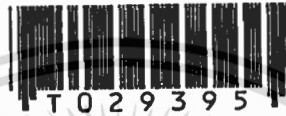


การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลเป็นวงจรคณิตศาสตร์ในโหมดแรงดันและกระแส
THE APPLICATIONS OF POOL CIRCUITS AS ARITHMETIC CIRCUITS IN
CURRENT MODE AND VOLTAGE MODE



นายอดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร

MR. ADISAK MONPAPASSORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2540

ISBN 974-622-067-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE APPLICATIONS OF POOL CIRCUITS AS ARITHMETIC CIRCUITS IN
CURRENT MODE AND VOLTAGE MODE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1997

ISBN 974-622-067-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลเป็นวงจรคณิตศาสตร์ในโหมดแรงดันและกระแส

นักศึกษา

นายอดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.

2540

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการเสนอเกี่ยวกับเรื่อง “การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลเป็นวงจรคณิตศาสตร์ในโหมดแรงดันและโหมดกระแส” ซึ่งจะกล่าวถึงวงจรพูลโหมดแรงดันและโหมดกระแสที่มีพื้นฐานการทำงานเป็นวงจรบวกและลบ โดยจะนำวงจรพูลโหมดแรงดันมาสร้างเป็นวงจรหารและวงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมดแรงดันโดยอาศัยพื้นฐานสมการกำลังสองของมอสเฟตในย่านอิ่มตัว และจะนำวงจรพูลโหมดกระแสมาสร้างเป็นวงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมดกระแสโดยใช้วงจรถักกำลังสองโหมดกระแสและวงจรถ่อนกระแส ซึ่งมีการยืนยันประสิทธิภาพของวงจรโดยใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ และเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice

Thesis Title	The Applications of Pool Circuits as Arithmetic Circuits in Current Mode and Voltage Mode
Student	Mr.Adisak Monpapassorn
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1997

Abstract

This thesis presents “the applications of pool circuits as arithmetic circuits in current mode and voltage mode” which present to current and voltage mode pool circuit. The basic operation of pool circuit are subtraction and addition function. The voltage mode pull circuit create voltage mode four-quadrant multiplier and divider circuits by using square law of MOSFET in saturation region. The current mode pool circuit creates current mode four-quadrant multiplier by using Current mode square and current mirror circuits. This thesis presents the experimental results and the performance of the circuits by using mathematics equations and Pspice program for the simulation.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความเมตตากรุณาจาก ท่านอาจารย์ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ ซึ่งได้คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำแก่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีเสมอมา ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์รู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์ของท่านที่มีต่อผู้จัดทำ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญและผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อท้วงติงเพื่อที่ทางผู้จัดทำจะได้นำไปปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณครุอาจารย์ทั้งหมด ที่ได้พร่ำสอนผู้จัดทำมาตั้งแต่ผู้จัดทำยังเป็นเด็กจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนครอบครัวของผู้จัดทำซึ่งคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้จัดทำเสมอมาและขอขอบคุณมากสำหรับ คุณพร้อมศรี ไพโรจน์สถาพร ที่เป็นส่วนหนึ่งของแรงบันดาลใจให้ผู้จัดทำต้องจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงอย่างรวดเร็ว

ขอขอบคุณสำหรับมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ซึ่งเป็นที่ทำงานของผู้จัดทำที่ได้สละเวลาอันมีค่าส่วนหนึ่งให้กับทางผู้จัดทำได้มาศึกษาต่อและได้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความดีอันเกิดจากคุณค่าและประโยชน์ที่พึงมีในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์.....	1
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 บทสรุป.....	2
2. ความเป็นมาและทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต.....	3
2.1 ความเป็นมาและวิวัฒนาการของมอสเฟต.....	3
2.2 เปรียบเทียบข้อดีและเสียระหว่างมอสเฟตกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์.....	4
2.2.1 ข้อดีของมอสเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์.....	4
2.2.2 ข้อเสียของมอสเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์.....	5
2.3 โครงสร้างและการไบอัสของมอสเฟต.....	6
2.4 สัญลักษณ์ของมอสเฟต.....	8
2.5 ชนิดของมอสเฟต.....	9
2.6 คุณสมบัติการทำงาน of มอสเฟต.....	11
2.7 แบบจำลองของมอสเฟต.....	13
2.8 ผลของอุณหภูมิในมอสเฟต.....	14
2.8.1 ค่าของสภาพความคล่องตัว (Mobility).....	14
2.8.2 ค่าของแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage).....	15
2.9 บทสรุป.....	16

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3. วงจรพูล.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 วงจรพูลโหมคแรงดัน.....	17
3.2.1 การวิเคราะห์ห่าย่นการทำงานของวงจร.....	18
3.2.2 การวิเคราะห์ห่าย่นการตอบสนองความถี่ของวงจร.....	22
3.3 วงจรพูลโหมคกระแส.....	25
3.3.1 การพิจารณาค่าของ R_1, R_2, R_3 และ R_4 ที่มีผลกระทบต่อวงจร.....	28
3.3.2 การวิเคราะห์ห่าย่นการทำงานของวงจร.....	30
3.3.3 การวิเคราะห์ห่าย่นการตอบสนองความถี่ของวงจรสะท้อนกระแส.....	31
3.4 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วย โปรแกรม Pspice.....	35
3.4.1 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรพูลโหมคแรงดันด้วยโปรแกรม Pspice.....	35
3.4.2 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรพูลโหมคกระแสด้วยโปรแกรม Pspice.....	37
3.5 บทสรุป.....	39
4. การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมคแรงดันเป็นวงจรหารและวงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคแรงดัน.....	41
4.1 บทนำ.....	41
4.2 การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมคแรงดันเป็นวงจรหารโหมคแรงดัน.....	41
4.3 การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมคแรงดันเป็นวงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคแรงดัน.....	43
4.4 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice.....	44
4.4.1 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรหารโหมคแรงดันด้วยโปรแกรม Pspice.....	44
4.4.2 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคแรงดันด้วยโปรแกรม Pspice.....	45
4.5 บทสรุป.....	46

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5. การประยุกต์ใช้งานวงจรพูล โหมดกระแสเป็นวงจรคู่มือสี่ขอตแคนที่โหมดกระแส.....	47
5.1 บทนำ.....	47
5.2 วงจรยกกำลัง โหมดกระแส.....	47
5.3 การประยุกต์ใช้งานวงจรพูล โหมดกระแสเป็นวงจรคู่มือสี่ขอตแคนที่โหมดกระแส.....	48
5.4 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice.....	49
5.4.1 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรกำลังสอง โหมดกระแสด้วยโปรแกรม Pspice.....	49
5.4.2 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรคู่มือสี่ขอตแคนที่ โหมดกระแสด้วยโปรแกรม Pspice.....	50
5.5 บทสรุป.....	51
6. บทสรุป.....	53
6.1 วงจรหารโหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูล โหมคแรงดัน.....	53
6.2 วงจรคู่มือสี่ขอตแคนที่โหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูล โหมคแรงดัน.....	53
6.3 วงจรคู่มือสี่ขอตแคนที่โหมคกระแสที่สร้างจากวงจรพูล โหมคกระแส.....	54
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	85

สารบัญภาพ

	หน้า
2.1 โครงสร้างของ NMOS.....	6
2.2 โครงสร้างของ PMOS.....	6
2.3 แสดงการไบอัสแรงดันของ ก. NMOS ข. PMOS.....	7
2.4 แสดงสัญลักษณ์แบบต่างๆของมอสเฟต.....	9
2.5 โครงสร้างของมอสเฟตชนิด เอ็น-แซนแนล ก. E-MOSFET ข. D-MOSFET.....	10
2.6 แสดงกราฟคุณสมบัติของ NMOS ก.E-MOSFET ข.D-MOSFET.....	10
2.7 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอสเฟต.....	12
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{GS}	13
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_D}$ กับ V_{GS} ของมอสเฟตที่มีค่าของ V_T มากกว่าศูนย์ และไบอัสให้ $V_{SB} = 0, V_{DS} = V_{GS}$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้น.....	15
3.1 วงจรพูลโหมคแรงดันและบล็อกสัญลักษณ์.....	17
3.2 วงจรชุดที่ 1 ของวงจรพูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราการทำงานของวงจร.....	18
3.3 วงจรสมมูลย์ของมอสเฟตแบบ N-ch มอสเฟตแบบ P-ch และแหล่งจ่ายกระแสคงที่.....	22
3.4 วงจรชุดที่ 1 ของวงจรพูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจร และวงจรสมมูลย์.....	23
3.5 วงจรพูลโหมคกระแส และบล็อกสัญลักษณ์.....	26
3.6 แสดงวงจรพูลโหมคกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์หาผลกระทบของค่า R_1, R_2, R_3 และ R_4 ที่มีต่อวงจร.....	28
3.7 แสดงส่วนอินพุตของวงจรพูลโหมคกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราการทำงานของวงจร.....	30
3.8 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch และวงจรสมมูลย์.....	31
3.9 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบ N-ch และวงจรสมมูลย์.....	33
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจรพูลโหมคแรงดันระหว่าง V_1, V_2, V_3 และ V_O เมื่อ $V_1 = 3$ โวลต์ $V_2 = -3, -2, -1, 0,$ และ 1 โวลต์ V_3 เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -3 ถึง 3 โวลต์.....	35
3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต (V_O) ของวงจรพูลโหมคแรงดันกับอุณหภูมิ โดยทำการป้อนแรงดันอินพุต V_1, V_2 และ V_3 เท่ากับ 3 โวลต์.....	36

3.12 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรพูลโหมคแรงดัน เมื่อป้อนอินพุต V_1, V_2 และ V_3 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 3 โวลต์ ที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 Hz ถึง 1 GHz.....	36
3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจรพูลโหมคกระแส เมื่อ $I_x=100\mu A$ และ $I_y= -800\mu A$ ถึง $800\mu A$	37
3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตของวงจรพูลโหมคกระแสกับอุณหภูมิ ตั้งแต่ 0-100 องศาเซนติเกรด โดยให้กระแสอินพุต $I_x=100\mu A$ และ $I_y=50\mu A$	38
3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I_x+I_y) และ (I_x-I_y) ของวงจรพูล โหมคกระแสกับความถี่ เมื่อป้อน V_x เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 2 โวลต์เข้าที่จุดป้อน กระแส I_x และป้อน V_y เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 โวลต์ เข้าที่จุดป้อนกระแส I_y	39
4.1 วงจรหารโหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมคแรงดัน.....	42
4.2 วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมคแรงดัน.....	44
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_o และ V_B เมื่อ $V_C= 0.35$ โวลต์ และ 0.25 โวลต์.....	45
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ (V_1-V_2) และ (V_3-V_4) ของวงจรในรูปที่ 4.2 เมื่อ $V_1=-V_2$, $V_3=-V_4$, $V_C=1$ โวลต์, $V_T=1$ โวลต์ และ $R_L= 20$ กิโลโอห์ม ค่า (V_3-V_4) เปลี่ยนแปลงจาก -1 โวลต์ถึง 1 โวลต์ และ (V_1-V_2) เปลี่ยนแปลงจาก -2 โวลต์ถึง 2 โวลต์.....	46
5.1 วงจรยกกำลังสองโหมคกระแส และบล็อกสัญลักษณ์.....	48
5.2 วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคกระแส ที่สร้างจากบล็อกของวงจรพูลโหมคกระแส วงจรยกกำลังสองโหมคกระแสและวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch.....	48
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} กับ I_{out} ของวงจรยกกำลังสองโหมคกระแส ในรูปที่ 5.1.....	49
5.4 กราฟแสดงการทำงานของวงจรคูณกระแสสี่ควอดแดนท์ที่ใช้วงจรพูลโหมคกระแส โดยจะทำการเลียนแบบการทำงานด้วยค่าแหล่งจ่ายกระแสคงที่ใน วงจรยกกำลังสองกระแสเท่ากับ $20\mu A$	50

