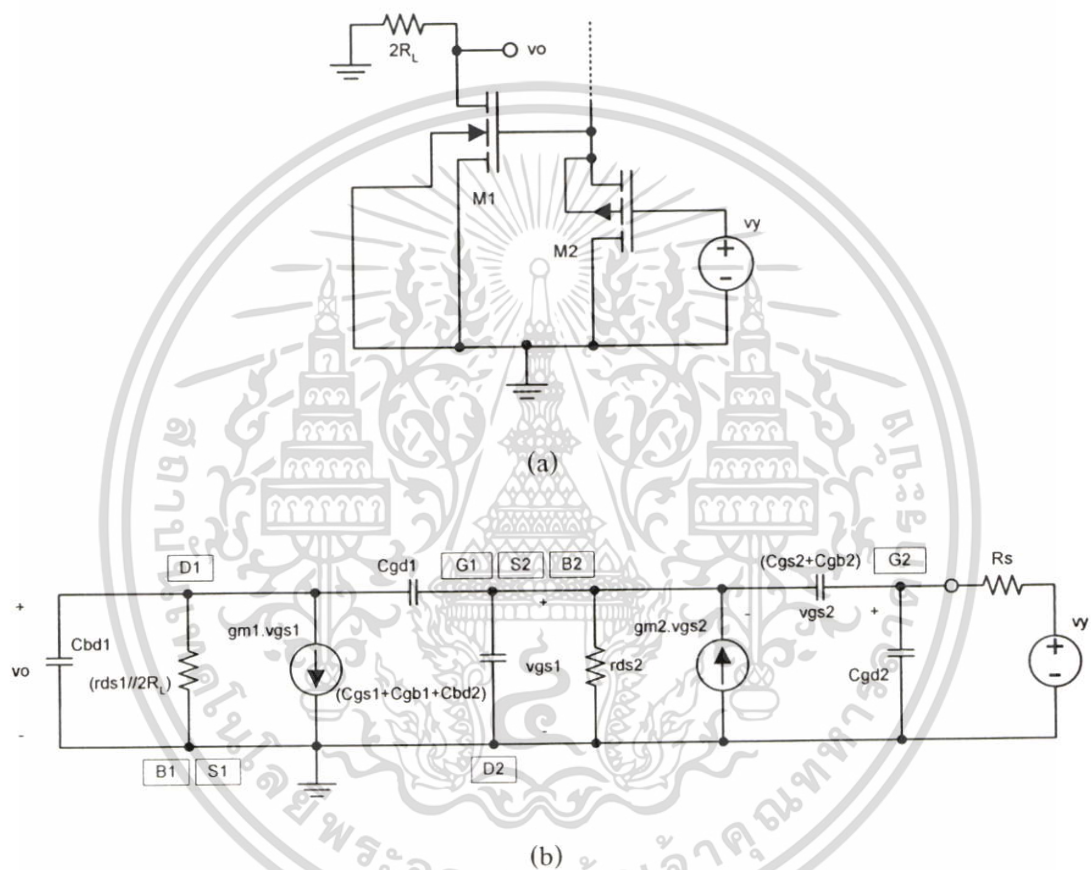
จากทฤษฎีค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจร (Open-circuit time constant)

$$f_c \cong \frac{1}{2\pi \left[\sum_i C_i R_{in} \right]} \quad (5.20)$$

สามารถประมาณหาค่าความถี่ตัดต่อพ้องของวงจรคุณสมบัติสัญญาณที่มองจากขาบอดี ได้ว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{c,BODY} \cong \left(\frac{1}{2\pi [C_1 R_s + C_2 R_X]} \right) \quad (5.21)$$

สำหรับวงจรที่ใช้หาผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มองจากขาเกต แสดงตามรูปที่ 5.10(a) โดยในขณะคำนวณหาจะสมมติให้สัญญาณอินพุตที่ขาบอดีมีค่าเท่ากับศูนย์ วงจรสมมูลที่ได้แสดงตามรูปที่ 5.10(b)



รูปที่ 5.10 วงจรที่ใช้หาผลตอบสนองเชิงความถี่ของอินพุตที่ขาเกต

จะพบว่าเมื่อใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์ช่วย จะสามารถจัดรูปวงจรได้ใหม่ตามรูปที่ 5.11 โดย

$$R_X = (r_{ds1} // 2R_L) \quad (5.22)$$

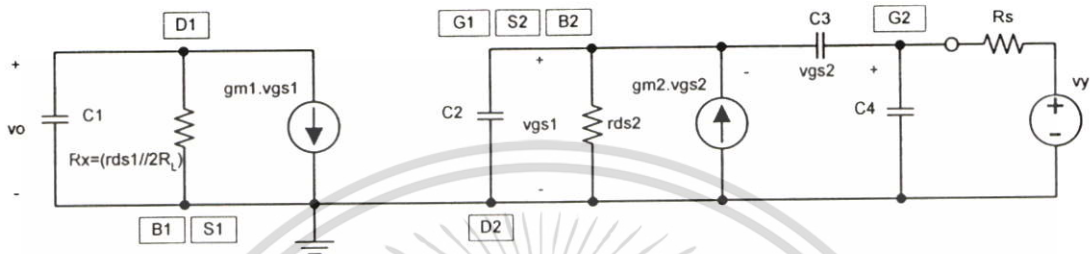
$$C_1 \cong \left[C_{bd1} + \left(1 + \frac{1}{g_{m1} R_X} \right) C_{gd1} \right] \quad (5.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_2 \cong [C_{gs1} + C_{gb1} + C_{bd2} + (1 + g_{m1}R_X)C_{gd1}] \quad (5.24)$$

$$C_3 = (C_{gs2} + C_{gb2}) \quad (5.25)$$

$$C_4 = C_{gd2} \quad (5.26)$$



รูปที่ 5.11 วงจรสมมูลหลังจากใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์ลดรูปวงจร

จากทฤษฎีค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจร (Open-circuit time constant)

$$f_c \cong \frac{1}{2\pi \left[\sum_i \tau_{iw} \right]} \quad (5.27)$$

เมื่อ

$$\tau_1 = C_1 R_X \quad (5.28)$$

$$\tau_2 = C_2 r_{ds2} \quad (5.29)$$

$$\tau_3 = C_3 \left(\frac{R_s + r_{ds2}}{1 + g_{m2} r_{ds2}} \right) \quad (5.30)$$

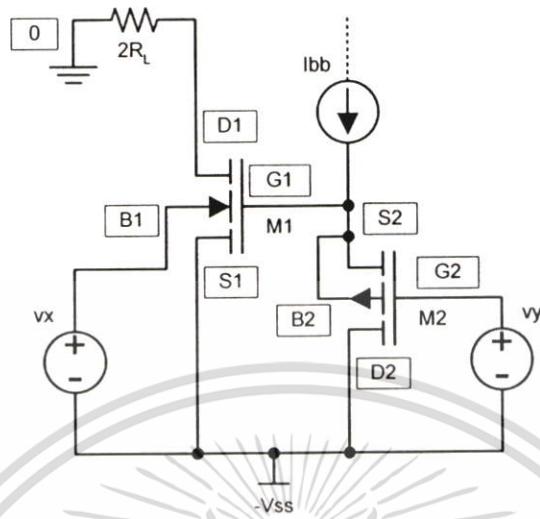
$$\tau_4 = (R_s // r_{ds2}) \quad (5.31)$$

สามารถประมาณหาค่าความถี่ตัดของวงจรคุณสมบัติที่มองจากขาเกต ได้ว่า

$$f_{c,GM1} \cong \left(\frac{1}{2\pi [\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4]} \right) \quad (5.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.5 ช่วงการปฏิบัติงาน



รูปที่ 5.12 วงจรที่ใช้หาช่วงการทำงานของวงจรคูลสัญญาณแอนะล็อก 4 ทรานซิสเตอร์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี

วงจรที่ใช้พิจารณาหาช่วงการทำงานของสัญญาณอินพุต แสดงตามรูปที่ 5.12 โดยจะทำการพิจารณาแยกออกเป็นสองส่วนคือ ช่วงการทำงานของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าที่ขาบอดี และช่วงการทำงานของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าที่ขาเกต

ช่วงการทำงานของอินพุตที่ป้อนเข้าที่ขาบอดี $v_x(\max)$ พิจารณาจากสมการแรงดันขีดเริ่ม

$$V_{th1} = V_{TO1} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_x} - \sqrt{2\phi_F} \right) \quad (5.33)$$

ดังนั้น
$$v_x(\max) = |2\phi_F| \quad (5.34)$$

สำหรับ $v_x(\min)$ พิจารณาจาก v_x ที่ทำให้กระแสเดรนของ M1 มีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_{GS1} - V_{TO1} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - v_x(\min)} - \sqrt{2\phi_F} \right) = 0 \quad (5.35)$$

ดังนั้น
$$v_x(\min) = \left[2\phi_F - \left(\left(\frac{V_{GS1} - V_{TO1}}{\gamma} \right) + \sqrt{2\phi_F} \right)^2 \right] \quad (5.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับช่วงการทำงานของอินพุตที่ป้อนเข้าที่ขาเกต v_y (max) พิจารณาจาก เงื่อนไขที่ทำให้ MOSFET M1 ยังคงต้องทำงานอยู่ในโหมดกระแสอิ่มตัว ดังนั้น $V_{DS1} \geq (V_{GS1} - V_{th1})$ ดังนั้น

$$V_{DS1(\min)} = (V_{GS1} - V_{th1}) \quad (5.35)$$

คิด KVL ตามทางเดิน โหนด 0,D1,S1 ตามรูปที่ 5.12 จะได้ว่า

$$V_{SS} = (V_{RL} - V_{DS1}) \quad (5.36)$$

แทนสมการที่ 5.35 ลงในสมการที่ 5.36 จะได้ว่า

$$V_{GS1} = (V_{SS} - V_{RL} + V_{th1}) \quad (5.37)$$

ต่อมาคิด KVL ตามทางเดิน โหนด G2,S2,S1 ตามรูปที่ 5.12 จะได้ว่า

$$v_y = (V_{GS2} + V_{GS1}) \quad (5.38)$$

เมื่อ

$$V_{GS2} = \left(\sqrt{\frac{2L_2 I_{bb}}{K_2 W_2}} + V_{th2} \right) \quad (5.39)$$

แทนสมการที่ 5.37 และ 5.39 ลงในสมการที่ 5.38 จะได้ว่า

$$v_y(\max) = \left(V_{SS} - V_{RL} + V_{th1} + V_{th2} + \sqrt{\frac{2L_2 I_{bb}}{K_2 W_2}} \right) \quad (5.40)$$

สำหรับการหา v_y (min) พิจารณาจาก เงื่อนไขที่ทำให้ MOSFET M2 ยังคงต้องทำงานอยู่ในโหมดกระแสอิ่มตัว ดังนั้น $V_{DS2} \geq (V_{GS2} - V_{th2})$ ดังนั้น

$$V_{DS2(\min)} = (V_{GS2} - V_{th2}) \quad (5.41)$$

ต่อมาคิด KVL ตามทางเดิน โหนด G2.S2.D2 ตามรูปที่ 5.12 จะได้ว่า

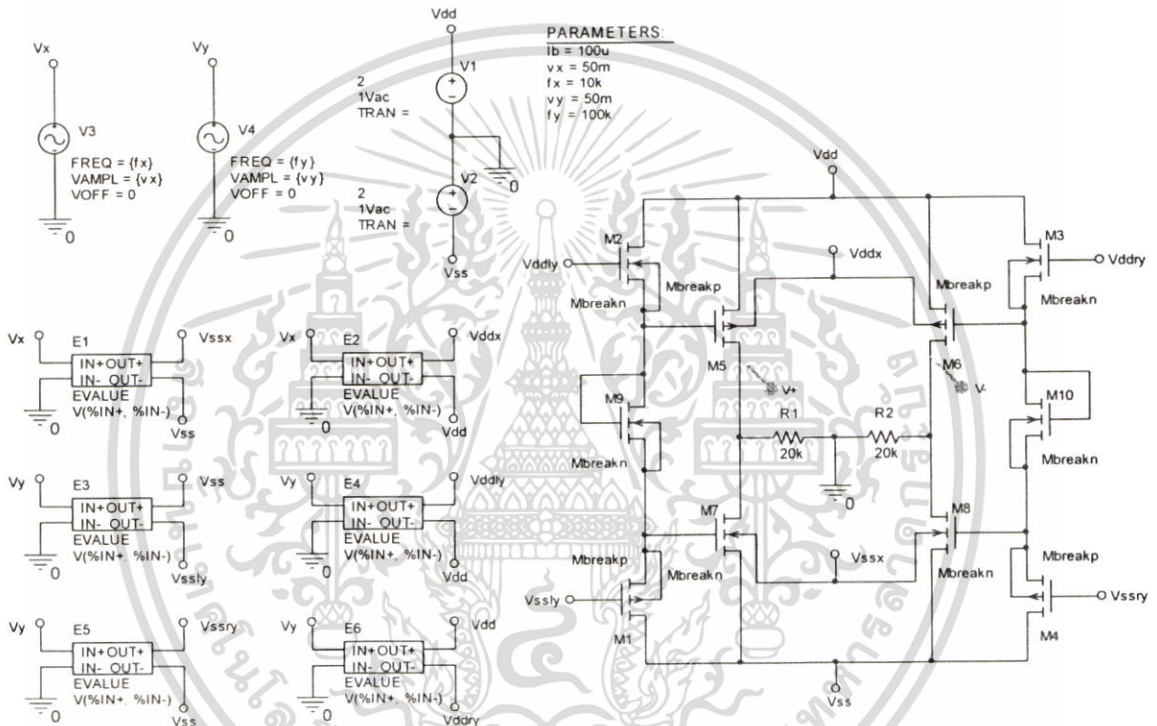
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_y = (V_{GS2} - V_{DS2}) \quad (5.42)$$