5.5 กราฟแสดงการทำงานของวงจรมุขกระแสสี่ขั้วตแค้นที่โซ่วงจรพูลโหมดกระแส
โดยจะทำการเลียนแบบการทำงานด้วยค่าแหล่งจ่ายกระแสคงที่ใน
วงจรมุขกำลังสองกระแสเท่ากับ 100 μ A.....51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

วงจรถูกคือ วงจรที่ทำหน้าที่บวกและลบสัญญาณแรงดันหรือกระแส ซึ่งขึ้นกับชนิดของวงจร โดยวงจรถูกโหมดแรงดันจะทำหน้าที่บวกและลบสัญญาณแรงดัน ส่วนวงจรถูกโหมดกระแสจะทำหน้าที่บวกและลบสัญญาณกระแส นอกจากวงจรถูกจะทำหน้าที่บวกและลบแล้วยังนำมาใช้งานร่วมกับวงจรถูกกำลังสองเพื่อเป็นวงจรถูกและวงจรถูกหาร โดยใช้เทคนิคควอเตอร์-สแควร์ซึ่งวงจรถูกและวงจรถูกคณิตศาสตร์ที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้จะมีโครงสร้างแบบ CMOS เนื่องจากเทคโนโลยีการออกแบบวงจรถูกแบบ CMOS มีกำลังงานสูญเสียต่ำ ใช้พื้นที่ในการสร้างน้อย มีความต้านทานอินพุตที่สูง และสัญญาณรบกวนที่ต่ำ เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีแบบไบโพลารทรานซิสเตอร์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการออกแบบสร้างวงจรถูกคณิตศาสตร์ ทั้งในโหมดแรงดันและกระแส โดยใช้วงจรถูกที่มีโครงสร้างแบบ CMOS

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรถูกคณิตศาสตร์แบบ CMOS โดยสร้างจากวงจรถูกซึ่งมีพื้นฐานการทำงานเป็นวงจรถูกบวกและลบทั้งในโหมดแรงดันและกระแส โดยวงจรถูกคณิตศาสตร์ที่ทำการศึกษาและออกแบบได้แก่ วงจรถูกโหมดแรงดัน วงจรถูกสี่ควอดแดนต์โหมดแรงดัน และวงจรถูกสี่ควอดแดนต์โหมดกระแส

1.3 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์นี้คือ การออกแบบวงจรถูกที่ทำงานในโหมดกระแส โดยวงจรถูกจะทำหน้าที่บวกและลบสัญญาณกระแส ซึ่งในการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นการใช้สัญญาณในโหมดกระแสจะสะดวกและง่ายกว่าสัญญาณในโหมดแรงดัน ในด้านของการรวมหรือการหักล้างสัญญาณ(การบวกหรือลบ) และการออกแบบวงจรถูกสะท้อนกระแสยังง่ายและใช้อุปกรณ์น้อยกว่าวงจรถูกตามแรงดัน โดยวงจรถูกโหมดกระแสที่ออกแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรถูกกำลังสองกระแสเพื่อสร้างเป็นวงจรถูกสี่ควอดแดนต์โหมดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเนื้อหาหลักออกเป็น 6 บทโดยในบทที่ 1 จะเป็นบทนำโดยจะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์ รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ และบทสรุป ในบทที่ 2 จะเป็นเรื่องเกี่ยวกับทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต โดยจะกล่าวถึงความ เป็นมาและวิวัฒนาการของมอสเฟต การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างมอสเฟตกับไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์ ประเภทของมอสเฟต ผลของอุณหภูมิในมอสเฟตและบทสรุป ในบทที่ 3 จะเป็น เรื่องเกี่ยวกับวงจรถูก โดยจะกล่าวถึงวงจรถูกโหมดแรงดัน วงจรถูกโหมดกระแส ผลการทดลอง จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรถูกโปรแกรม Pspice และบทสรุป ในบทที่ 4 จะเป็นเรื่อง เกี่ยวกับวงจรถูกที่ควอดแดนท์และวงจรถูกโหมดแรงดันที่สร้างจากวงจรถูกโหมดแรงดัน โดย จะกล่าวถึง วงจรถูกที่ควอดแดนท์โหมดแรงดันที่สร้างจากวงจรถูกโหมดแรงดัน วงจรถูกโหมด แรงดันที่สร้างจากวงจรถูกโหมดแรงดัน ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรถูก โปรแกรม Pspice และบทสรุป ในบทที่ 5 จะเป็นเรื่องเกี่ยวกับวงจรถูกที่ควอดแดนท์โหมดกระแส ที่สร้างจากวงจรถูกโหมดกระแสโดยจะกล่าวถึง วงจรถูกกำลังโหมดกระแสโดยใช้มอสเฟต วงจรถูกที่ควอดแดนท์โหมดกระแสที่สร้างจากวงจรถูกโหมดกระแส ผลการทดลองจากการเลียนแบบ การทำงานของวงจรถูกโปรแกรม Pspice และบทสรุป ในบทที่ 6 จะเป็นบทสรุปของวิทยานิพนธ์

1.5 บทสรุป

ในปัจจุบันงานด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นได้รับความสนใจและพัฒนาขึ้นอย่าง รวดเร็ว ได้มีการนำเทคโนโลยีของ CMOS เข้ามาแทนที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เนื่องจากมีข้อได้ เปรียบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในหลายๆ ด้าน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงวงจรถูกซึ่งนำมาใช้ใน งานด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นที่มีโครงสร้างแบบ CMOS ซึ่งได้แก่วงจรถูกทั้งในโหมด แรงดันและกระแส การประยุกต์ใช้งานวงจรถูกโหมดแรงดันเป็นวงจรถูกและวงจรถูกที่ควอด แดนท์โหมดแรงดันและการประยุกต์ใช้งานวงจรถูกโหมดกระแสเป็นวงจรถูกที่ควอดแดนท์ โหมดกระแส ซึ่งในแต่ละวงจรถูกจะมีการทดสอบวงจรถูกโดยทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรถูก โปรแกรม Pspice

บทที่ 2

ความเป็นมาและทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต

2.1 ความเป็นมาและวิวัฒนาการของมอสเฟต [12]

ปัจจุบัน MOS ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ 20 ปีก่อนซึ่งยังถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ในค่านสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) MOS หรือ MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) หรืออาจเรียกว่า IGFET (Insulated-Gate FET) มีลักษณะรูปแบบพื้นฐานโครงสร้างเข้าใจได้ง่าย และข้อได้เปรียบอื่นๆ อีกหลายประการ เมื่อเปรียบเทียบกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จึงทำให้เริ่มมีความสนใจกระบวนการผลิต MOS มากขึ้นเป็นลำดับ

ตามวารสารสิ่งตีพิมพ์ที่เคยรายงานไว้พบว่า ผู้ซึ่งพยายามที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์มีการทำงานโดยผลของสนามไฟฟ้าเป็นครั้งแรกคือ J.E. Lilienfeld ในปี ค.ศ.1930 หลังจากนั้น O.Heil ได้เปิดเผยการค้นพบนี้อย่างชัดเจนปี ค.ศ.1935 และการทำงานเป็นครั้งแรกของสิ่งประดิษฐ์ที่มีรูปเป็นยูนิโพลาร์ (Unipolar) หรือการทำให้ทรานซิสเตอร์มีการทำงานโดยผลของสนามไฟฟ้า (field Effect Transistor) ซึ่งถูกพัฒนาในห้องทดลองของ Bell-Telephone โดย J. Bardeen และ W.H. Brattian ในปี ค.ศ.1948 ก็สำเร็จขึ้น และจากการสังเกตของนักวิทยาศาสตร์เท่าที่ผ่านมาซึ่งได้ศึกษากับผลของการที่จะพยายามทำให้กระแสซึ่งไหลผ่านจุดเชื่อมต่อ (Contact) ซึ่งกันบนเจอร์มาเนียม (Germanium) ให้เบาบางลง การค้นคว้านี้เป็นแนวทางในการพัฒนาหาจุดเชื่อมต่อบนทรานซิสเตอร์ แต่ก็ยังเป็นเพียงการที่สามารถใช้ผลของสนามไฟฟ้า (Field Effect) ในการควบคุมได้เล็กน้อยเท่านั้น (กระแสยังสามารถไหลผ่านได้เป็นส่วนใหญ่) ซึ่งทำให้หนทางในการที่จะพัฒนาเป็นไปสู่ FET ต้องหยุดชะงักลงเกือบทั้งสิ้น

ในปี ค.ศ. 1952 W. Shockley ได้อธิบายถึงการทำงานของ JFET (Junction FET) โดยการควบคุมจากขั้วไฟฟ้าให้เกิดไบอัสย้อนกลับที่จุดเชื่อมต่อเป็นผลสำเร็จ ภายหลังจากนั้น JFET ได้ถูกสร้างขึ้นและทดสอบตามรูปแบบของ G.C. Dacey และ L.M. Ross ผู้ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์และคิดวิธีแสดงออกในรูปสมการของ FET ปฏิบัติต่อจนเป็นผลสำเร็จในปี ค.ศ. 1953 อย่างไรก็ตามในสมัยแรกๆ ความพยายามในการที่จะประดิษฐ์ MOSFET ยังไม่ประสบผลสำเร็จเพราะเนื่องจากว่าขาดการควบคุมที่ดี

ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ครั้งสำคัญ ในกระบวนการของสารกึ่งตัวนำเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1960 ด้วยการพัฒนากระบวนการของซิลิคอนพลาแนร์ (Silicon Planar) และ MOSFET ถูกสร้างและเริ่มใช้งานเป็นครั้งแรกโดย D. Kahang และ M.M. Atlla หลังจากนั้น MOSFET ก็เริ่มเข้ามามีบทบาทแทนหลอดสูญญากาศ (Vacuum Tube) ซึ่งขณะนั้นมีราคาแพงมาก หรือใช้แทนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และในปี ค.ศ. 1964 MOSFET สามารถผลิตเป็น IC ได้ง่ายขึ้น กระทั่งราวปี ค.ศ. 1967 ความนิยมของ MOS ได้รับความสนใจมากขึ้นเป็นลำดับถึงปัจจุบัน การพัฒนาสามารถก้าวไปสู่ความสำเร็จในการลดขนาดของ MOS ให้มีขนาดเล็กลงมาก ๆ กระทั่งสามารถสร้างให้มีจำนวนทรานซิสเตอร์ได้มากถึงหลายแสนตัวต่อชิปได้ ซึ่งเป็นลักษณะของ VLSI (Very Large Scale Integration)

2.2 เปรียบเทียบข้อดีและเสียระหว่างมอสเฟตกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ [6],[16]

2.2.1 ข้อดี ของมอสเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

1. ต้องการขั้นตอนการผลิตประมาณ 25% เมื่อเทียบกับกระบวนการสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ก็เนื่องจากการออกแบบสร้าง MOSFET มีโครงสร้างและกระบวนการที่ง่ายทำให้ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ (Low Cost)
2. สิ่งประดิษฐ์ถูกสร้างขึ้นได้มากกว่าและสามารถบรรจุหรือถูกใส่ไปในพื้นที่ที่จำกัดได้ในปริมาณมาก และปัจจุบันเหมาะสมที่จะทำเป็นวงจรร VLSI
3. ขาเดรน (Drain) และขาซอร์ส (Source) ของ MOS สามารถสลับแทนที่กันได้ ซึ่งการทำงานยังคงไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเพราะเนื่องจากว่า MOS มีความสมมาตร (Bilaterally Symmetric) ซึ่งแตกต่างกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ไม่สามารถจะสลับระหว่างขาอีมิเตอร์ (Emitter) กับขาคอลเลกเตอร์ (Collector) ได้เพราะปริมาณการโด๊ปสารกึ่งตัวนำที่อีมิเตอร์กับคอลเลกเตอร์จะไม่เท่ากัน โดยสารกึ่งตัวนำที่อีมิเตอร์จะมีปริมาณการโด๊ปที่สูงกว่า ซึ่งถ้าทำการสลับขาจะทำให้อัตราขยาย (Gain) ลดลงอย่างมาก
4. กระแสที่ไหลใน MOSFET เป็นกระแสของพาหะชนิดเดียวคือ โฮล (Hole) หรืออิเล็กตรอน (Electron) ซึ่งโฮลเป็นกระแสพาหะใน PMOS ส่วนอิเล็กตรอนเป็นกระแสพาหะใน NMOS ดังนั้นจึงเรียกสิ่งประดิษฐ์นี้ว่า ยูนิโพลาร์ ซึ่งแตกต่างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เช่นทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ที่มีอิเล็กตรอน (กระแสคอลเลกเตอร์) เป็นกระแสของพาหะส่วนใหญ่ (Majority Carrier) และมีโฮล (กระแสเบส) เป็นกระแสพาหะส่วนน้อย (Minority Carrier) เกิดขึ้นพร้อมกัน

5. ความต้านทานอินพุตมีค่าสูง (High-Input Impedance) เนื่องจากว่าขาเกต (Gate) ซึ่งเป็นด้านอินพุตมี SiO_2 เป็นฉนวนกั้นกระแสดีซี ดังนั้นความต้านทานอินพุตจึงมีค่ามากกว่า 10^{14} โอห์ม

6. เนื่องจากความต้านทานอินพุตมีค่าสูงนี้เองทำให้ MOSFET จึงมีการทำงานโดยการให้แรงดันควบคุม (Voltage-Controlled) ซึ่งต่างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีการทำงานโดยใช้กระแสควบคุม (Current-Controlled)

7. เนื่องจาก MOSFET มีการทำงานโดยการให้แรงดันควบคุม จึงทำให้สามารถขับ (Drive) MOSFET ตัวอื่น ๆ ได้มีจำนวนมากซึ่งมีค่าแฟนเอาต์สูง (High Fan-out) และมีอัตราสูญเสียกำลังอินพุตที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำมาก

8. ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกระแส (Thermal Runaway) ภายใน MOSFET มีค่าน้อยมาก นั่นคือถ้าอุณหภูมิมียุ่เพิ่มสูงขึ้นกระแสที่ไหลผ่าน MOS จะมีค่าค่อนข้างคงที่จึงไม่เกิดการเสียหายเนื่องจากผลทางความร้อน ต่างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่ง เมื่ออุณหภูมิมียุ่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้มีกระแสไหลเพิ่มขึ้น ผลอันนี้เองจะทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานที่กระแสสูง ๆ จึงต้องมีพีวส์คอยป้องกันการไหลเกินของกระแสเพื่อไม่ให้ทรานซิสเตอร์เสียหาย ซึ่งใน MOS ไม่จำเป็นต้องมีวงจรป้องกัน

9. การใช้งาน MOSFET ใช้กำลังต่ำซึ่งเป็นผลให้ถูกรบกวนทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่ำไปด้วย

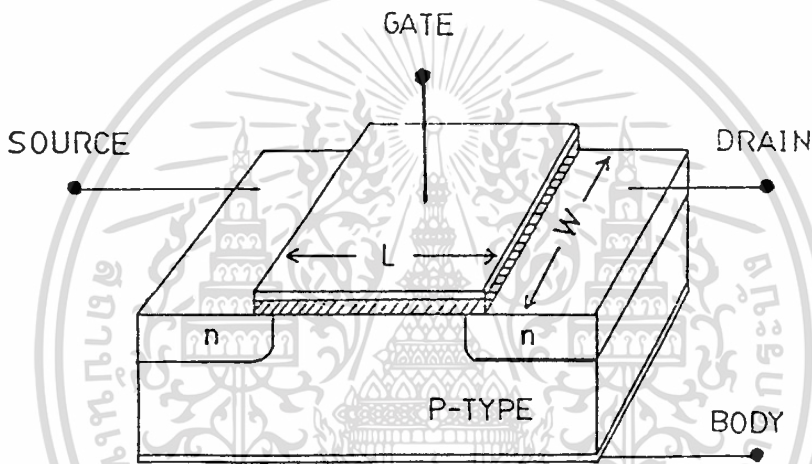
2.2.2 ข้อเสีย ของมอสเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

1. ไม่สามารถทำงานโดยใช้กระแสควบคุมได้
2. มีความเร็วในการทำงานที่ต่ำกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีค่าของคาปาซิแตนซ์ ทางด้านอินพุตที่สูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดการใช้งานทางด้านความถี่สูงแต่ปัจจุบันได้มีการใช้โพลีซิลิกอนเกตเทคโนโลยี จึงช่วยลดค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกตทำให้มีการทำงานเร็วขึ้น
3. ค่าของทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance) หรือ g_m มีค่าต่ำ
4. ในการจับหรือสัมผัส MOS จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากผลของไฟฟ้าสถิตย์อาจทำให้ชั้น SiO_2 ที่บางเสียหายได้ ซึ่งความเสียหายนี้จะเกิดขึ้นระหว่างเกตกับแชนแนล ดังนั้นจึงต้องมีการจัดทางให้ไฟฟ้าสถิตย์ลงกราวด์เสียหรือ MOS บางตัวจะมีการใส่ซีเนอร์ไดโอดระหว่างเกตกับซอสอีกทีหนึ่ง เพื่อช่วยป้องกันอุปกรณ์ที่อาจจะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงดันทรานส์เซียนท์ (Transient Voltage) จากการจับต้องวงจรขึ้นได้
5. สมการที่ใช้วิเคราะห์การทำงานของ MOSFET มีความยุ่งยากมากกว่าสมการของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ อีกทั้งการพิจารณาการทำงานของ MOSFET ยังมีหลายระดับ

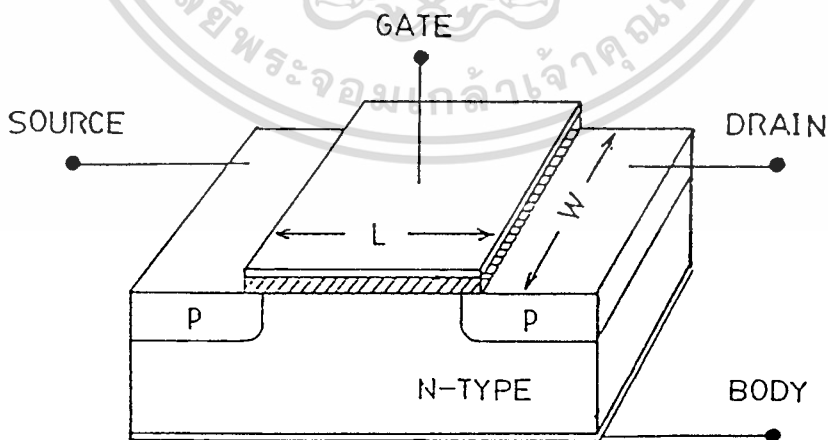
(LEVEL) อีกด้วยเช่นกัน ในโปรแกรมสำเร็จรูป PSPICE แบ่งการทำงานของ MOSFET เป็น 3 ระดับ คือ LEVEL 1, LEVEL 2 และ LEVEL 3 ดังจะแสดงรายละเอียด ในหัวข้อ 2.7

2.8 โครงสร้างและการไบอัสของมอสเฟต

มอสเฟตแบ่งชนิดตามการทำงานได้ 2 ชนิด คือ เอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟต (Enhancement MOSFET) และ ดีพลีชันมอสเฟต (Depletion MOSFET) ซึ่งแต่ละชนิดนี้สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ชนิดคือ P-Channel หรือเรียกว่า PMOS และ N-Channel หรือเรียกว่า NMOS โดยโครงสร้างของ NMOS ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ส่วนโครงสร้างของ PMOS แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ NMOS