แทนสมการที่ 5.41 ลงในสมการที่ 5.42 จะได้ว่า

$$v_y (\text{min}) = V_{th2} \quad (5.43)$$

5.4 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE



รูปที่ 5.13 วงจรคูลงสัญญาณแอนะล็อก 4 ทรานซิสเตอร์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี ที่ใช้จำลองการทำงาน

มอสเฟตที่ใช้จำลองการทำงานตามรูปที่ 5.13 มีพารามิเตอร์ดังนี้

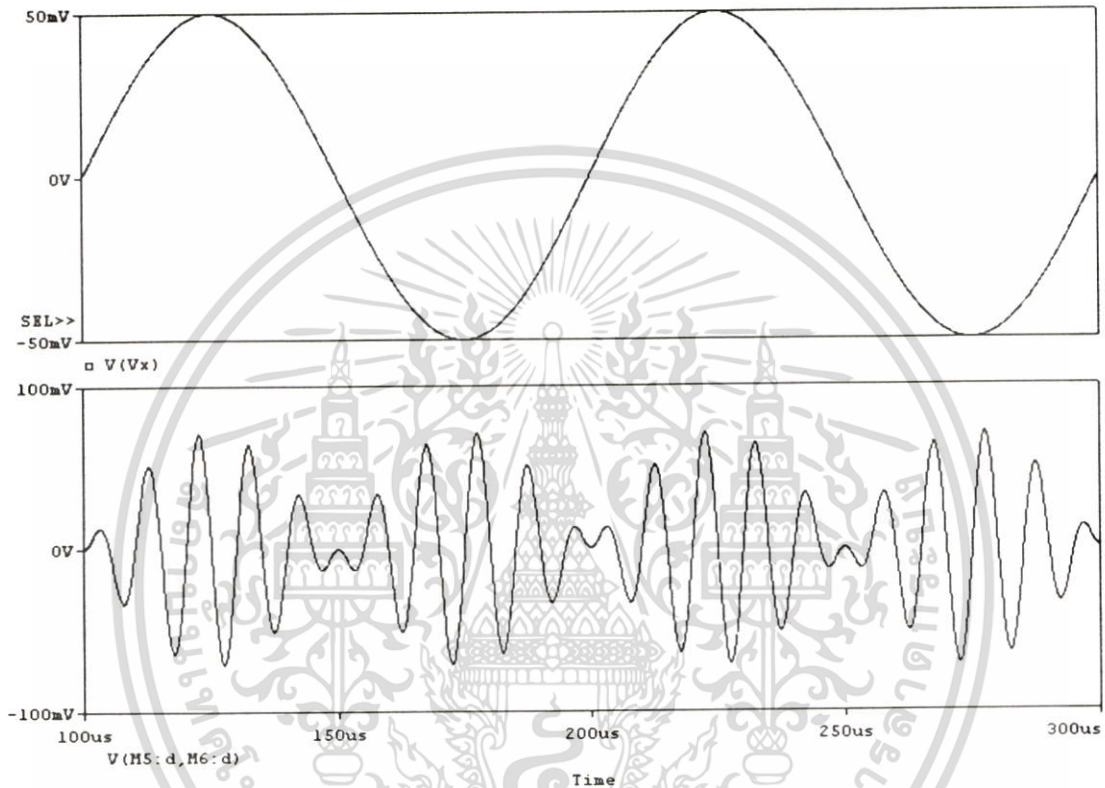
M2,M3,M7,M8,M9,M10 เป็น NMOS มีค่า $W=100u$, $L=1u$, $V_{to}=1$, $\Gamma=0.35$, $\Phi=0.65$, $K_p=50u$, $C_{GSO}=10n$, $C_{GDO}=10n$, $C_{GBO}=10n$, $C_{BD}=1p$, $C_{BS}=1p$, $C_{JSW}=1p$, $MJ=0.5$, $MJSW=0.3$, $FC=0.5$, $PB=0.1$

M1,M4,M5,M6 เป็น PMOS มีค่า $W=100u$, $L=1u$, $V_{to}=(-1)$, $\Gamma=0.35$, $\Phi=0.65$, $K_p=50u$, $C_{GSO}=10n$, $C_{GDO}=10n$, $C_{GBO}=10n$, $C_{BD}=1p$, $C_{BS}=1p$, $C_{JSW}=1p$, $MJ=0.5$, $MJSW=0.3$, $FC=0.5$, $PB=0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

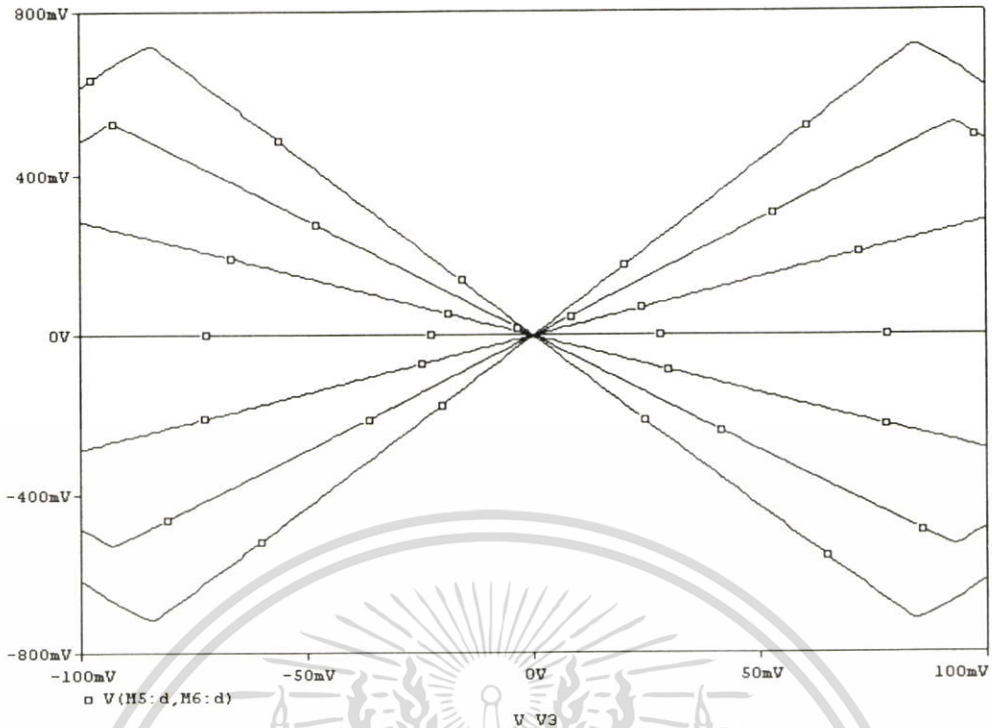
M5,M6,M7,M8 ใช้เป็นแกนของวงจรคูณสัญญาณ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้

M1,M2,M3,M4,M9,M10 เป็นส่วนสร้างแรงดันไบแอส โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ $2\phi_f \gg |v_{bs}|$ ค่าโดยทั่วไป $2\phi_f = 0.65$ ดังนั้น $0.65V \gg |v_x|$ กำหนดให้อินพุตทั้งสองมีค่า $v_x = 100mV$, $freq,x = 10kHz$ และ $v_y = 100mV$, $freq,y = 100kHz$ ผลการจำลองการทำงานตามรูปที่ 5.14 – 5.18

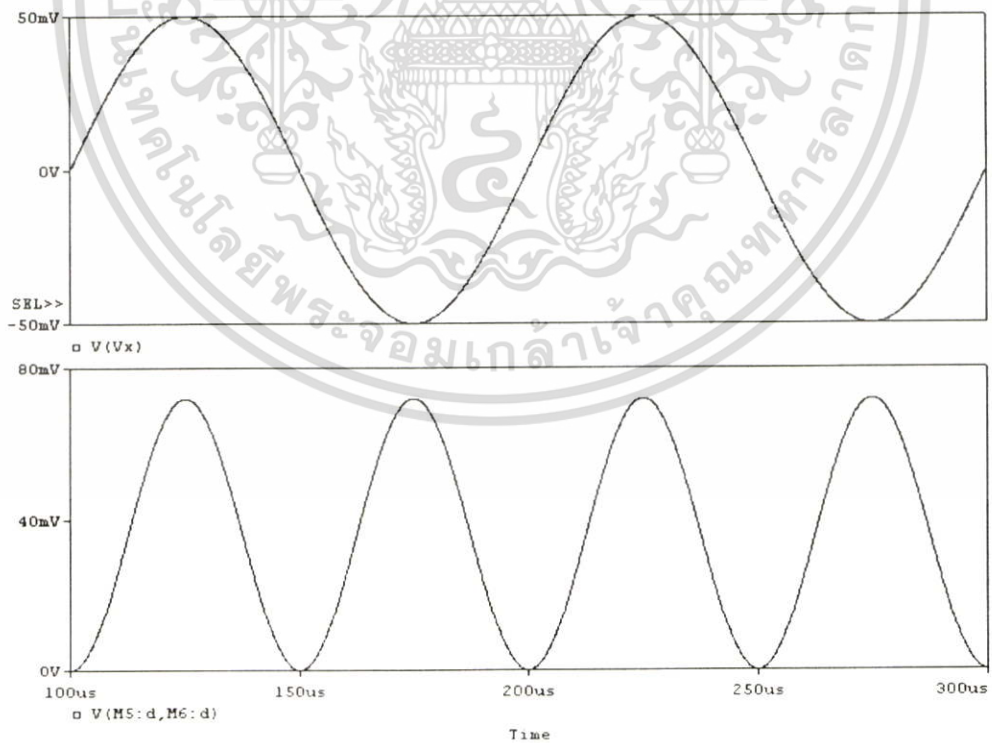


รูปที่ 5.14 ผลการจำลองการทำงานวงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณไซน์สองความถี่ $f_x=10kHz$, $50mV$ และ $f_y=100kHz$, $50mV$

รูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.18 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของผลการจำลองการทำงาน ของวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ ประกอบด้วยผลการคูณของสัญญาณรูปแบบต่าง และคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรคูณสัญญาณ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ และรูปที่ 5.19 แสดงผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้

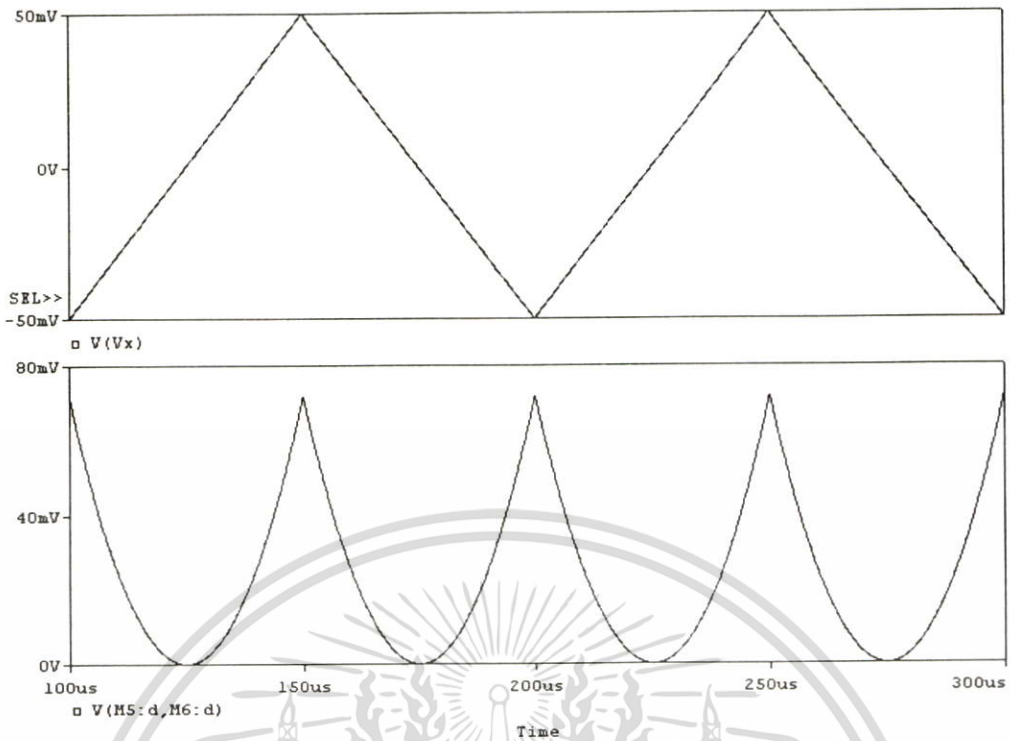


รูปที่ 5.15 ผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงวงจรมัลติพลาย 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้