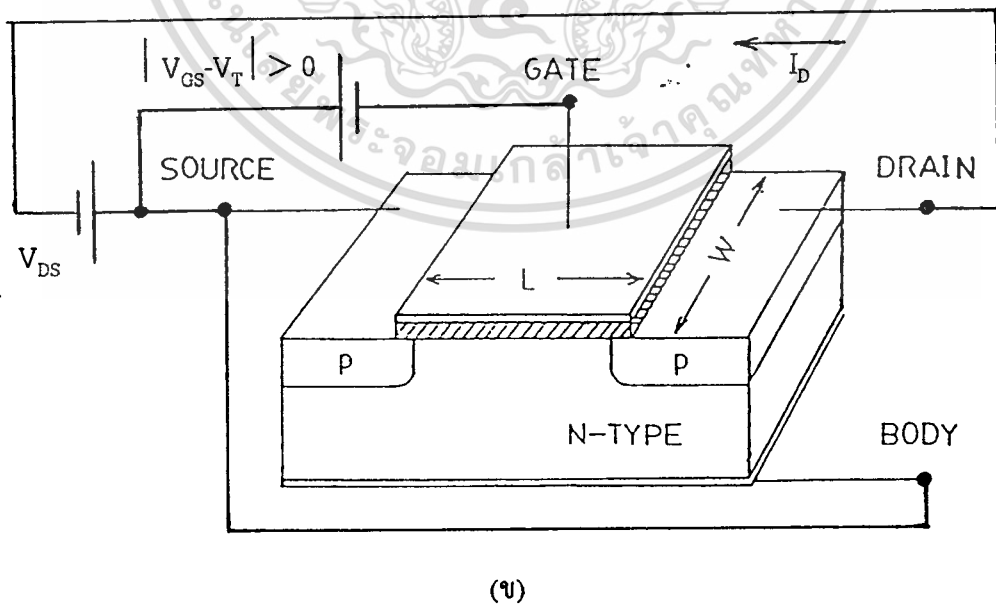
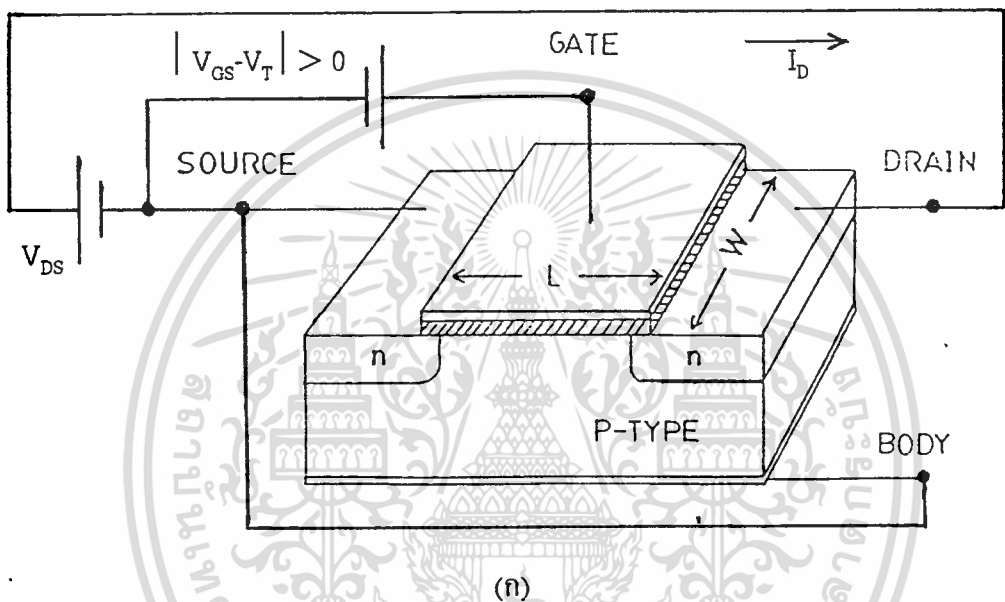


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ PMOS

NMOS ประกอบด้วยส่วนฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี (P-Type) ซึ่งมีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น 2 ชุด ถูกแพร่ลงบนฐานรอง สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนี้ถูกเรียกว่า ซอส (Source) และเดรน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Drain) บนผิวหน้าระหว่าง ซอสกับเดรน จะมีแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ส่วนบนของซิลิกอนไดออกไซด์จะมีโพลีซิลิกอนทำเป็นขาคท (Gate) ถ้าส่วนของฐานรอง ทำด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) และสารกึ่งตัวนำพีถูกแพลงบนฐานรองเป็นส่วนของซอสและเดรน โครงสร้างชนิดนี้จะเรียกว่า PMOS

ระยะห่างระหว่างสารกึ่งตัวนำที่เป็น ซอส และ เดรน เรียกว่า Channel Length (L) และความกว้างของช่องระหว่างซอสกับเดรน เรียกว่า Channel Width (W)



รูปที่ 2.3 แสดงการ ไบอัสแรงดันของ ก. NMOS ข. PMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

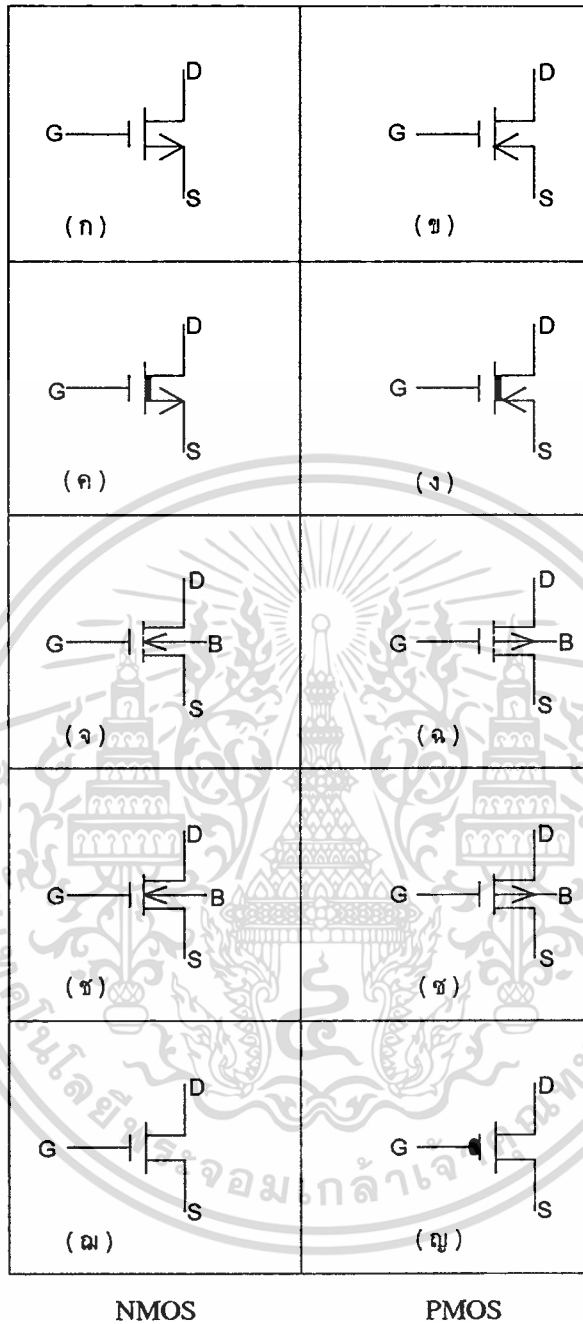
รูปที่ 2.3ก แสดงการไบอัสของ NMOS ขณะที่ให้แรงดัน $|V_{GS}-V_T| > 0$ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในฐานรองชนิดพี (P-Type Substrate) เกิดเป็นแกนแนลขึ้น เมื่อให้ไบอัสที่ขั้วเดรนเป็นบวกเทียบกับซอส กระแสอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากของซอสจะไหลไปยังเดรน เกิดเป็นกระแสเดรน ส่วนในรูปที่ 2.3ข แสดงการไบอัสของ PMOS ซึ่งจะแตกต่างกับ NMOS ที่ขั้วของแรงดันไบอัส และทิศทางการไหลของกระแสเดรนอันเกิดจากการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากของซอสไหลไปยังเดรน

2.4 สัญลักษณ์ของมอสเฟต

สัญลักษณ์ของมอสเฟตสามารถบอกให้ทราบได้ว่า เป็นมอสเฟตชนิด N-Channel หรือ P-Channel โดยดูที่หัวลูกศรที่ขาซอส ถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาขาเกตแสดงว่าเป็น PMOS ถ้าหัวลูกศรหันออกแสดงว่าเป็น NMOS หรือดูที่ทิศทางของหัวลูกศรที่ขาฐานรอง ถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาขาเกตแสดงว่าเป็น NMOS ถ้าหัวลูกศรหันออกแสดงว่าเป็น PMOS หรือดูที่บนส่วนของเกต ถ้ามีวงกลมเล็กๆกันอยู่แสดงว่าเป็น PMOS และถ้าไม่มีแสดงว่าเป็น NMOS สัญลักษณ์ของมอสเฟต ยังสามารถบอกได้อีกว่ามอสเฟตเป็นชนิดเอ็นฮานสมท์มอสเฟต หรือดีพลีชันมอสเฟตอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.4

โดยในรูปที่ 2.4 จะแสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่าง ๆ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4(ก) และ 2.4(ฉ) คือ Enhancement NMOS เมื่อโวลต์เตจระหว่างฐานรองและซอส (V_{BS}) เป็นศูนย์ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4(ข) และ 2.4(ญ) คือ Enhancement PMOS เมื่อ $V_{BS} = 0$ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4(ค) คือ Depletion NMOS เมื่อ $V_{BS} = 0$ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4(ง) คือ Depletion PMOS เมื่อ $V_{BS} = 0$ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4(จ) คือ Enhancement NMOS เมื่อ $V_{BS} \neq 0$ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4(ฉ) คือ Enhancement PMOS เมื่อ $V_{BS} \neq 0$ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4(ช) คือ Depletion NMOS เมื่อ $V_{BS} \neq 0$ และสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4(ซ) คือ Depletion PMOS เมื่อ $V_{BS} \neq 0$

เพื่อไม่ให้เกิดการสับสนเกี่ยวกับสัญลักษณ์ที่ใช้ จึงแบ่งกลุ่มสัญลักษณ์ในการใช้แสดงออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 รูป 2.4(ก)-(ง) กลุ่มที่ 2 คือรูป 2.4(จ)-(ซ) และ กลุ่มที่ 3 คือรูปที่ 2.4(ฉ)-(ญ)

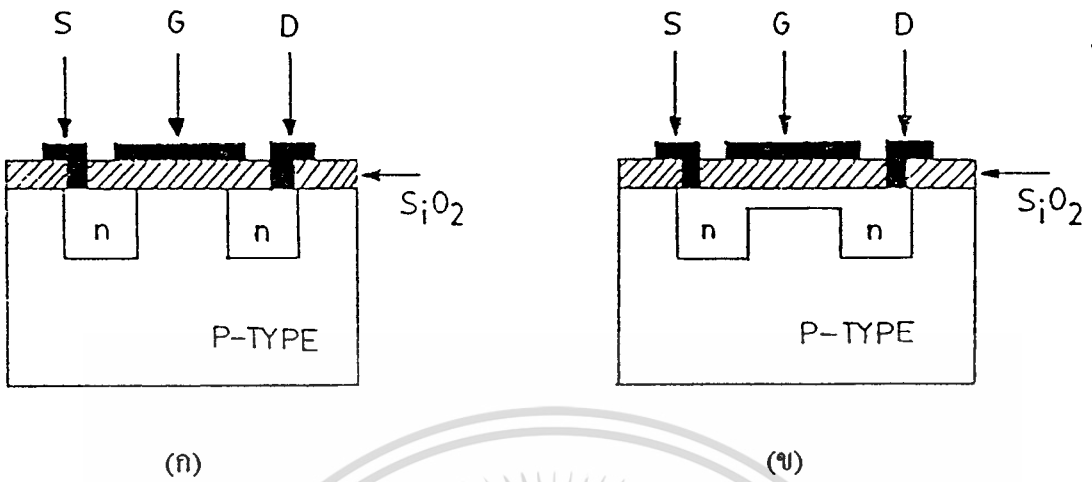


รูปที่ 2.4 แสดงสัญลักษณ์แบบต่างๆของมอสเฟต

2.5 ชนิดของมอสเฟต

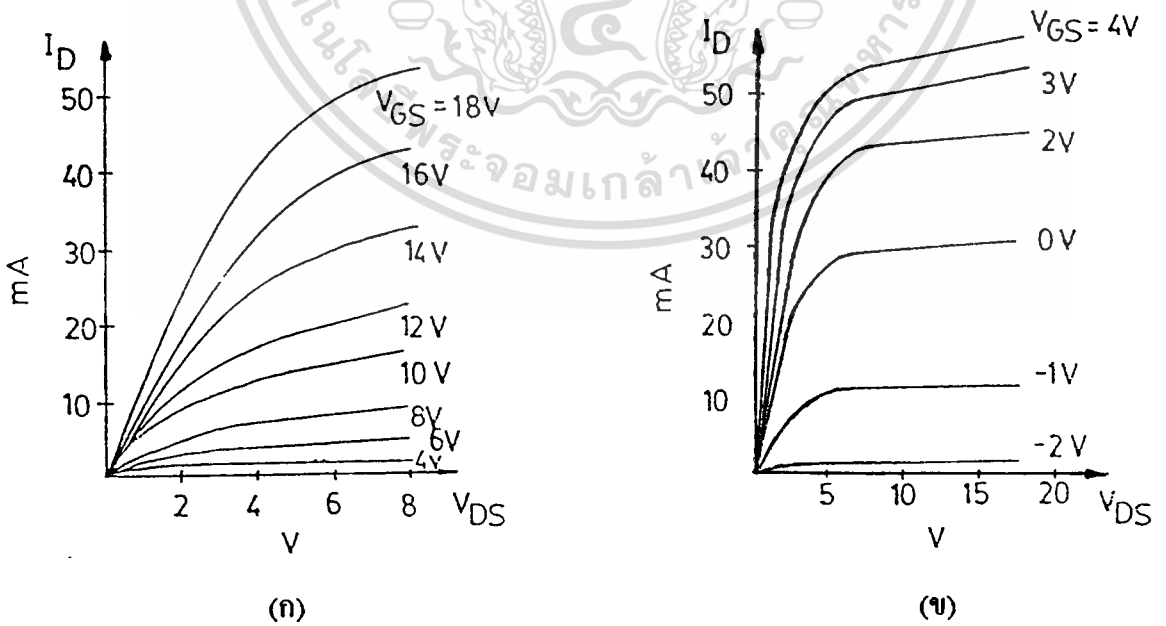
มอสเฟตแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ เอ็นชานเมทโทมดมอสเฟต หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า E-MOSFET และดีพลีชันโทมดมอสเฟต หรือเรียกว่า D-MOSFET รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของมอสเฟตชนิดเอ็น-แชนแนลทั้ง 2 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอสเฟตชนิด เอ็น-แชนแนล ก. E-MOSFET ข. D-MOSFET

จากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างของ D-MOSFET จะคล้ายกับ E-MOSFET จะแตกต่างกันตรงที่ช่องระหว่างซอสกับเดรนของ D-MOSFET มีการแพร่สารเอ็นอยู่ ดังนั้นจึงมีกระแสไหลระหว่างเดรนกับซอสเมื่อความต่างศักย์ที่เดรนเป็นบวกเทียบกับซอส และความต่างศักย์ระหว่างเกตกับซอสเป็นศูนย์ ($V_{GS} = 0$) เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นลบ กระแสเดรนจะลดลง แต่ถ้า V_{GS} มีค่าเป็นบวกกระแส



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟคุณสมบัติของ NMOS ก.E-MOSFET ข.D-MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดรนจะไหลเพิ่มขึ้นส่วนการทำงานของ E-MOSFET จะไม่มีกระแสไหลระหว่างเดรนกับซอส เมื่อความต่างศักย์ที่เดรนเป็นบวกเทียบกับซอสและความต่างศักย์ระหว่างเกตกับซอสเป็นศูนย์ ถ้าให้ V_{GS} มีค่าเป็นบวก จะทำให้เกิดกระแสเดรนไหล ยิ่งให้ V_{GS} มีค่าเป็นบวกมากขึ้นก็จะทำให้กระแสเดรนไหลมากขึ้น รูปที่ 2.6 แสดงกราฟคุณสมบัติของ E-MOSFET และ D-MOSFET

2.6 คุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต

การทำงานของมอสเฟตเป็นลักษณะใช้ศักย์ไฟฟ้าควบคุมปริมาณของกระแส สมการของมอสเฟตถูกคิดขึ้นโดย Sah [3] และ Shichman and D-Hodges [8] เมื่อปี 1964 เพื่อแสดงคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$I_D = \frac{KW}{L} \left((V_{GS} - V_T) - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \quad \text{เมื่อ } V_{GS} \geq V_T \quad (2.1)$$

โดยที่ K' คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance) มีค่าเท่ากับ $\mu_0 C_{OX}$

μ_0 คือ ค่าความคล่องของโฮลหรืออิเล็กตรอน

C_{OX} คือ ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์
(Capacitance Per Unit Area Of The Gate Oxide)

W คือ ความกว้างของแชนแนล (Channel Width)

L คือ ความยาวของแชนแนล (Channel Length)

V_{GS} คือ ความต่างศักย์ระหว่างเกตกับซอส

V_T คือ แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage)

V_{DS} คือ ความต่างศักย์ระหว่างเดรนกับซอส

I_D คือ กระแสเดรน

สำหรับการออกแบบวงจรในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ E-MOSFET ในการออกแบบซึ่งมีการทำงานแบ่งเป็น 3 ช่วง โดยแต่ละช่วงการทำงานจะขึ้นอยู่กับค่า $(V_{GS} - V_T)$ และค่า V_{DS} สำหรับ NMOS ถ้า $(V_{GS} - V_T)$ เป็นศูนย์หรือเป็นค่าลบ มอสเฟตจะอยู่ในช่วงไม่นำกระแส (Cutoff)

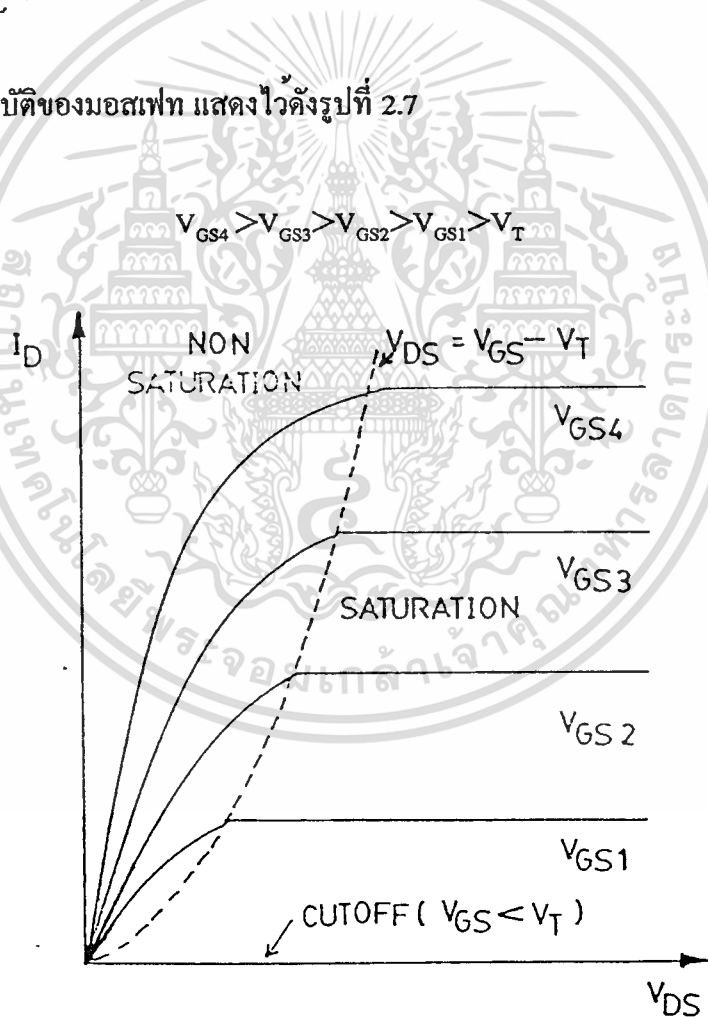
$$I_D = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad (V_{GS} - V_T) \leq 0 \quad (2.2)$$

ในช่วงไม่นำกระแสนี้ ช่องนำกระแสจะทำตัวเหมือนวงจรเปิด (Open Circuit) ถ้า $(V_{GS} - V_T) > 0$ และ $0 < (V_{DS}) < (V_{GS} - V_T)$ แล้วมอสเฟตจะอยู่ในช่วงของการนำกระแสไม่อิ่มตัว (Non-Saturation) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_D กับแรงดัน V_{DS} จะแสดงได้ดังสมการ (2.1)

ถ้า $(V_{GS} - V_T) > 0$ และ $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_T)$ แล้วมอสเฟต จะทำงานในช่วงของการนำกระแสอิ่มตัว (Saturation) ทำให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_D กับแรงดัน V_{DS} แสดงได้ดังสมการ (2.3)

$$I_D = \frac{KW}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.3)$$

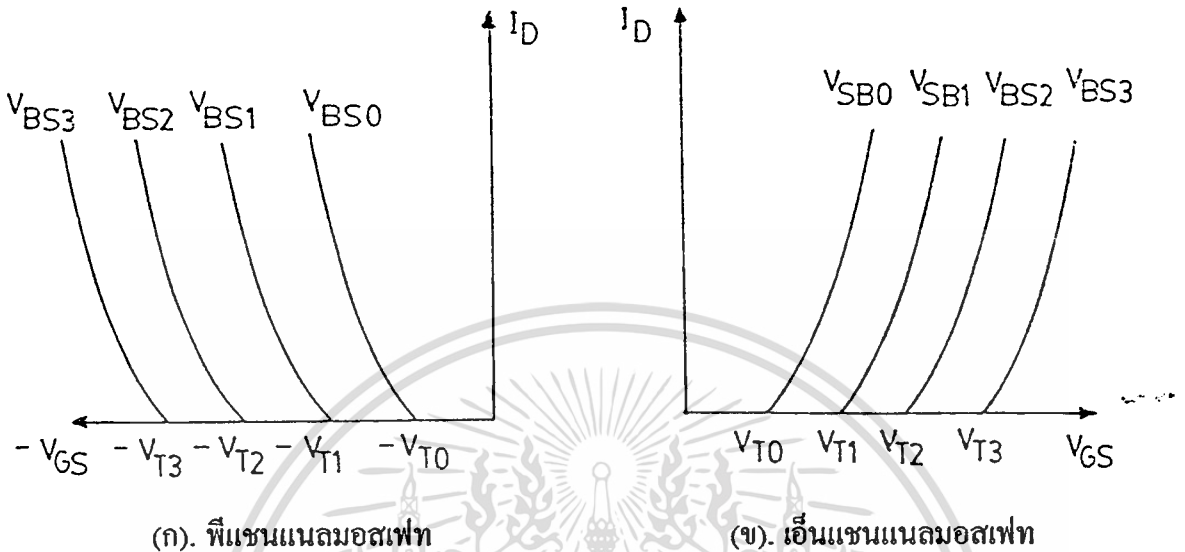
กราฟแสดงคุณสมบัติของมอสเฟต แสดงไว้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอสเฟต