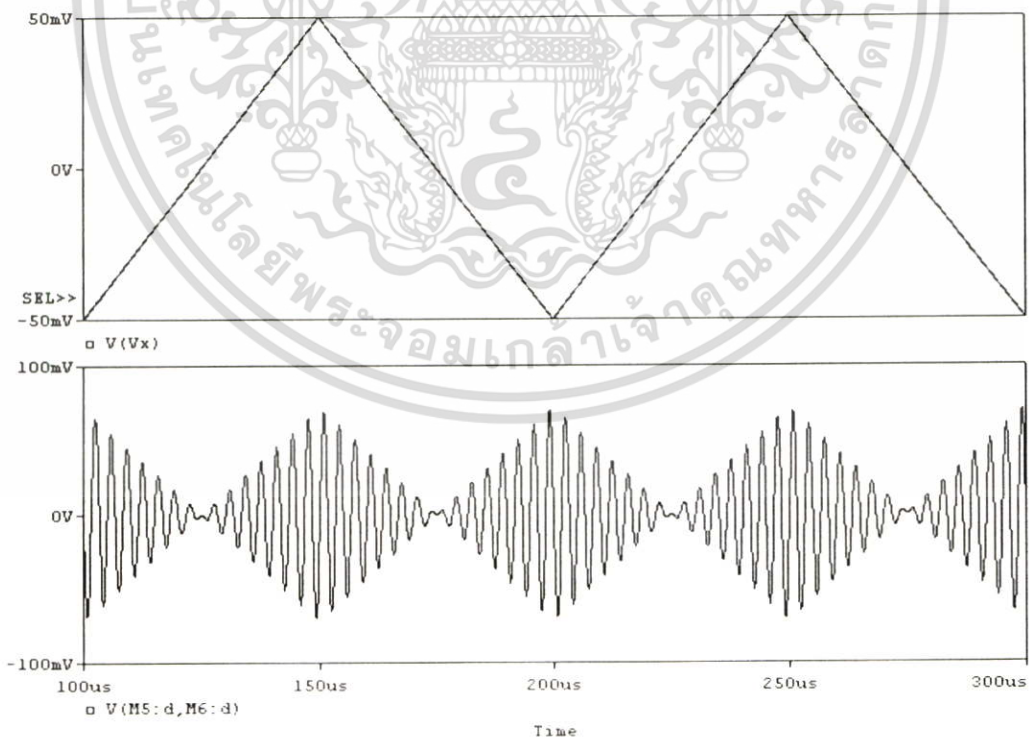


รูปที่ 5.16 ผลการจำลองการทำงานวงจรมัลติพลาย 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและ

ขาบอดี้ เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณไซน์ $f=10\text{kHz}$, 50mV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งมีเพียงการเสนอเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลใหม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

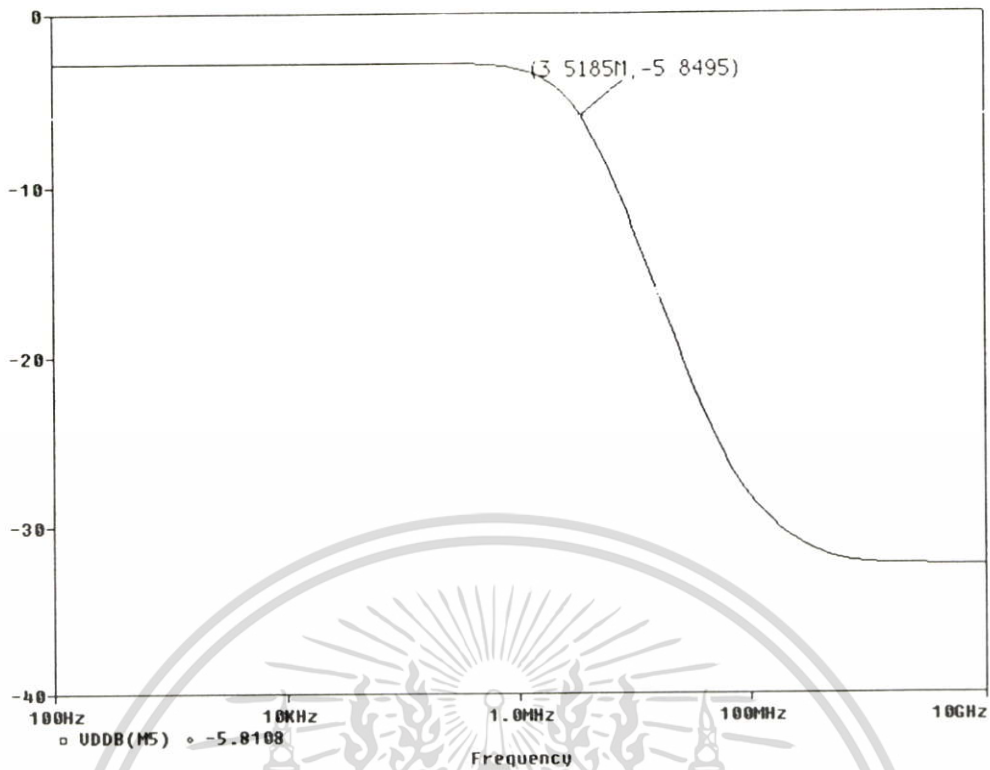


รูปที่ 5.17 ผลการจำลองการทำงานวงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาอินพุต เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$



รูปที่ 5.18 ผลการจำลองการทำงานวงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและ

ขาอินพุต เมื่ออินพุตทั้งสองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม $f=10\text{kHz}$ และสัญญาณซาวท์ $f=300\text{kHz}$ 50mV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอน เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์ของการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดค้านใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ผลการจำลองการทำงาน ของผลตอบสนองเชิงความถี่วงจรมัลติพลาเยอร์แอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี

4.5 บทสรุป

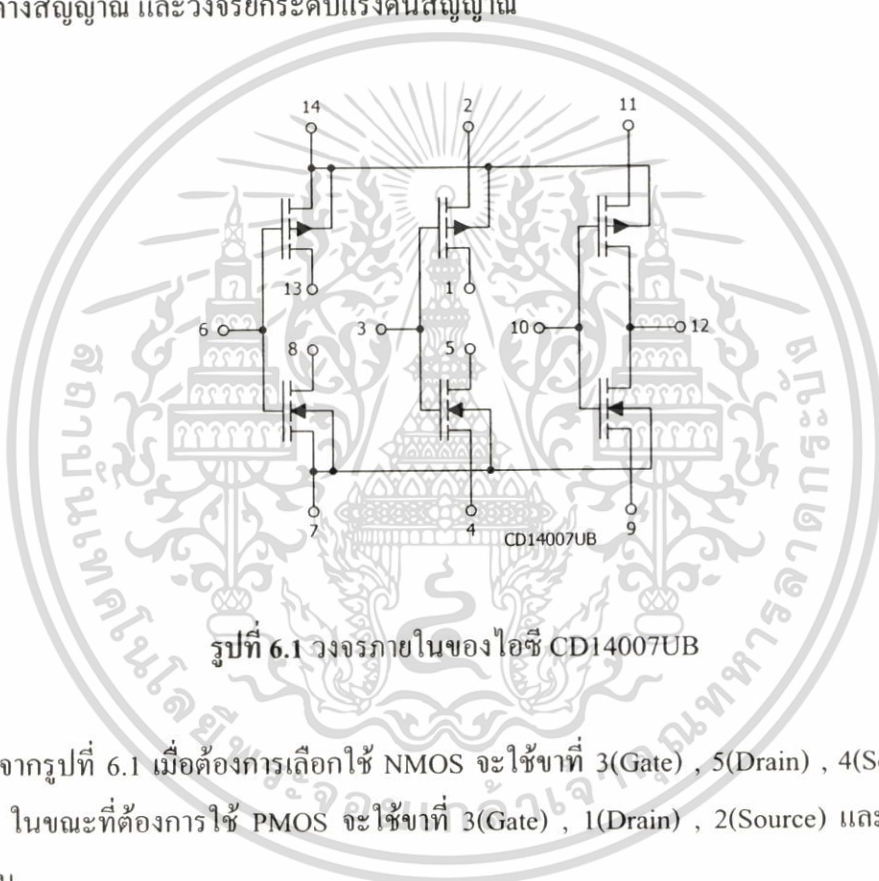
จากวงจรมัลติพลาเยอร์แอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี แสดงให้เห็นว่า สามารถนำขาบอดีร่วมกับขาเกตของมอสเฟต มาใช้สร้างวงจรมัลติพลาเยอร์แอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์แบบใหม่ได้ โดยมีเงื่อนไขสำคัญคือ $2\phi_p \gg v_{th}$ โดยอินพุตมีช่วงการทำงานที่ค่อนข้างแคบ และต้องใช้ไฟเลี้ยงบวก/ลบ อีกทั้งวงจรมัลติพลาเยอร์ยังซับซ้อนกว่าสองวงจรแรก แต่มีชั้นของทรานซิสเตอร์ระหว่างไฟเลี้ยงทั้งสองเพียง 3 ชั้นเท่านั้น ทำให้สามารถทำงานที่ไฟเลี้ยงค่าต่ำได้ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้มอสเฟตทั้งชนิด NMOS และ PMOS ซึ่งจะเกิดผลของการไม่เท่ากันของคุณสมบัติของมอสเฟตทั้งสองชนิด และมีแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าสองวงจรแรก

บทที่ 6

ผลการทดลอง

6.1 บทนำ

การทดลองใช้มอสเฟตภายใน ของไอซีตระกูลซีมอส เบอร์ CD14007UB ซึ่งมีวงจรภายในตามรูปที่ 6.1 โดยเลือกใช้ NMOS หรือ PMOS ภายในเพียงตัวเดียวในแต่ละแพ็คเกจ มาประกอบเป็นวงจรคุณสมบัติแอนะล็อก และใช้ออปแอมป์เบอร์ LF356N นำมาสร้างวงจรผลรวมสัญญาณ วงจรผลต่างสัญญาณ และวงจรยกระดับแรงดันสัญญาณ



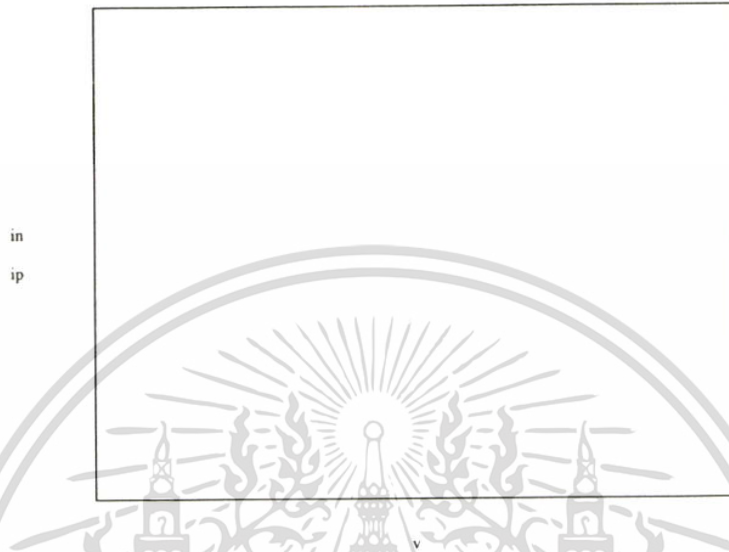
รูปที่ 6.1 วงจรภายในของไอซี CD14007UB

จากรูปที่ 6.1 เมื่อต้องการเลือกใช้ NMOS จะใช้ขาที่ 3(Gate) , 5(Drain) , 4(Source) และ 7(Body) ในขณะที่ต้องการใช้ PMOS จะใช้ขาที่ 3(Gate) , 1(Drain) , 2(Source) และ 14(Body) ตามลำดับ

สำหรับคุณสมบัติของมอสเฟตภายในไอซี CD14007UB นั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต-ซอร์ส และกระแสเดรน ได้ตามรูปที่ 6.2 โดยจะพบว่าคุณสมบัติของ NMOS และ PMOS นั้น ไม่เหมือนกันทุกประการ ทำให้พารามิเตอร์ต่างๆ ของมอสเฟตทั้งสองต่างกันด้วย ซึ่งย่อมส่งผล ถึงการทดลองต่อวงจรคุณสมบัติแอนะล็อกทั้งสามแบบ โดยในวงจรคุณสมบัติ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง เนื่องจากใช้เฉพาะ NMOS เท่านั้น ทำให้ไม่เกิดผลของความไม่เหมือนกันทุกประการของมอสเฟตทั้งสอง ในขณะที่วงจรคุณสมบัติแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรถักกำลังสองซีกบนเป็นแบบ PMOS ในขณะที่วงจรถัก

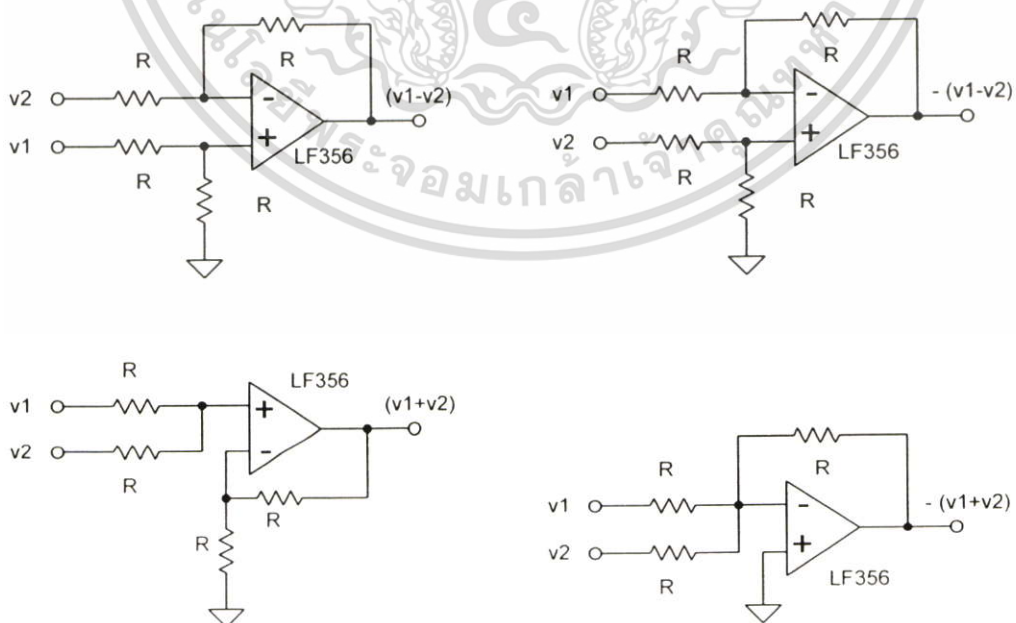
กำลังสองซีกล่างเป็นแบบ NMOS ซึ่งผลแห่งความไม่เท่ากันนี้แสดงออกมาที่รูปร่างสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุตมากกว่า และวงจรคุณสมบัติสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี ที่ประกอบด้วยมอสเฟตทั้งแบบ PMOS และแบบ NMOS ผสมรวมกัน ซึ่งผลความไม่เท่ากันนี้ ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณเอาต์พุต