$$V_{BS3} > V_{BS2} > V_{BS1} > 0$$

$$V_{SB3} > V_{SB2} > V_{SB1} > 0$$



(ก). พีแซนแนลมอสเฟต

(ข). เอ็นแซนแนลมอสเฟต

รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{GS}

คุณสมบัติของมอสเฟตที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{GS} โดยใช้สมการที่ (2.3) ดังรูปที่ 2.8 คุณสมบัติของมอสเฟตแบบนี้ถูกเรียกว่า ทรานส์คอนดักแตนซ์ จากรูปที่ 2.8 เป็นการแสดงผลของศักดาระหว่างขอสกับฐานรอง (V_{SB}) ขณะที่ V_{SB} มีการเพิ่มขึ้น ค่าของแรงดันขีดเริ่ม (V_T) สำหรับมอสเฟตแบบเอ็นแซนแนลจะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ค่าของ V_{GS} ที่จะทำให้กระแส I_D ไหลลงที่ ที่ค่าหนึ่งเพิ่มขึ้นตามด้วย แต่สำหรับมอสเฟตแบบพีแซนแนล ขณะที่ V_{SB} มีการเพิ่มขึ้น ค่าของแรงดันขีดเริ่ม (V_T) จะมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าของ V_{GS} ที่จะทำให้ค่ากระแส I_D ไหลลงที่ มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น

2.7 แบบจำลองของมอสเฟต [15]

ในปัจจุบันนี้ได้มีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป วิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจร ต่างๆกันอย่างกว้างขวาง โปรแกรม Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) เป็นโปรแกรมหนึ่งซึ่งถูกใช้มากและเป็นที่ยอมรับ โปรแกรมนี้ถูกคิดค้นและพัฒนาจาก มหาวิทยาลัย Berkeley ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย (California) ประเทศสหรัฐอเมริกา ในโปรแกรม Spice ได้แบ่งรูปแบบจำลอง (Model) การทำงานของมอสเฟตออกเป็น 3 รูปแบบคือ LEVEL 1, LEVEL 2 และLEVEL 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LEVEL 1 เป็นแบบจำลองการทำงานของมอสเฟตแบบพื้นฐานที่มีความยาวของแชนแนลมากกว่า 10 ไมครอนขึ้นไป ให้ประโยชน์เพื่อยืนยันความเป็นจริงที่จะไม่เกิดความผิดพลาด (Error) ขึ้นถึงแม้จะใช้การคำนวณด้วยมือหรือจากเครื่องคิดเลข

LEVEL 2 มีความถูกต้องมากกว่า LEVEL 1 คือ โมเดลนี้ออกแบบมาเพื่อปรับปรุงแก้ไขพฤติกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์ที่มีขนาดแชนแนลเล็ก ซึ่งมีความยาวของแชนแนลหรือ L น้อยกว่า 3 ไมครอน ซึ่งเป็นลักษณะ Short Channel Effects ที่เกิดขึ้นในการพิจารณาใน 1 มิติ (One-Dimensional) หรือถ้าพิจารณาใน 2 มิติ (Two-Dimensional) จะคำนึงถึงผลของอุปกรณ์ที่มีความกว้างแชนแนลหรือ W น้อยกว่า 4 ไมครอน ซึ่งเป็นผลของ Narrow-Width Effect ที่เกิดขึ้นจากผลกระทบบนอุปกรณ์ที่มีขนาดแชนแนลเล็กดังที่กล่าวมาเป็นผลรวมที่เรียกว่า Second-Order Effects และอีกประการหนึ่งใน LEVEL 2 จะใช้เวลาที่ CPU คำนวณการเปลี่ยนแปลงการทำงานของ MOSFET ระหว่างช่วงการนำกระแสอิ่มตัวและช่วงการนำกระแสไม่อิ่มตัวมากขึ้น เพราะประกอบด้วย Rooting Routine ของสมการซึ่งมีความซับซ้อนอยู่จำนวนมาก (สมการดังกล่าว ไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วยมือ หรือเครื่องคิดเลขได้)

LEVEL 3 เป็นแบบจำลองการทำงานของมอสเฟต ซึ่งออกแบบขึ้นโดยอาศัยผลจากการทดลอง, การสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและประสบการณ์ความชำนาญ (Semi-Empirical) เพื่อปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสม (พารามิเตอร์จะไม่แน่ชัด เข้าใจได้ยาก พารามิเตอร์อาจจะต้องมีการปรับปรุงให้ดีขึ้นเพื่อความเหมาะสมอยู่เสมอ) ใน LEVEL 3 ได้มีการลดเวลาการคำนวณความเปลี่ยนแปลงระหว่างรอยต่อของช่วงการนำกระแสอิ่มตัว และช่วงการนำกระแสไม่อิ่มตัว

2.8 ผลของอุณหภูมิในมอสเฟต (Temperature Effect in MOSFET) [14],[23]

ผลของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงมีผลให้กระแสเดรนในมอสเฟตมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากว่ามีพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ตัว ที่มีผลขึ้นกับอุณหภูมิซึ่งได้แก่

2.8.1. ค่าของสภาพความคล่องตัว หรือ μ ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิดังสมการ (2.4) โดยที่ค่าของ T_r ในสมการเป็นค่าของอุณหภูมิห้อง (Room Absolute Temperature) และ K_3 เป็นค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 จากสมการจะพบว่า $\mu(T)$ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

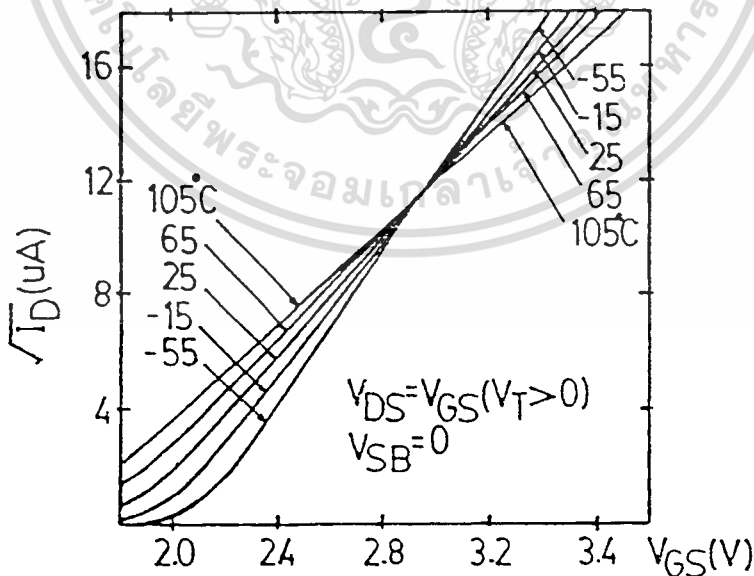
$$\mu(T) = \mu(T_r) \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^{-K_3} \quad (2.4)$$

2.8.2. ค่าของแรงดันขีดเริ่ม หรือ V_T ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแสดงในสมการที่ (2.5) โดยมีค่าของ K_4 เป็นค่าคงที่ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 mV/K (มิลลิโวลท์ต่อเคลวิน) ถึง 4 mV/K จากสมการจะพบว่าค่า $V_T(T)$ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

$$V_T(T) = V_T(T_r) - K_4(T - T_r) \quad (2.5)$$

ตัวอย่างหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนของ MOSFET ที่มีการทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation Region) กับผลของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9

จากรูป 2.9 จะเห็นว่ากระแสเดรนมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งกราฟที่ปรากฏจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมีค่าของความชัน ($\sqrt{I_D} / V_{GS}$) ที่แตกต่างกันโดยที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าของ $\mu(T)$ และ $V_T(T)$ มีค่ามาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของ $\mu(T)$ จะมียิ่งกว่าการเปลี่ยนแปลงของ $V_T(T)$ ดังแสดงให้เห็นในสมการ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ และจากสมการที่ (2.3) จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_D ตามค่า $\mu(T)$ ได้ดังในสมการที่ (2.6) ทำให้ความชันซึ่งแสดงในสมการ (2.7) มีค่ามากเมื่ออุณหภูมิต่ำ และเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิม ค่าของ $\mu(T)$



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_D}$ กับ V_{GS} ของมอสเฟตที่มีค่าของ V_T มากกว่า ศูนย์และไบอัสให้ $V_{SB} = 0, V_{DS} = V_{GS}$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้น

และ $V_T(T)$ จะมีค่าน้อยลงทำให้ค่าความชันระหว่าง $\sqrt{I_D}$ กับ V_{GS} มีค่าน้อยลง เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อ MOS มีการทำงานในช่วงอิมิตัวที่อุณหภูมิสูง ๆ การเปลี่ยนแปลงของกระแสครั้นมีค่าเปลี่ยนไปไม่มากนักเมื่อ V_{GS} มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากอันเนื่องมาจากค่าความชันของ $(\sqrt{I_D} / V_{GS})$ มีค่าน้อย

$$\sqrt{I_D} = \sqrt{\mu(T)} \left(\frac{WC_{ox}}{2L} \right)^{1/2} (V_{GS} - V_T(T)) \quad , V_{GS} > V_T \quad (2.6)$$

ดังนั้นความชันของกราฟเป็น

$$\sqrt{I_D} / V_{GS} = \sqrt{\mu(T)} \left(\frac{WC_{ox}}{2L} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{V_T(T)}{V_{GS}} \right) \quad (2.7)$$

2.9 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงเรื่องเกี่ยวกับ MOS ทรานซิสเตอร์เป็นหลัก โดยได้กล่าวถึง ความเป็นมา โครงสร้างการทำงานและสมการที่เกี่ยวข้องเป็นสำคัญ ซึ่งในปัจจุบัน MOS ได้เข้ามามีบทบาทแทนที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และหลอดสูญญากาศมาก เนื่องจากข้อดีหลายๆข้อที่เหนือกว่าของ MOS ในบทนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของมอสเมื่อเทียบกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ส่วนในตอนท้ายของบทได้กล่าวถึงแบบจำลองของมอสเฟทที่ใช้ในการเขียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลของอุณหภูมิที่มีต่อมอสเฟท

จากวงจรพูลโหมคแรงดันในรูปที่ 3.1 จะพบว่า วงจรพูลโหมคแรงดันจะประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่างที่มีวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ โดยชุดของวงจรขยายความแตกต่างชุดที่ 1 ประกอบด้วย $M1, M2, M5, M6, I_{B1}$ ส่วนชุดของวงจรขยายความแตกต่างชุดที่ 2 ประกอบด้วย $M3, M4, M7, M8, I_{B2}$ โดยถ้าพิจารณาเพียงวงจรขยายความแตกต่างชุดที่ 1 ดังรูปที่ 3.2 จะพบว่าวงจรจะเป็นวงจรตามแรงดัน โดยแรงดันเอาต์พุต V_O จะเท่ากับแรงดันอินพุต V_1 ซึ่งในความเป็นจริงแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ได้มาจากกระแสเดรนของมอสเฟตที่ทำงานในย่านอิ่มตัว เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์หาค่าการทำงานเราจึงทำการแทนแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_{B1} ในวงจรด้วยมอสเฟต $M1$ โดยกระแสเดรนของ $M1$ จะเท่ากับกระแสเดรนของ $M2$ ซึ่งเป็นผลมาจากชุดของวงจรสะท้อนกระแส $M5$ และ $M6$ โดยผลรวมของกระแสทั้งสองจะเท่ากับ I_{B1} ดังสมการที่ (3.4) และ(3.5) ตามลำดับ

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{B1}}{2} \quad (3.4)$$

$$I_{D1} + I_{D2} = I_{B1} \quad (3.5)$$

และถ้ากำหนดให้ $V_{1(\max)}$ และ $V_{1(\min)}$ เป็นค่าของแรงดันย่านการทำงานสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นกับขาเกตของ $M1$ ซึ่งยังคงทำให้ $M1$ มีการทำงานอยู่ในย่านอิ่มตัวได้ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่า $V_{1(\max)}$ จากวงจรได้โดย

$$V_{DD} = V_{SG5} + V_{DS1} - V_{GS1} + V_1 \quad (3.6)$$

กลับสมการได้

$$V_{DS1} = V_{DD} - V_{SG5} + V_{GS1} - V_1 \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7) ค่าของ V_{DS1} ที่จะทำให้ $M1$ มีการทำงานในย่านอิ่มตัวคือ

$$V_{DS1} \geq V_{GS1} - V_{T1} \quad (3.8)$$

แทนสมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$V_{GS1} - V_{T1} \leq V_{DD} - V_{SG5} + V_{GS1} - V_1$$

จากสมการสามารถคำนวณหาค่า $V_{1(\max)}$ ได้คือ

$$V_{1(\max)} = V_{DD} - V_{SG5} + V_{T1} \quad (3.9)$$

ส่วนในการคำนวณหาค่าของ $V_{1(\min)}$ จะต้องสมมติให้การสร้างแหล่งจ่ายกระแสที่ สามารถสร้างขึ้นได้จากการไบอัสศักดาที่ขาเกตและซอสของมอสเฟต MI ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยสามารถคำนวณหาค่า $V_{1(\min)}$ ได้จาก

$$V_1 - V_{SS} = V_{GS1} + V_{DS1} \quad (3.10)$$

หรือ

$$V_{DS1} = V_1 - V_{GS1} - V_{SS} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) ค่าของ V_{DS1} ที่จะทำให้ MI มีการทำงานในย่านอิ่มตัวคือ

$$V_{DS1} \geq V_{GS1} - V_{T1} \quad (3.12)$$

แทนสมการที่ (3.12) ลงในสมการที่ (3.11) จะได้

$$V_{GS1} - V_{T1} \leq V_1 - V_{GS1} - V_{SS}$$

จากสมการสามารถคำนวณหาค่า $V_{1(\min)}$ ได้คือ

$$V_{1(\min)} = V_{GS1} + V_{GS1} - V_{T1} + V_{SS} \quad (3.13)$$

ดังนั้นย่านแรงดันทำงานของวงจรมีค่าเท่ากับ $V_{1(\max)} - V_{1(\min)}$ คือ

$$= V_{DD} - V_{SS} - V_{GS1} - V_{GS1} - V_{SG5} + V_{T1} + V_{T1} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (2.3) เป็นสมการกระแสเดรนของมอสเฟตที่มีการทำงานในช่วงอิ่มตัว เขียน สมการใหม่ให้ V_{GS} อยู่ในรูปของกระแสเดรนสำหรับมอสเฟตตัวใดๆ ได้เป็น

$$V_{GS} = \left(\frac{2I_D}{B} \right)^{1/2} + V_T \quad ; \text{ เมื่อ } B = KW / L \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนค่า V_{GS} ของมอสเฟตในสมการที่ (3.14) ให้อยู่ในรูปของกระแสเดรนโดยเทียบกับสมการที่ (3.15) จะได้

$$V_{I(\max)} - V_{I(\min)} = V_{DD} - V_{SS} - \left(\left(\frac{2I_{D1}}{B_1} \right)^{1/2} + V_{T1} \right) - \left(\left(\frac{2I_{D1}}{B_1} \right)^{1/2} + V_{T1} \right) - \left(\left(\frac{2I_{D5}}{B_5} \right)^{1/2} + |V_{T5}| \right) + V_{T1} + V_{T1}$$

$$= V_{DD} - V_{SS} - \left(\frac{2I_{D1}}{B_1} \right)^{1/2} - \left(\frac{2I_{D1}}{B_1} \right)^{1/2} - \left(\frac{2I_{D5}}{B_5} \right)^{1/2} - |V_{T5}| \quad (3.16)$$

ซึ่งจะพบได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} I_{D1} &= I_{B1} \\ I_{D1} &= I_{B1} / 2 \\ I_{D5} &= I_{B1} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

แทนสมการที่ (3.17) ในสมการที่ (3.16) และให้ $B = KW/L$ จะได้ความกว้างของย่านแรงดันที่ทำงาน

$$V_{I(\max)} - V_{I(\min)} = V_{DD} - V_{SS} - \left(\frac{2I_{B1}}{K_1 W_1} \right)^{1/2} - \left(\frac{I_{B1}}{K_1 W_1} \right)^{1/2} - \left(\frac{I_{B1}}{K_5 W_5} \right)^{1/2} - |V_{T5}| \quad (3.18)$$

ซึ่งในรูปที่ 3.2 เป็นวงจรมตามแรงดัน เพราะฉะนั้น

$$V_{I(\max)} = V_{O(\max)}$$

$$V_{I(\min)} = V_{O(\min)}$$

แต่ V_O ในทางปฏิบัติของวงจรมตามแรงดันเท่ากับ $V_1 + V_2 - V_3$ และในวงจรม ค่าอัตราส่วน W/L ของ M1-M4 เท่ากัน และค่าอัตราส่วน W/L ของ M5-M8 เท่ากัน เพราะฉะนั้นสามารถประมาณได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{O(\max)} = (V_1 + V_2 - V_3)_{(\max)} \approx V_{1(\max)} \tag{3.19}$$

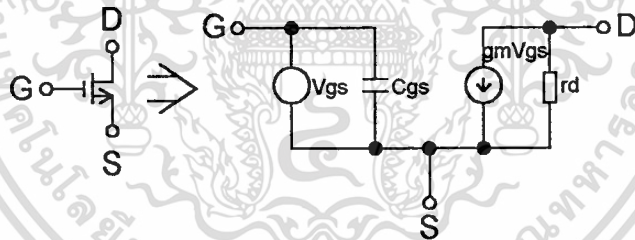
$$V_{O(\min)} = (V_1 + V_2 - V_3)_{(\min)} \approx V_{1(\min)} \tag{3.20}$$

และความกว้างของย่านแรงดันทำงานเอาต์พุตของวงจรพูลโหมตแรงดันจะได้

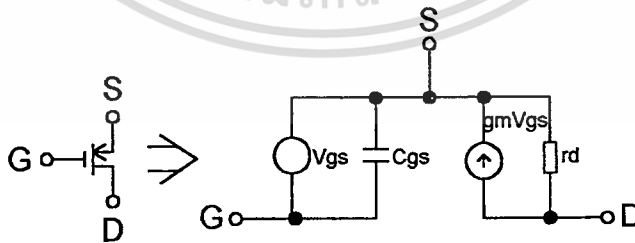
$$V_{O(\max)} - V_{O(\min)} \cong V_{DD} - V_{SS} - \left(\frac{2I_{B1}}{\frac{K_1 W_1}{L_1}} \right)^{1/2} - \left(\frac{I_{B1}}{\frac{K_1 W_1}{L_1}} \right)^{1/2} - \left(\frac{I_{B1}}{\frac{K_5 W_5}{L_5}} \right)^{1/2} - |V_{T5}| \tag{3.21}$$

3.2.2 การวิเคราะห์ห้าย่านการตอบสนองความถี่ของวงจร

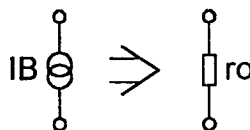
ในการวิเคราะห์ห้าย่านการตอบสนองความถี่ของวงจรมูลค่า จะต้องเปลี่ยนวงจรให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลย์ โดยวงจรสมมูลย์ของมอสเฟตแบบ N-ch มอสเฟตแบบ P-ch และแหล่งจ่ายกระแสคงที่จะแสดงในรูปที่ 3.3



(ก) มอสเฟตแบบ N-ch และวงจรสมมูลย์



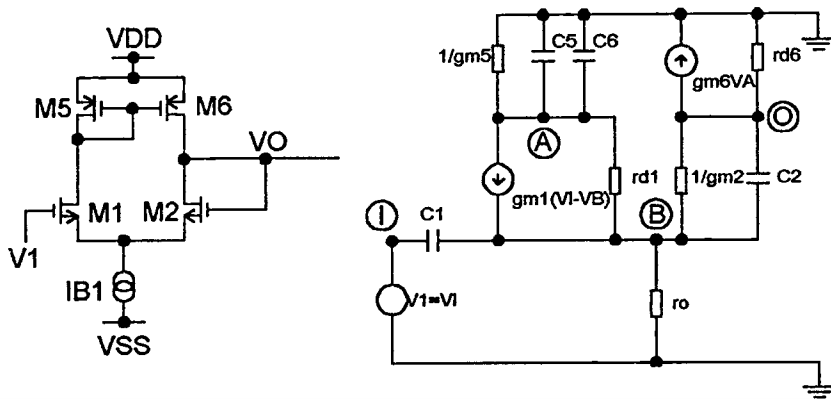
(ข) มอสเฟตแบบ P-ch และวงจรสมมูลย์



(ค) แหล่งจ่ายกระแสคงที่และวงจรสมมูลย์

รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลย์ของมอสเฟตแบบ N-ch มอสเฟตแบบ P-ch และแหล่งจ่ายกระแสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วงจรชุดที่ 1 ของวงจรพูล (ข) วงจรสมมูลของวงจรชุดที่ 1 ของวงจรพูล

รูปที่ 3.4 วงจรชุดที่ 1 ของวงจรพูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราเกาตอบสนองความถี่ของวงจรและวงจรสมมูล

จากรูปที่ 3.4 พิจารณาที่วงจรสมมูลที่โหนด A โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้

$$V_A(g_{d1} + g_{m5} + SC_5 + SC_6) - V_B g_{d1} = -g_{m1}(V_I - V_B) \quad (3.22)$$