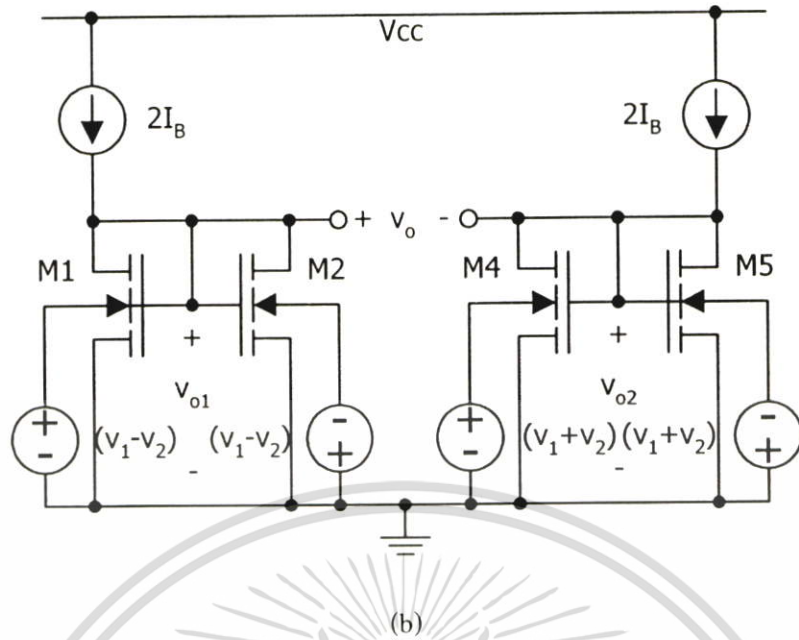
รูปที่ 6.2 กราฟคุณสมบัติ I_{ds} ของ MOS ในไอซี CD14007UB ที่ $V_{ds} = 12V$

6.2 ผลการทดลองวงจรคุณสมบัติสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง

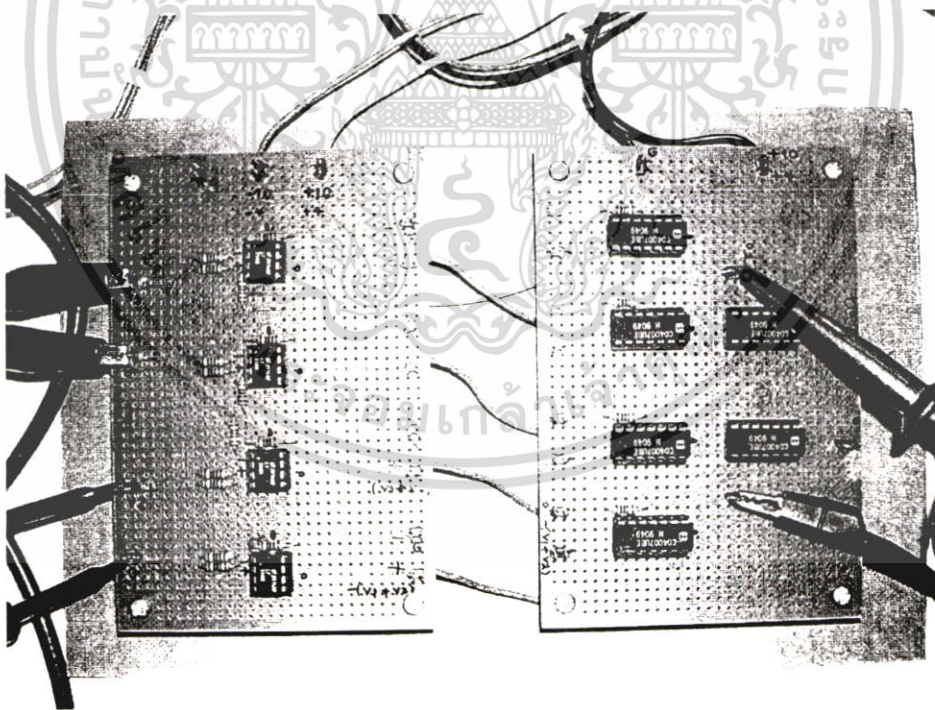


(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 วงจรสร้างสัญญาณผลรวม และสัญญาณผลต่าง สำหรับวงจรคูณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง และวงจรคูณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง



รูปที่ 6.4 วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ประกอบเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

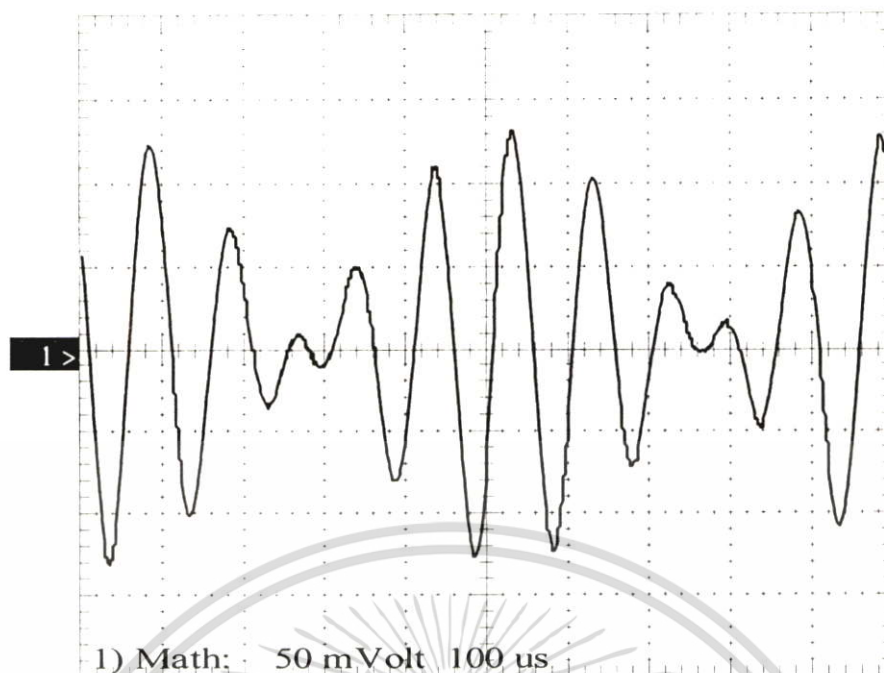


รูปที่ 6.5 การต่อทดลองวงจรวงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง

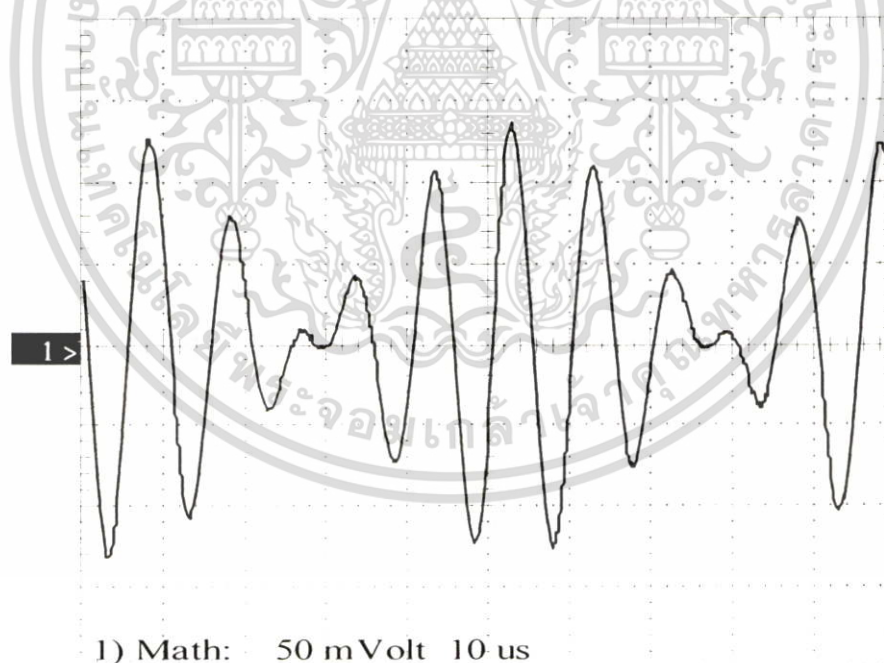
การทดลองใช้ NMOS ภายใน ของไอซีตระกูลซีมอส เบอร์ CD4007UB จำนวน 6 ตัว ซึ่งมีวงจรภายในตามรูปที่ 6.1 มาประกอบเป็น วงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่างตามรูปที่ 6.3 โดยทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์และกราวด์ และใช้ออปแอมป์เบอร์ LF356N จำนวน 4 ตัว นำมาสร้างวงจรรวมสัญญาณ และวงจรถ่วงสัญญาณ ทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงบวก/ลบ 5 โวลต์ สำหรับเป็นอินพุตให้วงจรวงจรคณีสัญญาณ วงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ประกอบเสร็จแสดงตามรูปที่ 6.4 และ 6.5

ผลการทดลองของวงจรวงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง แสดงตามรูปที่ 6.6 ถึง รูปที่ 6.8 โดยรูปที่ 6.6 แสดงผลการคณีสัญญาณชายัน้ความถี่ 1kHz ,250mVp และสัญญาณชายัน้ความถี่ 10kHz , 250mVp , รูปที่ 6.7 แสดงผลการคณีสัญญาณชายัน้ความถี่ 10kHz ,250mVp และสัญญาณชายัน้ความถี่ 100kHz , 250mVp และรูปที่ 6.8 แสดงผลการคณีสัญญาณชายัน้ความถี่ 100kHz ,250mVp และสัญญาณชายัน้ความถี่ 1MHz , 250mVp

จะพบว่า แม้จะไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ภายในของมอสเฟตได้ แต่จากการทดลองก็ ได้แสดงให้เห็น วงจรคณีสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง นั้น สามารถทำการคณีสัญญาณชายัน้ 2 ความถี่ ได้เป็นอย่างดี โดยมีความสมมาตรของสัญญาณทั้งซีกบวก และซีกลบ

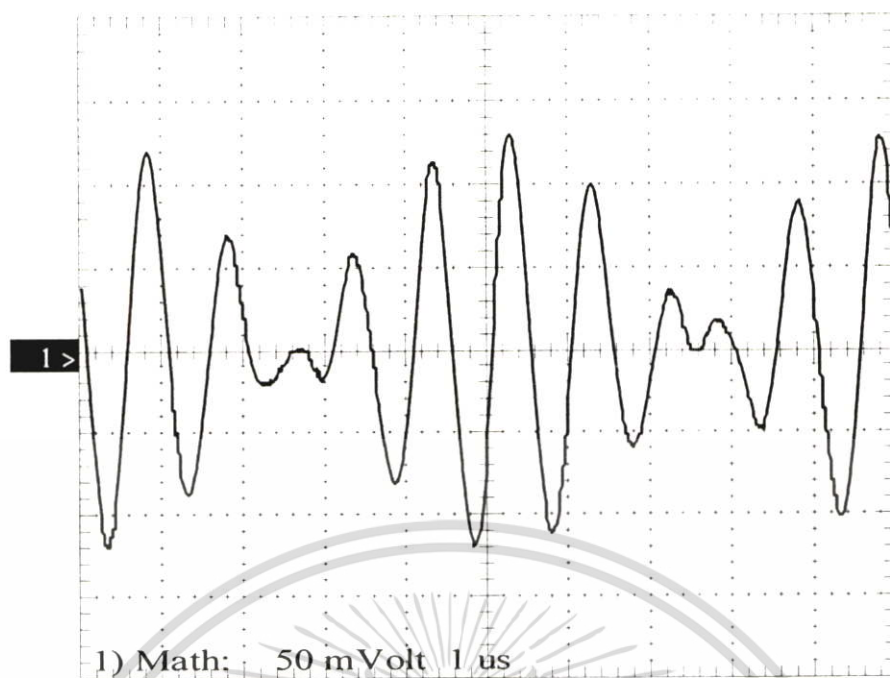


รูปที่ 6.6 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคุณสมบัติแวนเดอกรอ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ได้จากการคูณสัญญาณไซน์ความถี่ 1kHz ,250mVp และสัญญาณไซน์ความถี่ 10kHz ,250mVp



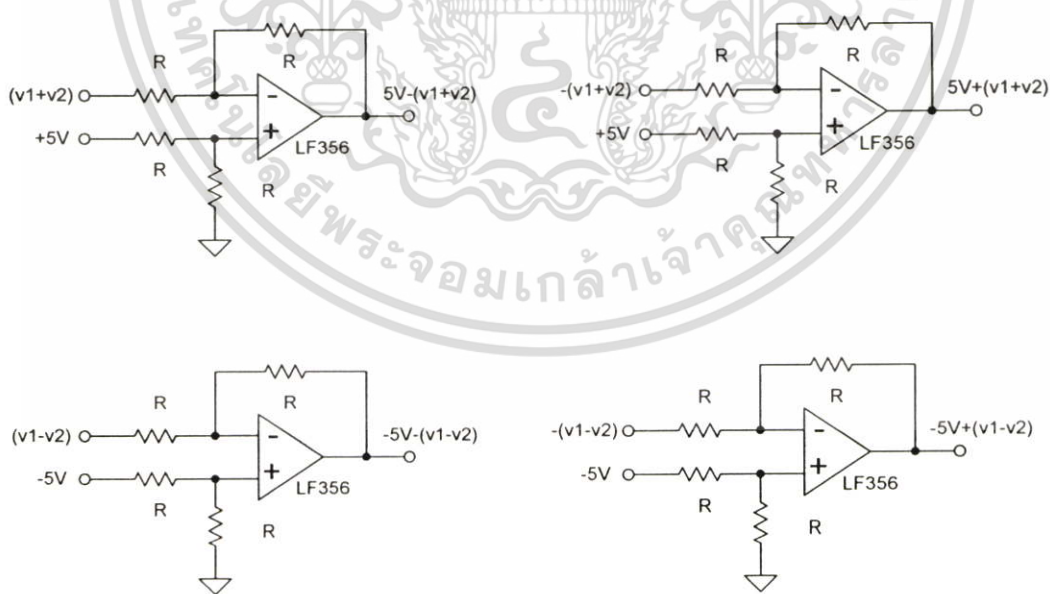
รูปที่ 6.7 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคุณสมบัติแวนเดอกรอ มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ได้จากการคูณสัญญาณไซน์ความถี่ 10kHz ,250mVp และสัญญาณไซน์ความถี่ 100kHz ,250mVp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



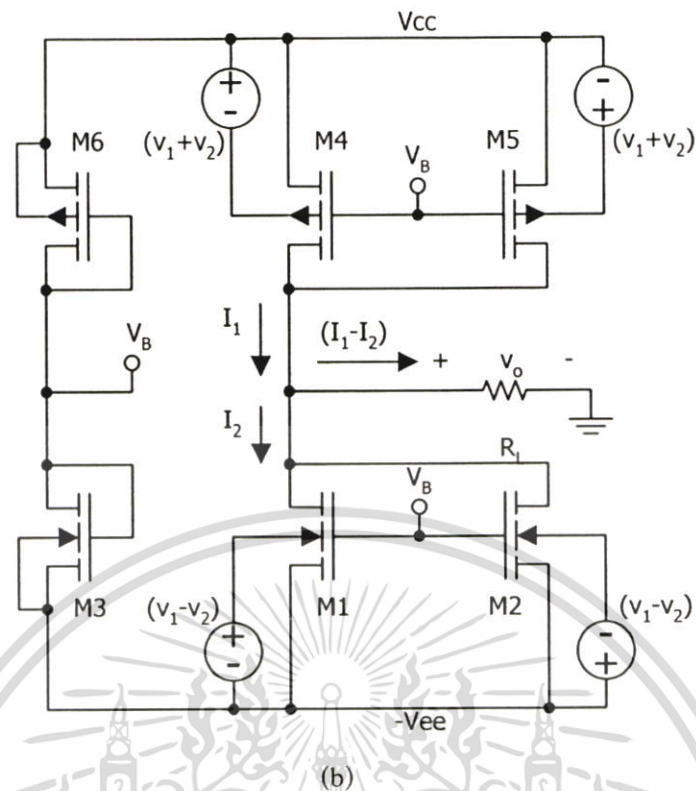
รูปที่ 6.8 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง ที่ได้จากการคูณสัญญาณไซน์ความถี่ 100kHz ,250mVp และสัญญาณไซน์ความถี่ 1MHz ,250mVp

6.3 ผลการทดลองวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

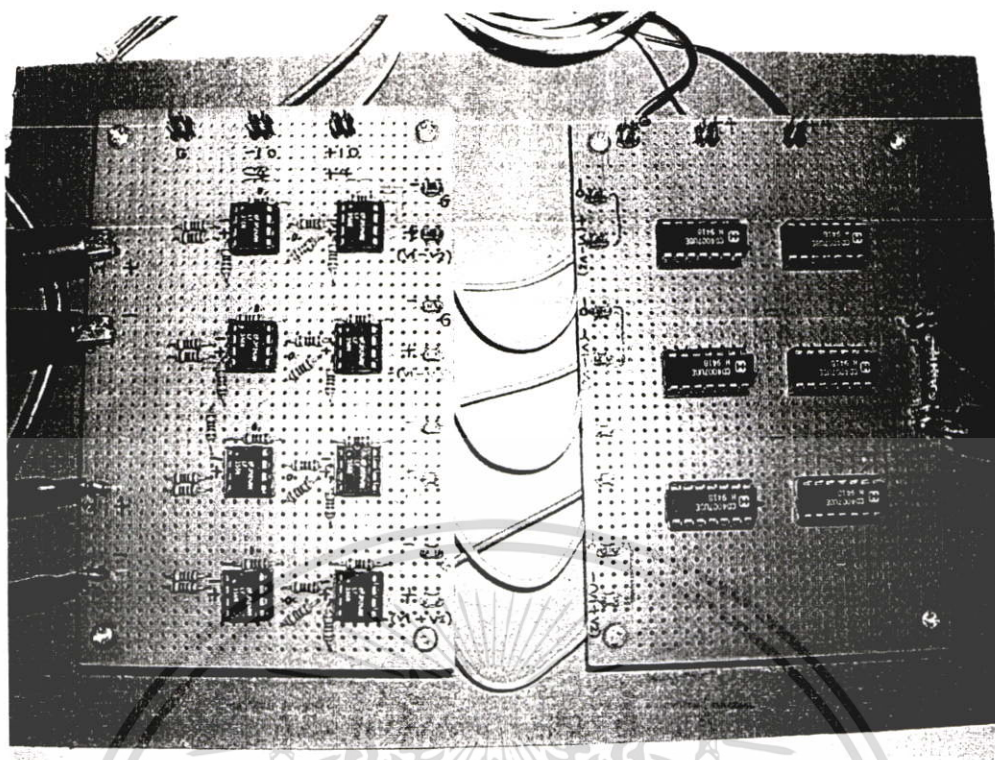


รูปที่ 6.9 วงจรยกแรงดันสัญญาณผลรวม และสัญญาณผลต่าง สำหรับวงจรคูณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ และวงจรคูณสัญญาณ มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์

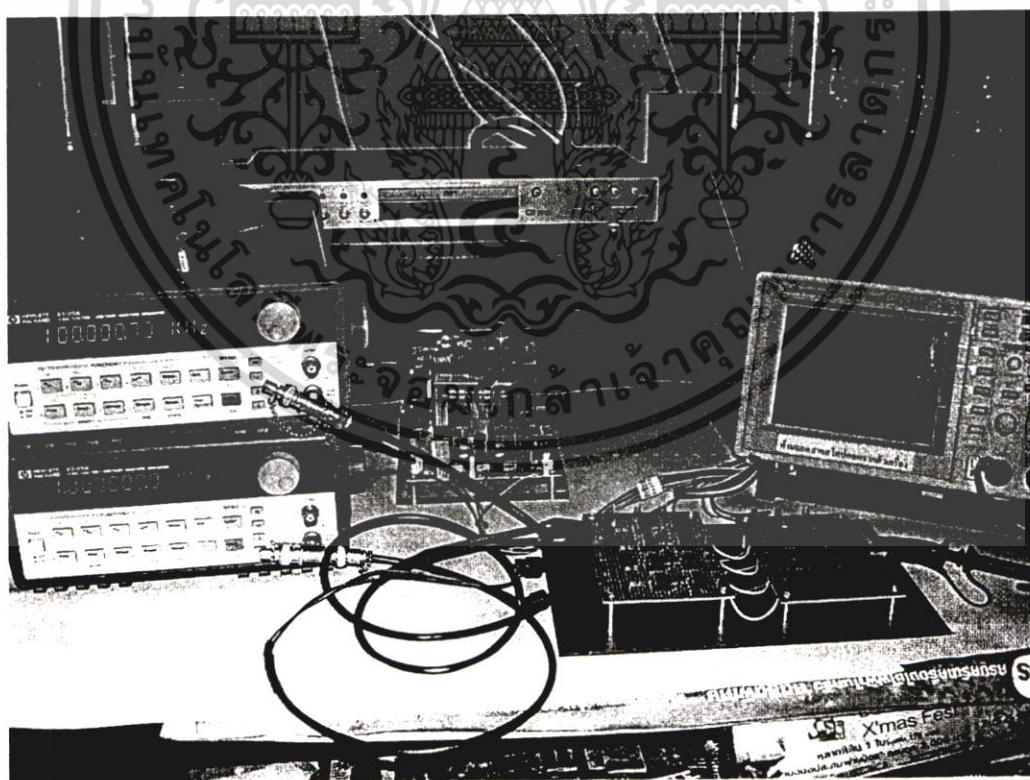
การทดลองใช้ NMOS ภายใน ของไอซีตระกูลซีมอส เบอร์ CD14007UB จำนวน 3 ตัว สร้างวงจรกำลังสองซีกล่าง และใช้ PMOS ภายใน ของไอซีตระกูลซีมอส เบอร์ CD14007UB จำนวน 3 ตัว สร้างวงจรกำลังสองซีกบน ซึ่งมีวงจรภายในตามรูปที่ 6.1 มาประกอบเป็นวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ตามรูปที่ 6.9 โดยทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงบวก/ลบ 5 โวลต์ และใช้ช้อปแอมป์เบอร์ LF356N จำนวนอีก 4 ตัว นำมาสร้างวงจรยกระดับแรงดันผลรวมสัญญาณ และวงจรยกระดับแรงดันผลต่างสัญญาณ ทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงบวก/ลบ 5 โวลต์ ตามรูปที่ 6.9 สำหรับเป็นอินพุตให้วงจรคูณสัญญาณ วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อกมีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ที่ประกอบเสร็จแสดงตามรูปที่ 6.10 และ 6.11

ผลการทดลองของวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ แสดงตามรูปที่ 6.12 ถึง รูปที่ 6.14 โดยรูปที่ 6.12 แสดงผลการคูณสัญญาณชายน์ความถี่ 1kHz ,250mVp และสัญญาณชายน์ความถี่ 10kHz , 250mVp , รูปที่ 6.13 แสดงผลการคูณสัญญาณชายน์ความถี่ 10kHz ,250mVp และสัญญาณชายน์ความถี่ 100kHz , 250mVp และรูปที่ 6.14 แสดงผลการคูณสัญญาณชายน์ความถี่ 100kHz ,250mVp และสัญญาณชายน์ความถี่ 1MHz , 250mVp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

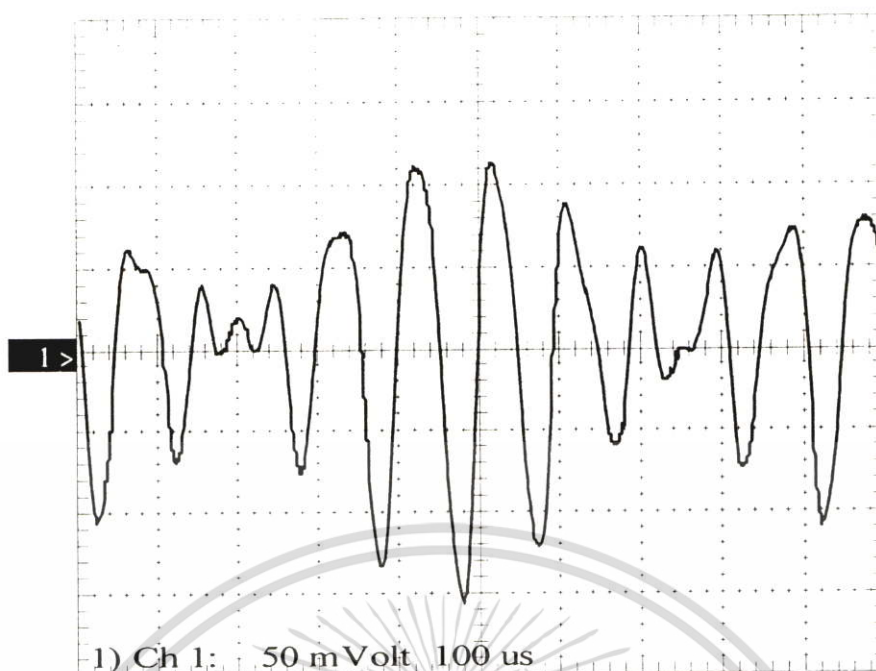


รูปที่ 6.10 วงจรคุณสมบัติแอมพลิจูดมีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ที่ประกอบเสร็จ

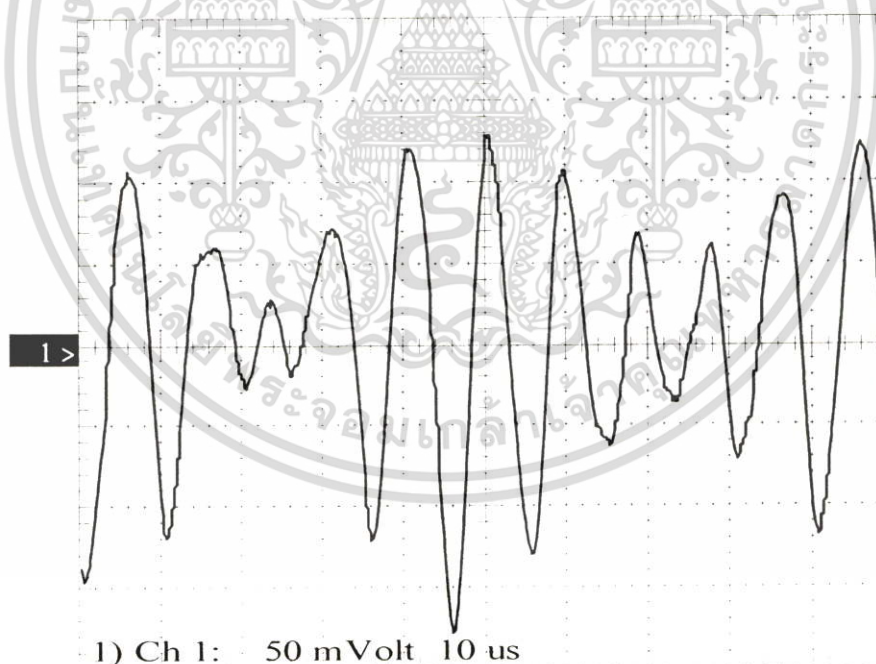


รูปที่ 6.11 การต่อทดลองวงจรคุณสมบัติแอมพลิจูด มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

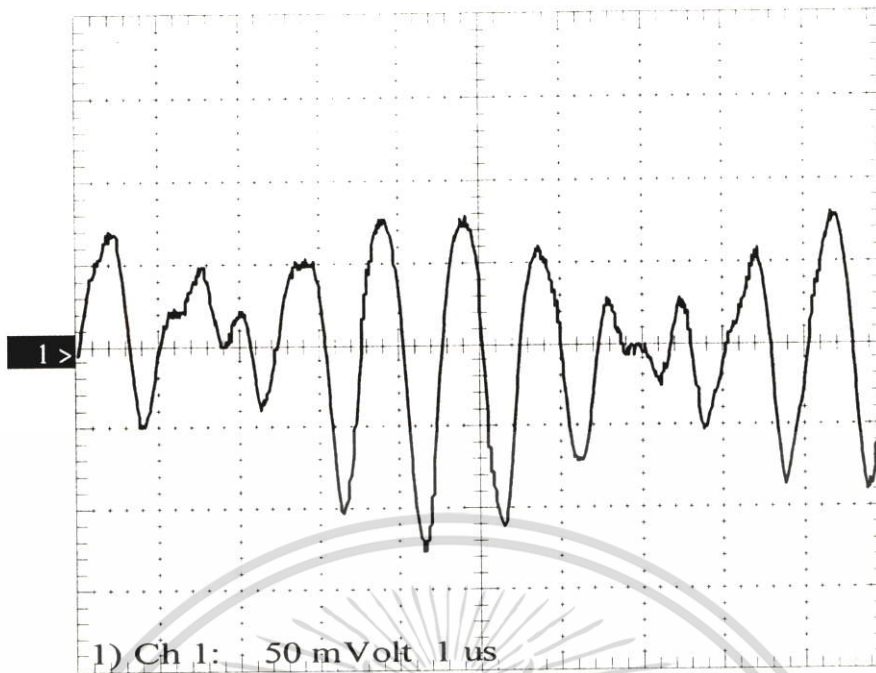


รูปที่ 6.12 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคุณสมบัติสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ที่ได้จากการคูณสัญญาณไซน์ความถี่ 1kHz ,250mVp และสัญญาณไซน์ความถี่ 10kHz ,250mVp



รูปที่ 6.13 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคุณสมบัติสัญญาณแอนะล็อกมีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ที่ได้จากการคูณสัญญาณไซน์ความถี่ 10kHz ,250mVp และสัญญาณไซน์ความถี่ 100kHz ,250mVp

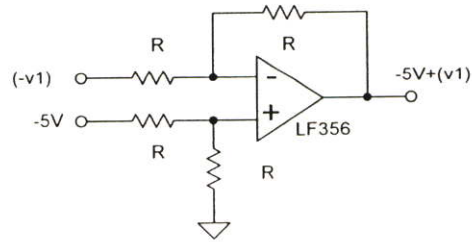
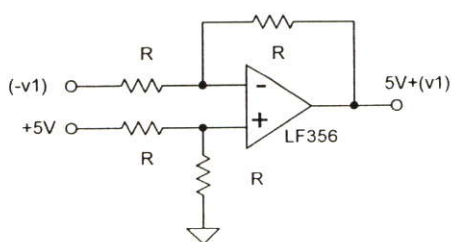
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



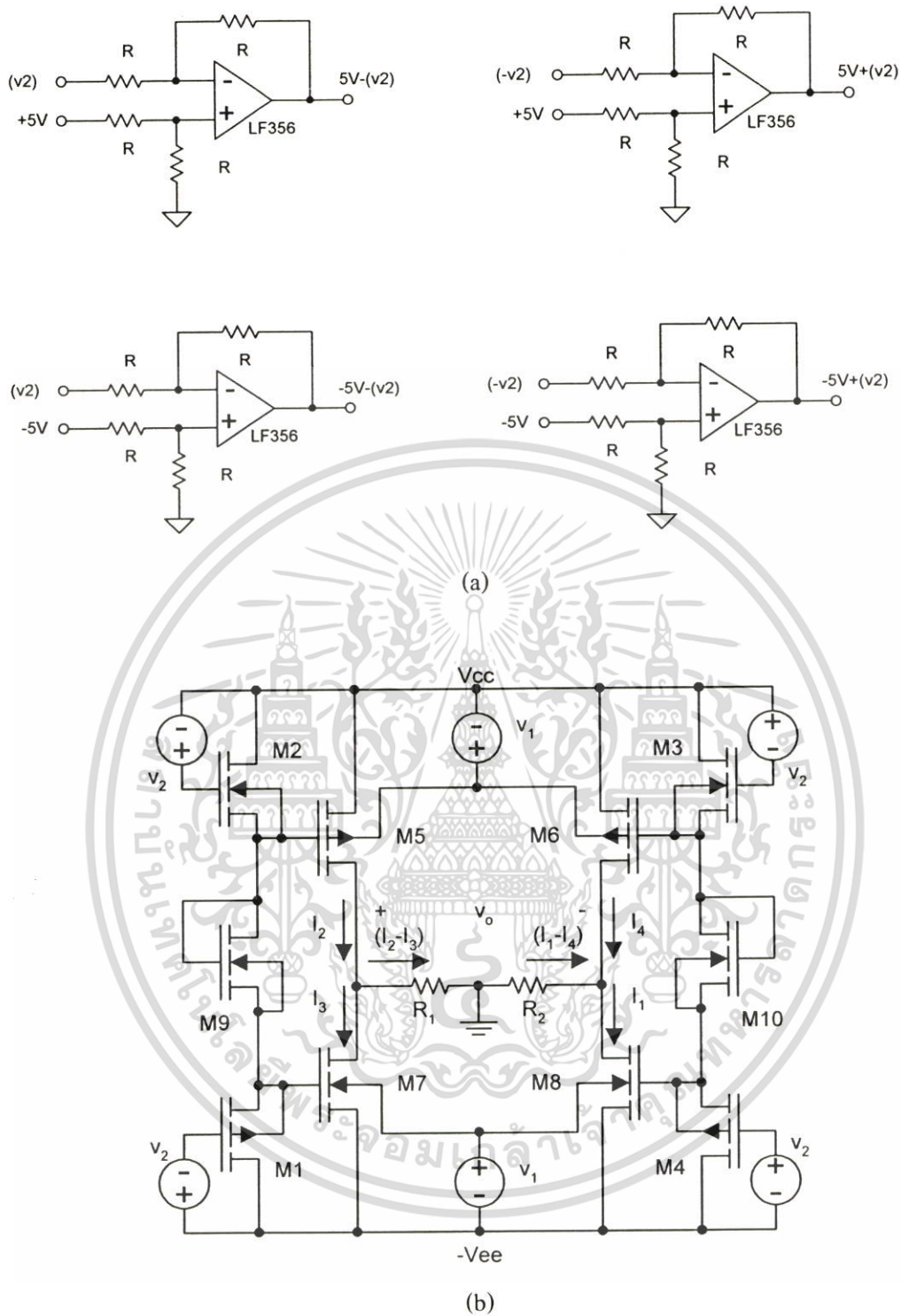
รูปที่ 6.14 แรงดันเอาต์พุตของวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ ที่ได้จากการคูณสัญญาณไซน์ความถี่ 1000kHz , 250mVp และสัญญาณไซน์ความถี่ 1MHz , 250mVp

จะพบว่า เนื่องจากไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ภายในของมอสเฟตได้ และวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ จำเป็นต้องใช้ทั้ง NMOS และ PMOS ดังนั้นจากการทดลองก็ได้แสดงให้เห็น วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ นั้นสามารถทำการคูณสัญญาณไซน์ 2 ความถี่ได้ แต่ก็จะมีความเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตมากกว่า วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง รวมทั้งยังมี แรงดันออฟเซต ที่เอาต์พุต และสัญญาณทั้งซีกบวก และซีกลบมีความไม่สมมาตร อีกด้วย เนื่องจากความไม่เท่ากันทุกประการของมอสเฟตทั้งสองชนิด

6.4 ผลการทดลองวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี้

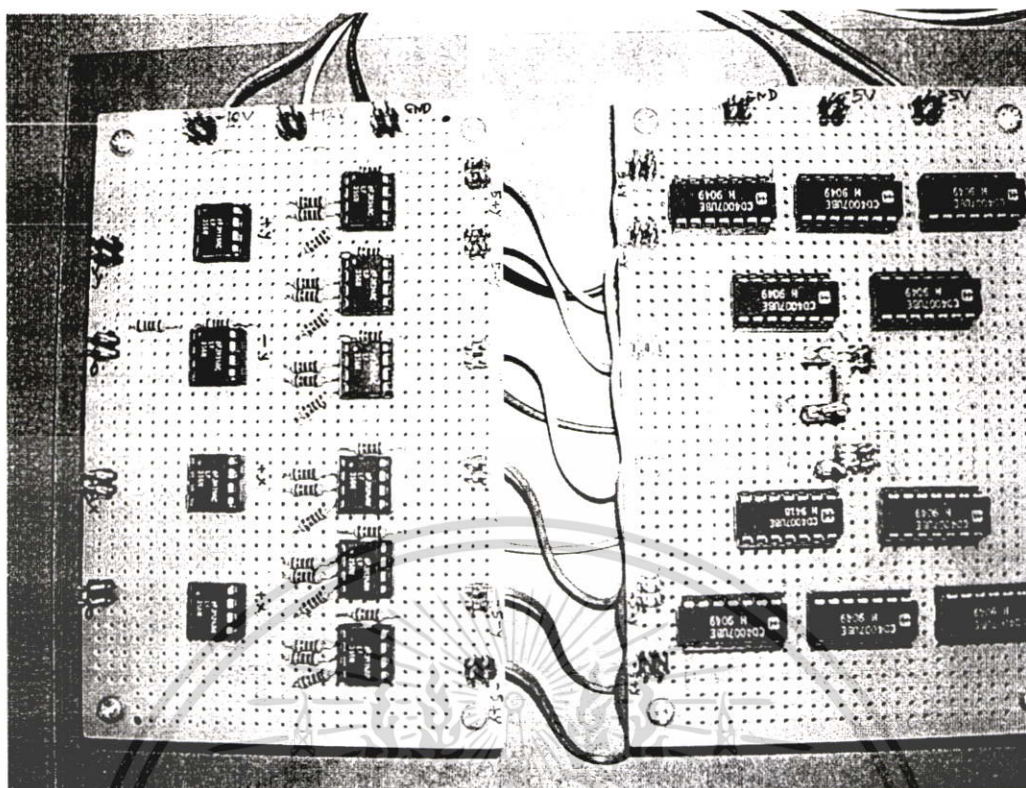


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 วงจรยกระดับแรงดันสัญญาณอินพุต สำหรับวงจรคูณสัญญาณ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี้ และวงจรคูณสัญญาณ แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.16 วงจรคุณสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ ที่ประกอบเสร็จ

การทดลองใช้ NMOS ภายใน ของไอซีตระกูลซีมอส เบอร์ CD14007UB จำนวน 6 ตัว และใช้ PMOS ภายใน ของไอซีตระกูลซีมอส เบอร์ CD14007UB จำนวน 4 ตัว ซึ่งมีวงจรภายในตามรูปที่ 6.1 มาประกอบเป็นวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ ตามรูปที่ 6.15 โดยทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงบวก/ลบ 5 โวลต์ และใช้อุปแอมป์เบอร์ LF356N จำนวนอีก 6 ตัว นำมาสร้างวงจรรกระดับแรงดันอินพุต และทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงบวก/ลบ 5 โวลต์ สำหรับเป็นอินพุตให้วงจรคุณสัญญาณ วงจรคุณสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ ที่ประกอบเสร็จแสดงตามรูปที่ 6.16

เนื่องจากวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกิดและขาบอดี้ นี้ต้องอาศัยการควบคุมให้ NMOS และ PMOS มีคุณสมบัติที่เหมือนกัน หรือใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจากการต่อทดลองจริง โดยใช้มอสเฟตภายในของไอซี CD14007UB ตามรูปที่ 6.16 จึงไม่ประสบผลสำเร็จ เหมือนกับผลการจำลองการทำงาน

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากทั้งหมดที่ได้นำเสนอรายละเอียดของงานวิจัย และการออกแบบวงจรยกกำลังสอง และ วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อกแบบ 4 ควอดแดรนต์ ทั้งสามแบบ ที่เกิดจากการประยุกต์ใช้งานขาบอดี ของมอสเฟตเป็นขาสัญญาณอินพุต จะพบว่าวงจรคูณสัญญาณแบบใหม่นี้ บางวงจรมีความเรียบง่าย และสามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำได้เนื่องจากมีเพียงมอสเฟตเพียง 2 ชั้นระหว่างไฟเลี้ยงบวก และลบ ทำให้ใช้กำลังงานที่ต่ำได้ โดยวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง มี ข้อดีที่ว่า วงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก มีเอาต์พุตแบบแรงดันเทียบกราวด์ และวงจรคูณสัญญาณ แอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี เนื่องจากวงจรคูณสัญญาณแบบแรก ใช้มอสเฟต เพียงชนิดเดียว นั่นคือ NMOS ทั้งหมด ในการออกแบบ ทำให้ลดความผิดพลาดเนื่องจากความไม่ เท่ากันของคุณสมบัติของมอสเฟต ทั้งสองแบบได้ นอกจากนี้ยังทำงานที่ไฟเลี้ยงบวกกับกราวด์ ทำให้สะดวกในการใช้งาน แต่ก็จำเป็นต้องวัดเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง สำหรับวงจรคูณสัญญาณ แอนะล็อกแบบที่สอง แม้จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อกแบบแรก เนื่องจาก ต้องใช้มอสเฟตทั้งแบบ NMOS และ PMOS ร่วมกัน รวมทั้งต้องใช้ทั้งไฟเลี้ยงบวกและลบ แต่ก็ได้ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้งานเป็นวงจรคูณสัญญาณที่ทำงานที่ไฟเลี้ยงต่ำ และมีลักษณะที่เรียบง่าย ได้เช่นกัน ส่วนวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก แบบใช้อินพุตทั้งขาเกตและขาบอดี มีคุณสมบัติที่ดีย อกกว่าวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก สองแบบแรก เนื่องจากต้องใช้มอสเฟตทั้งแบบ NMOS และ PMOS ร่วมกัน รวมทั้งต้องใช้ทั้งไฟเลี้ยงบวกและลบ และยังคงวัดเอาต์พุตแบบแรงดันผลต่าง แต่ ก็แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สร้างวงจรคูณสัญญาณแอนะล็อก ได้เช่นเดียวกัน

จากที่ได้กล่าวมานี้ แม้ว่าเราจะสามารถนำขาบอดีของมอสเฟตมาใช้งานได้มากกว่าการ นำไปใช้กำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าการใช้งานขาบอดีจะดีกว่า จนสามารถใช้ งานแทนขาเกตได้ทั้งหมด เนื่องจากการใช้งานขาบอดีจะมีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจสูง กว่า เนื่องจากแรงดันบอดี-ซอร์ส แฝงอยู่ในรูปของรากที่สองของค่าแรงดันขีดเริ่ม ทำให้ต้องมีการ ประมาณเทอมฮาร์โมนิกที่ความถี่สูงทั้ง นอกจากนี้ช่วงการทำงานของแรงดันบอดีซอร์ส ก็มีช่วงที่ จำกัด เนื่องจากถูกจำกัดจากค่าพารามิเตอร์ภายในของมอสเฟต และต้องระวังไม่ให้เกิดการไบแอส ตรงระหว่างขาบอดีและช่องนำกระแส

เอกสารอ้างอิง

- [1] สกล อุดมศิริ, บุญชัย บุญชู และ พลผดุง ผดุงกุล, “วงจรวทวีความถี่สองเท่า ใช้แรงดันต่ำโดยป้อนอินพุตเข้าที่ขาเบอร์ด์ , Low Voltage Bulk Driven Frequency Doubler Circuit ”, หน้า 287-295 ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 สาขาวิศวกรรมศาสตร์ และสาขาอุตสาหกรรมเกษตร
- [2] Joseph N.Babanezhad, “A 20-V Four-quadrant CMOS Analog Multiplier”, **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, vol. SC-20, 1985 , pp.1158-1168
- [3] Klass Bult and Hans Wallinga, “A Class of Analog CMOS Circuits Based on the Square-Law Characteristic of An MOS Transistor in Saturation”, **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, vol. SC-22, 1987 , pp.357-365
- [4] Adel S.Sedra, Kenneth C. Smith. **Microelectronic Circuits**. Third Edition. New York Oxford University Press, Inc.1991.
- [5] เทียนไชย นกกรุฑ , ประสูตร เดชสุวรรณ , พลผดุง ผดุงกุล, “วงจรมัลติพลายเอานาลอก 4 ควอดแรนต์ โดยใช้ขาบอด์ของมอสเฟต”, “Four-Quadrant Analog Multiplier Using MOSFET’s Body-Terminal” , หน้า 104-108 ใน การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25
- [6] เทียนไชย นกกรุฑ , ประสูตร เดชสุวรรณ , พลผดุง ผดุงกุล, “วงจรมัลติพลายสอง และวงจรมัลติพลาย ใช้ขาบอด์ของมอสเฟต”, “Squarer and Multiplier using MOSFET’s Body-Terminal” , หน้า 1244-1248 ใน การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26



ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแรนท์ โดยใช้ขาบอดีของมอสเฟต Four-Quadrant Analog Multiplier using MOSFET's Body-Terminal

เทียนไชย นกกระจุก . ประสูตร เดชสุวรรณ . พลผดุง ผดุงกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: Polphadung@hotmail.com

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

เลขที่ 51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 Email: ntienchai@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานขาบอดีของมอสเฟตสร้างวงจรรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแรนท์ สองวงจรร่วมกัน วงจรแรกใช้ขาบอดีเป็นอินพุต เอคต์พุตเป็นแบบจุดเดียวเทียบกราวด์ วงจรที่สองใช้ขาบอดีเป็นอินพุตร่วมกับขาคเกต เอคต์พุตเป็นแบบดิฟเฟอเรนเชียล วงจรที่ได้สามารถใช้งานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำได้

Abstract

This paper presents the use of MOSFET's Body-terminal to implement two four-quadrant analog multipliers. The first single-ended output circuit uses Body-terminal as its input whereas the second differential output circuit uses both Body-terminal and Gate-terminal as its input. Both circuits can operate at low supply voltage level.

Keywords: Multiplier

1. บทนำ

วงจรรคูณสัญญาณที่ใช้มอสเฟตโดยทั่วไปจะใช้งานขาคเกตเป็นอินพุตหลัก หากแต่มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ 4 ขา ซึ่งปกติจะต่อขาบอดีเข้ากับขาซอร์ส ทำให้เหลือขาใช้งานเพียง 3 ขา บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานขาบอดีของมอสเฟต ในลักษณะอินพุตเดี่ยว และอินพุตร่วม สร้างวงจรรคูณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแรนท์ สองแบบ ประกอบด้วยแบบที่มีเอคต์พุตเทียบกราวด์ และเอคต์พุตแบบดิฟเฟอเรนเชียล โดยสามารถทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการกระแสของมอสเฟตซึ่งทำงานในช่วงอิมิตว โมดิมคผลของแลมปีดา จะได้ว่า

$$I_d = K(V_{gs} - V_t)^2 \quad (1)$$

$$K = \frac{\mu C_{ox} W}{2L} \quad (2)$$

V_t คือค่าแรงดันขีดเริ่ม
 V_{gs} คือค่าแรงดันขาคเกตเทียบขาซอร์ส
 μ คือค่าความคล่องของอิเล็กตรอนภายในแชนแนล
 C_{ox} คือค่าความประจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ บริเวณแชนแนล
 W คือความกว้างของแชนแนล
 L คือความยาวของแชนแนล

$$V_{gs} = V_{GS} + v_{gs} \quad (3)$$

$$V_t = V_{TO} + \gamma(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F}) \quad (4)$$

V_{GS} คือค่าแรงดันไฟตรง ขาคเกตเทียบซอร์ส
 v_{gs} คือค่าสัญญาณแรงดันขนาดเล็ก ขาคเกตเทียบขาซอร์ส
 V_{TO} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่รวมผลของปรากฏการณ์บอดี
 γ คือค่าปัจจัยของบอดี หรือพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้าง
 ϕ_F คือบอดีโพลเทรนเชียล ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการโดปสารในบอดี
 v_{bs} คือค่าสัญญาณแรงดันขนาดเล็ก ขาบอดีเทียบขาซอร์ส

แทน (3) และ (4) ลงใน (1)

$$I_d = K(V_{GS} + v_{gs} - V_{TO} - \gamma(\sqrt{2\phi_F - v_{bs}} - \sqrt{2\phi_F}))^2 \quad (5)$$

สมการที่ (5) แสดงให้เห็นว่า กระแสเดรนเป็นฟังก์ชันของสัญญาณแรงดัน V_{GS} และสัญญาณแรงดัน v_{bs} เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอื่นเป็นค่าคงที่ โดย v_{bs} เป็นตัวแปรติดอยู่ภายใต้เครื่องหมายรากที่สอง แต่สามารถดึงออกจากรากที่สองได้โดยใช้การประมาณด้วยอนุกรมทย์เลอร์ ภายใต้เงื่อนไข $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ และวงจรรคูณสัญญาณ ทั้งสองวงจรถูกออกแบบจะอาศัยวิธีการนี้เป็นหลัก

3. หลักการออกแบบวงจรอนุกรมสัญญาณ

3.1 วงจรอนุกรมสัญญาณแบบที่หนึ่ง

จากสมการที่ (5) ถ้าจัดรูปเสียใหม่เป็น

$$\frac{I_d}{K\gamma^2} = (D - (\sqrt{C-x} - \sqrt{C}))^2 \quad (6)$$

เมื่อ $D = \left(\frac{V_{GS} - V_{TO}}{\gamma}\right)$, $C = 2\mu_f \cdot x = v_{bs}$ และ $v_{gs} = 0$

จากการกระจาย ศิวอนุกรมเทเลอร์ [1]

$$\sqrt{C \pm x} = \sqrt{C} \pm \frac{x}{2\sqrt{C}} - \frac{x^2}{4 \cdot 2\sqrt{C}^3} \pm \frac{3 \cdot x^3}{8 \cdot 3\sqrt{C}^5} - \frac{15 \cdot x^4}{16 \cdot 4\sqrt{C}^7} \pm \dots$$

(7)

$$(\sqrt{C+x} - \sqrt{C}) + (\sqrt{C-x} - \sqrt{C}) = -\frac{x^2}{4\sqrt{C}^3} ; x \ll C \quad (8)$$

จาก (6) ถ้าป้อนค่าแปร x เป็นแบบสัญญาณผลต่าง และนำเอาค่าทุกตัวที่ได้นำมารวมกัน โดยอาศัยการประมาณจากสมการที่ (8) จะได้ว่า

$$(D - (\sqrt{C+x} - \sqrt{C}))^2 + (D - (\sqrt{C-x} - \sqrt{C}))^2 = 2 \cdot D^2 + \left(\frac{D+\sqrt{C}}{2 \cdot C \cdot \sqrt{C}}\right) x^2 \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) ประกอบด้วยสองเทอม โดยเทอมแรกเป็นค่าคงที่ เทอมที่สองเป็นเทอมยกกำลังสองของตัวแปร x และสามารถออกแบบวงจรกำลังสองได้ตามรูปที่ 1. เมื่อ $I_o = I_{d1} + I_{d2}$ จะได้ว่า

$$I_o = 2K(V_{GS} - V_{TO})^2 + \left(\frac{K}{4\mu_f \sqrt{2\mu_f}}\right) (\gamma(V_{GS} - V_{TO}) + \gamma^2 \sqrt{2\mu_f}) v_{bs}^2 \quad (10)$$

(11)

ดังนั้น

$$I_o = I_{D0} + n v_{bs}^2 \quad (11)$$

เมื่อ

$$I_{D0} = 2K(V_{GS} - V_{TO})^2 \quad (12.1)$$

$$n = \left(\frac{K}{4\mu_f \sqrt{2\mu_f}}\right) (\gamma(V_{GS} - V_{TO}) + \gamma^2 \sqrt{2\mu_f}) \quad (12.2)$$

โดยที่กำหนดค่าให้ NMOS และ PMOS มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ

ถ้าป้อนสัญญาณเข้า: v_{bs} เป็นสัญญาณผลรวม $(v_x + v_y)$ และสัญญาณ

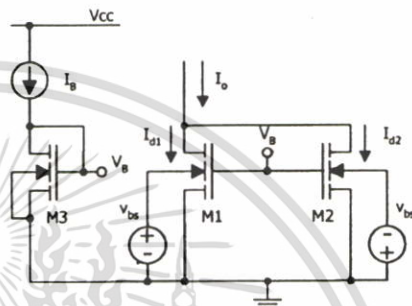
ผลต่าง $(v_x - v_y)$ ตามวงจรรูปที่ 2. จะได้ว่า [2][3]

$$I_1 = I_{D0} + n(v_x + v_y)^2 = I_{D0} + n(v_x^2 + 2v_x v_y + v_y^2) \quad (13)$$

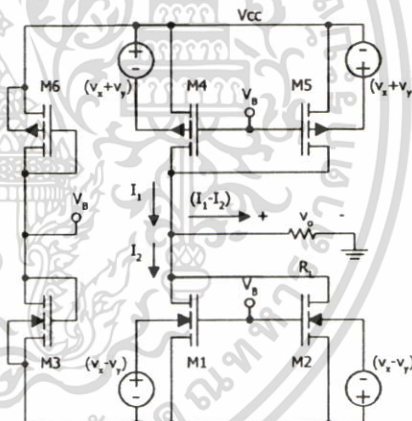
$$I_2 = I_{D0} + n(v_x - v_y)^2 = I_{D0} + n(v_x^2 - 2v_x v_y + v_y^2) \quad (14)$$

และ $V_o = R_L(I_1 - I_2) = (4R_L n) v_x v_y \quad (15)$

สมการที่ (15) แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต V_o เทียบกับ v_x และ v_y ซึ่งจะเป็นผลคูณของสัญญาณขนาดเล็กลง v_x และสัญญาณขนาดเล็กลง v_y โดยมีอัตราขยายเป็น $(4R_L n)$ เมื่อเงื่อนไข $2\mu_f \gg |v_x \pm v_y|$ เป็นจริง



รูปที่ 1. วงจรยกกำลังสอง ที่มีกระแสเป็นเอาต์พุต



รูปที่ 2. วงจรอนุกรมสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแรนต์ แบบที่หนึ่ง

3.2 วงจรอนุกรมสัญญาณแบบที่สอง

และจากสมการที่ (5) ถ้าจัดรูปเสียใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{I_d}{K\gamma^2} = (D - \sqrt{C-x} + y)^2 \tag{16}$$

เมื่อ $D = \left(\frac{V_{GS} - V_{TO} + \gamma\sqrt{2\phi_F}}{\gamma} \right) \cdot C = 2\phi_F$

$$x = v_{bs} \quad y = \left(\frac{V_{gs}}{\gamma} \right)$$

และจากการกระจายด้วยอนุกรมเทเลอร์ข้างต้น

$$\sqrt{C+x} - \sqrt{C-x} \cong \frac{x}{\sqrt{C}} \quad ; \quad x \ll C \tag{17}$$

และจาก

$$(D - \sqrt{C-x} + y)^2 - (D - \sqrt{C-x} - y)^2 = 2D - 2y\sqrt{C-x} \tag{18}$$

$$(D - \sqrt{C+x} + y)^2 - (D - \sqrt{C+x} - y)^2 = 2D - 2y\sqrt{C+x} \tag{19}$$

สมการ (18) - (19) และใช้การประมาณจาก (17) จะได้ว่า

$$\left[(D - \sqrt{C-x} + y)^2 - (D - \sqrt{C-x} - y)^2 \right] - \left[(D - \sqrt{C+x} + y)^2 - (D - \sqrt{C+x} - y)^2 \right] \cong \frac{2}{\sqrt{C}} yx \tag{20}$$

จากสมการ (20) พบว่าด้านขวามือ ประกอบด้วยเทอมบวกสองเทอมคือ $+(+x, +y) + (-x, -y)$ และเทอมลบอีกสองเทอมคือ $-(+x, -y) - (-x, +y)$

ด้านเทอม $+(+x, +y)$ ทำให้เกิด I_1 เทอมแรกของสมการ (19)

$+(-x, -y)$ ทำให้เกิด I_2 เทอมที่สองของสมการ (19)

$-(+x, -y)$ ทำให้เกิด I_3 เทอมที่สามของสมการ (19)

$-(-x, +y)$ ทำให้เกิด I_4 เทอมที่สามของสมการ (19)

ดังนั้นจากวงจรรูปที่ 4. และสมการ (20) จะได้ว่า

$$v_o = R(I_2 - I_3) + (I_1 - I_4) - \left(\frac{2RK\gamma}{\sqrt{2\phi_F}} \right) v_{bs} v_{gs} \tag{21}$$

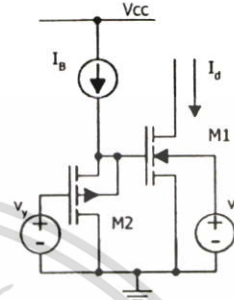
สมการที่ (21) แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันผลต่างเอาต์พุต V_o ซึ่งเป็นผลคูณของสัญญาณขนาดเล็ก v_{bs} และสัญญาณขนาดเล็ก v_{gs} โดยมี

อัตราขยายเป็น $\left(\frac{2RK\gamma}{\sqrt{2\phi_F}} \right)$ โดยจากวงจรสัญญาณแบบรูปที่ 4. ทำการป้อนสัญญาณขนาดเล็ก v_{bs} เข้าที่ขาบอดี้ที่ขอบขากรรศโดยตรง ส่วน

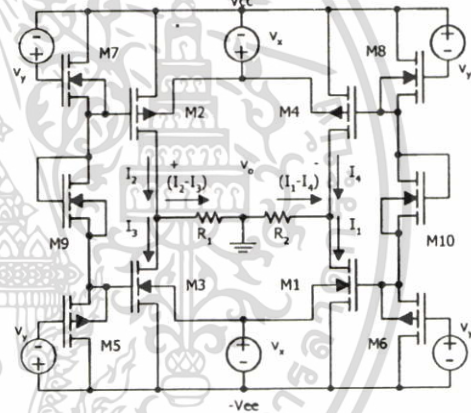
สัญญาณขนาดเล็ก v_{gs} ป้อนผ่านวงจรรอบระดับแรงดันไฟตรงตามรูปที่

3. โดยมีเงื่อนไขว่า $2\phi_F \gg |v_{bs}|$

หมายเหตุ เนื่องจาก PMOS จะทำงานที่ระดับแรงดันกลับกับ NMOS ดังนั้นการป้อน $+x$ ให้ PMOS จะเท่ากับป้อน $-x$ ให้ NMOS และการป้อน $\pm y$ ให้ PMOS จะเท่ากับป้อน $\mp y$ ให้ NMOS



รูปที่ 3. การป้อนสัญญาณอินพุต v_x และ v_y เมื่อ I_d เป็นกระแสเอาต์พุต



รูปที่ 4. วงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแรนท์ แบบที่สอง สัญญาณเทียบกราวด์ v_x ป้อนเข้าขาบอดี้ สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล v_y ป้อนเข้าขาเกต

4. ผลการจำลองการทำงาน

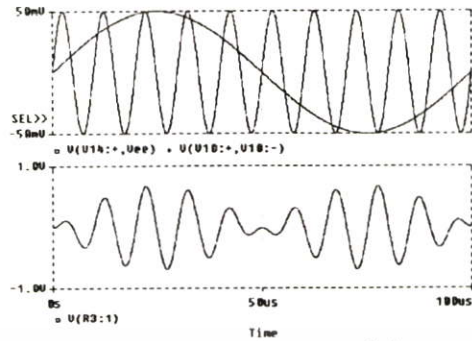
4.1 วงจรคูณสัญญาณแบบที่หนึ่ง

นอสเฟดที่ใช้จำลองการทำงานตามรูปที่ 5. ใช้โมเดลระดับที่ 1. โดยสมมุติว่า NMOS และ PMOS มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้ M1,M2,M3 เป็น NMOS มีค่า $W = 100\mu, L = 1\mu, V_{to} = 1, \text{Gamma} = 0.35$ (Gamma คือ γ), $\text{Phi} = 0.65$ (Phi คือ ϕ_F), $K_p = 50\mu$ โดย M1,M2 เป็นแกนหลักของวงจรรอบกำลังสอง ส่วน M3 ใช้สร้างแรงดันไบแอสให้แก่ M1,M2 และ M4,M5,M6 เป็น PMOS มี

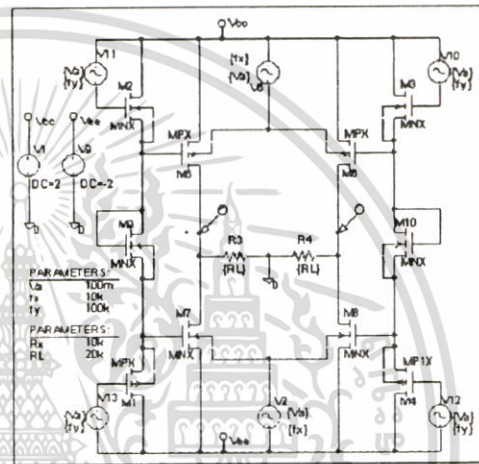
ค่า $W=100\mu$. $L=1\mu$. $V_{to}=-1$. $\Gamma=0.35$. $\Phi=0.65$. $K_p=50$ โดย $M5,M6$ เป็นแกนหลักของวงจรกำลังสอง ส่วน $M4$ ใช้สร้างแรงดันไบแอสให้แก่ $M5,M6$ โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ ค่าโดยทั่วไป $\phi_F = 0.65$ ดังนั้น $1.3V \gg |v_x \pm v_y|$ การจำลองการทำงานให้ $|v_x \pm v_y| = 100mV$ ให้อินพุตทั้งสอง $v_x = 50mV$. $freq, x = 10kHz$ และ $v_y = 50mV$. $freq, y = 100kHz$ ผลการจำลองการทำงานแสดงตามรูปที่ 6.

4.2 วงจรควบคุมสัญญาณแบบที่สอง

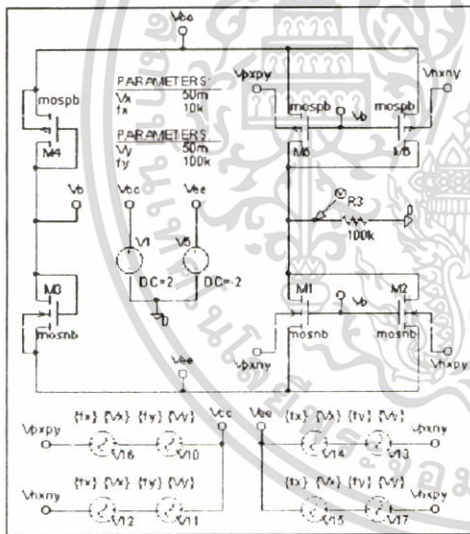
มอดุเลตที่ใช้จำลองการทำงานตามรูปที่ 7. ใช้โมเดลระดับที่ 1. โดยสมมุติว่า NMOS และ PMOS มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ดังนี้ $M1,M3,M7,M8,M9,M10$ เป็น NMOS มีค่า $W=100\mu$. $L=1\mu$. $V_{to}=1$. $\Gamma=0.35$. $\Phi=0.65$. $K_p=50\mu$ และ $M2,M4,M5,M6$ เป็น PMOS มีค่า $W=100\mu$. $L=1\mu$. $V_{to}=-1$. $\Gamma=0.35$. $\Phi=0.65$. $K_p=50\mu$ โดย $M5,M6,M7,M8$ ใช้เป็นแกนหลักของวงจรควบคุมสัญญาณแบบที่สอง ส่วน $M1,M2,M3,M4,M9,M10$ เป็นส่วนสร้างแรงดันไบแอส โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ $2\phi_F \gg |v_{bs}|$ ค่าโดยทั่วไป $\phi_F = 0.65$ ดังนั้น $1.3V \gg |v_x|$ กำหนดให้อินพุตทั้งสองมีค่า $v_x = 100mV$. $freq, x = 10kHz$ และ $v_y = 100mV$. $freq, y = 100kHz$ ผลการจำลองการทำงานแสดงตามรูปที่ 8.



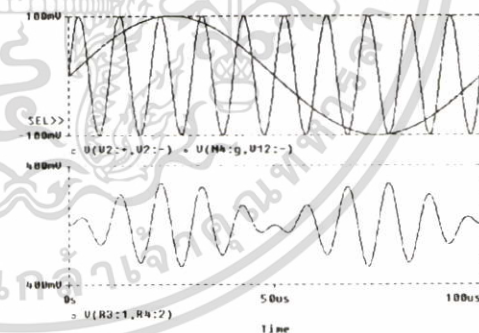
รูปที่ 6. ผลการจำลองการทำงาน วงจรควบคุมสัญญาณแบบที่หนึ่ง



รูปที่ 7. วงจรควบคุมสัญญาณแบบที่สอง ที่ใช้จำลองการทำงาน



รูปที่ 5. วงจรควบคุมสัญญาณแบบที่หนึ่ง ที่ใช้จำลองการทำงาน



รูปที่ 8. ผลการจำลองการทำงาน วงจรควบคุมสัญญาณแบบที่สอง

หมายเหตุ จ้างมการค่างบด้วยโปรแกรม PSPICE version8.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุป

วงจรคูณสัญญาณแบบสองตัวสองขั้ว (two-input two-output) สามารถใช้งานได้โดยมีวงจรมัลติพลายเออร์แบบสองขั้วและสองอินพุตได้ โดยวงจรคูณสัญญาณแบบสองขั้วแบบที่มีใช้วงจรมัลติพลายเออร์ จะต้องมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันได้ ไปสู่วงจรคูณสัญญาณแบบสองขั้ว 4 ควอดแรนต์ที่มีแรงดันเกาต์พุตต่อขั้วกราวด์ โดยเงื่อนไขสำคัญคือ $2\phi_p \gg (|V_{DS}| = |V_X + V_Y|)$ และวงจรคูณสัญญาณแบบสองขั้วแบบที่เสนอแสดงให้เห็นว่า สามารถนำพลาตฟอร์มไปใช้กับอินพุตที่มีขั้วกราวด์ เพื่อสร้างวงจรคูณสัญญาณแบบสองขั้ว 4 ควอดแรนต์ที่มีเกาต์พุตเป็นแรงดันผลต่างได้ แต่ต้องใส่ใจเกี่ยวกับความสมดุลของวงจรมัลติพลายเออร์ทั้งสองคืออัตราสมมูลกันที่ NMOS และ PMOS มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

[1] ลลิต คุตมศิริ, บุญชัย บุญชู และ พลพวง คุตมศิริ "วงจรมัลติพลายเออร์สองตัว ใช้แรงดันเกาต์พุตมีอินพุตเข้าที่ขั้วกราวด์", Low Voltage Bulk Driven Frequency Doubler Circuit ฉบับร่าง ๒๖ มีนาคม ๒๕๖๖ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ, หน้า 287-295.

[2] Joseph N Babanezhad, "A 20-V Four-quadrant CMOS Analog Multiplier," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-20, pp.1158-1168, 1985.

[3] Klaus Buit and Hans Wallinga, "A Class of Analog CMOS Circuits Based on the Square Law Characteristics of An MOS Transistor Saturation," IEEE Journal of Solid State Circuits, Vol. SC-25, pp. 185-188.

ประวัติผู้เขียน



เจ็ททิน ไชย นกอรุณ
อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ประสุต เศษสุวรรณ
อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ผศ. พลพวง คุตมศิริ
อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



สงวนลิขสิทธิ์ © ๒๕๖๖ โดย ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

| | |
|---------------------------------|---|
| ชื่อ-นามสกุล | นายเทียนไชย นกครุฑ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 7 มีนาคม พ.ศ.2515 ที่กรุงเทพมหานคร |
| ที่อยู่ | 96/15 หมู่บ้านปิ่นทอง 3 ถ.ลาดปลาเค้า ซ.76 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220 โทร.018035736 |
| ประวัติการศึกษา | 2537 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาโทรคมนาคม (เกียรตินิยมอันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ความชำนาญเฉพาะด้าน | 1.) ระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 2.) ระบบเครื่องเสียง 3.) ระบบประหยัดพลังงาน |
| ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย | |
| พ.ศ.2537-2547 | อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| พ.ศ.2547-ปัจจุบัน | Senior Project Engineer บริษัท Magnet Research Co.,Ltd |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้