โหนด B โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้

$$\begin{aligned} V_B(g_{d1} + g_o + g_{m2} + SC_1 + SC_2) - V_A g_{d1} - V_I SC_1 - V_O(g_{m2} + SC_2) \\ = g_{m1}(V_I - V_B) \end{aligned} \quad (3.23)$$

โหนด O โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้

$$V_O(g_{d6} + g_{m2} + SC_2) - V_B(g_{m2} + SC_2) = -g_{m6}V_A \quad (3.24)$$

โหนด I โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้

$$V_I SC_1 - V_B SC_1 = 0 \quad (3.25)$$

จากสมการที่ (3.25) ได้

$$V_I = V_B \quad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (3.26) ลงในสมการที่ (3.22) ได้

$$V_A = \frac{V_I g_{d1}}{(g_{d1} + g_{m5} + SC_5 + SC_6)} \quad (3.27)$$

แทนสมการที่ (3.26) และสมการที่ (3.27) ในสมการที่ (3.24)

$$V_O(g_{d6} + g_{m2} + SC_2) - V_I(g_{m2} + SC_2) = \frac{-g_{m6} V_I g_{d1}}{(g_{d1} + g_{m5} + SC_5 + SC_6)} \quad (3.28)$$

นำ V_I หารตลอด

$$\begin{aligned} \frac{V_O}{V_I}(g_{d6} + g_{m2} + SC_2) - (g_{m2} + SC_2) &= \frac{-g_{m6} g_{d1}}{g_{d1} + g_{m5} + SC_5 + SC_6} \\ \frac{V_O}{V_I} &= \frac{(g_{m2} + SC_2) - \frac{g_{m6} g_{d1}}{(g_{d1} + g_{m5} + SC_5 + SC_6)}}{(g_{d6} + g_{m2} + SC_2)} \\ &= \frac{(g_{m2} + SC_2)}{(g_{d6} + g_{m2} + SC_2)} - \frac{g_{m6} g_{d1}}{(g_{d1} + g_{m5} + SC_5 + SC_6)(g_{d6} + g_{m2} + SC_2)} \\ &= \frac{(g_{m2}(g_{d1} + g_{m5}) - g_{m6} g_{d1}) + S(g_{m2}(C_5 + C_6) + C_2(g_{d1} + g_{m5})) + S^2(C_2 C_5 + C_2 C_6)}{(g_{d1}(g_{d6} + g_{m2}) + g_{m5}(g_{d6} + g_{m2}))} \\ &= \frac{1 + S \left(\frac{(C_2(g_{d1} + g_{m5}) + C_5(g_{d6} + g_{m2}) + C_6(g_{d6} + g_{m2}))}{(g_{d1}(g_{d6} + g_{m2}) + g_{m5}(g_{d6} + g_{m2}))} \right) + \frac{S^2(C_2 C_5 + C_2 C_6)}{(g_{d1}(g_{d6} + g_{m2}) + g_{m5}(g_{d6} + g_{m2}))}}{1} \end{aligned} \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.29)

$$T_1 = \left(\frac{(C_2(g_{d1} + g_{m5}) + C_5(g_{d6} + g_{m2}) + C_6(g_{d6} + g_{m2}))}{(g_{d1}(g_{d6} + g_{m2}) + g_{m5}(g_{d6} + g_{m2}))} \right)$$

โดย

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi T_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{-3db} = \frac{g_{d1}(g_{d6} + g_{m2}) + g_{m5}(g_{d6} + g_{m2})}{2\pi(C_2(g_{d1} + g_{m5}) + C_3(g_{d6} + g_{m2}) + C_6(g_{d6} + g_{m2}))} \quad (3.30)$$

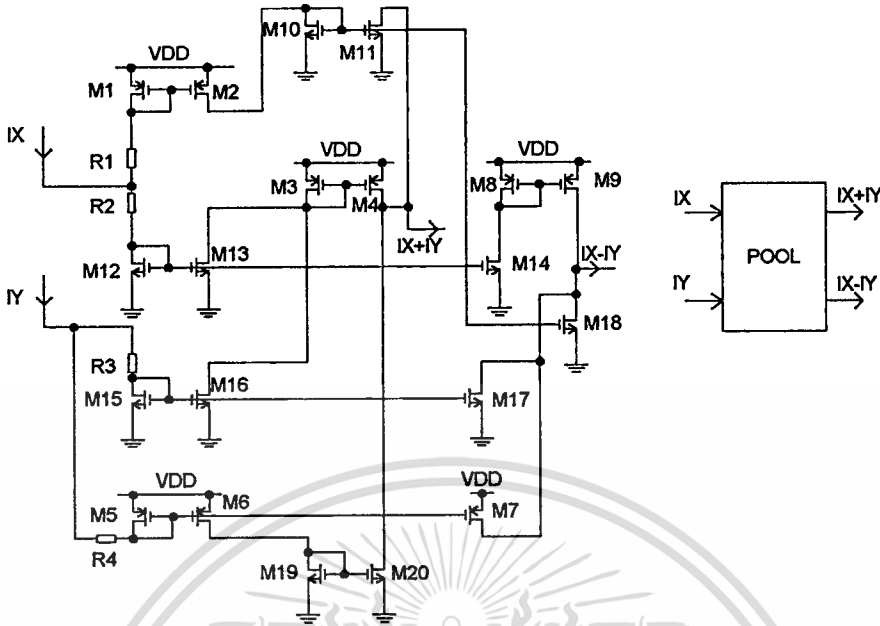
จากรูปที่ 3.1 วงจรพูลโหมคแรงดันจะพบได้ว่า ถ้าทำการวิเคราะห์อินพุตของวงจรคือ V_1, V_2, V_3 ที่ละอินพุต โดยอินพุตที่เชื่อมต่อลงกราวด์ จะพบว่าอินพุต V_1 จะผ่าน $M1, M5, M6$, มายังโหนด $M2$ ส่วนอินพุต V_2 จะผ่าน $M4, M8, M7$, มายังโหนด $M2$ และอินพุต V_3 จะผ่าน $M3$ มายังโหนด $M2$ จะพบได้ว่าถ้าค่าอัตราส่วน W/L ของ $M1-M4$ เท่ากัน และค่าอัตราส่วน W/L ของ $M5-M8$ เท่ากันแล้ว ค่าความถี่ที่อัตราขยายของวงจรตกลง 3 db ของอินพุต V_1 กับ V_2 จะประมาณได้ว่าเท่ากันและมีค่าความถี่ต่ำกว่า ค่าความถี่ที่อัตราขยายของวงจรตกลง 3 db ของอินพุต V_3 เพราะฉะนั้นเราสามารถประมาณได้ว่า ค่าความถี่ที่อัตราขยายของวงจรตกลง 3 db ของวงจรพูลโหมคแรงดันจะมีค่าเท่ากับ สมการที่ (3.30)

3.3 วงจรพูลโหมคกระแส

จากวงจรบวกและลบกระแสส่วนมากในเทอมของผลบวกและผลลบของกระแสที่เอาต์พุต จะมีค่าคงที่ติดมาด้วย เมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรคู่มือสี่ควอดแดนต์จะทำให้เปอร์เซ็นต์ของค่าคงที่ที่เป็นตัวคูณสมการเอาต์พุตของวงจรคู่มือมีค่าห่างไกลออกจาก 1 มากขึ้นซึ่งจะทำให้เอาต์พุตของวงจรคู่มือมีค่าผิดพลาดจากค่าที่เป็นจริงมากขึ้น หรือในวงจรบวกและลบกระแสบางแบบ มีค่าของกระแสอินพุตตัวหนึ่งเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ซึ่งมีทิศทางการไหลของกระแสทางเดียว ทำให้ไม่สามารถแทนค่าบวกและค่าลบของกระแสอินพุตของวงจรคู่มือได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ออกแบบวงจรพูลโหมคกระแสซึ่งทำหน้าที่บวกและลบกระแสอินพุตโดยมีค่ากระแสเอาต์พุตเป็นผลบวกและผลลบของค่ากระแสอินพุตทั้งสองโดยตรงที่ทำงานได้ทั้งสี่ควอดแดนต์ ซึ่งจะออกแบบโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ วงจรพูลโหมคกระแสที่สร้างจะใช้วงจรสะท้อนกระแสชนิด N และชนิด P เป็นหลัก โดยรูปของวงจรพูลโหมคกระแส และบล็อกจะแสดงในรูปที่ 3.5 จากรูปวงจรจะใช้มอสเฟตทั้งหมด 20 ตัว แยกเป็น P -ch 9 ตัว และ N -ch 11 ตัว โดยมอสเฟตทุกตัวที่ใช้จะมีค่า $W = 50\mu\text{m}$, $L = 5\mu\text{m}$

จากรูปที่ 3.5 ชุดของ I_x จะมี $M1, M2$ เป็นชุดสะท้อนกระแสสำหรับ I_x เป็นลบ และ $M12, M13$ สำหรับ I_x เป็นบวก ส่วนชุดของ I_y จะมี $M5, M6$ เป็นชุดสะท้อนกระแสสำหรับ I_y เป็นลบ และ $M15, M16$ สำหรับ I_y เป็นบวก ตามลำดับ

สำหรับชุดของ $(I_x + I_y)$ ถ้า I_x และ I_y เป็นบวก วงจรสะท้อนกระแสชุด $M12, M13$ และ $M15, M16$ จะสะท้อนกระแส I_x และ I_y ตามลำดับ ผ่านวงจรสะท้อนกระแสชุด $M3, M4$ ได้



รูปที่ 3.5 วงจรพูลโหมดกระแส และบล็อกสัญลักษณ์

กระแส ($I_X + I_Y$) ออกที่จุดขาเดรนของ $M4$ ถ้าในกรณีที่ค่า I_X หรือ I_Y เป็นลบจะถูกสะท้อนกระแสผ่านชุด $M1, M2, M10, M11$ หรือ $M5, M6, M19, M20$ ตามลำดับ เพื่อไปลบกระแสเอาต์พุตลงกราวด์

สำหรับชุดของ ($I_X - I_Y$) ถ้า I_X และ I_Y เป็นบวก วงจรสะท้อนกระแสชุด $M12, M14$ และ $M15, M17$ จะสะท้อนกระแส I_X และ I_Y ตามลำดับ ผ่านวงจรสะท้อนกระแสชุด $M8, M9$ ได้กระแส ($I_X - I_Y$) ออกที่จุดขาเดรนของ $M9$ ตามวงจร ถ้าในกรณีที่ค่า I_X หรือ I_Y เป็นลบจะถูกสะท้อนกระแสผ่านชุด $M1, M2, M10, M18$ หรือ $M5, M7$ ตามลำดับ เพื่อไปลบหรือบวกกระแสเอาต์พุตตามลำดับ

สำหรับ R_1, R_2, R_3, R_4 จะใช้ตัวต้านทานค่า 20 กิโลโอห์ม เพื่อเป็นตัวปรับให้ค่ากระแสเดรนของ $M1, M12, M15, M5$, มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดเมื่อ I_X และ I_Y เป็นศูนย์

สำหรับการวิเคราะห์การทำงานของวงจรพูลโหมดกระแส เราสามารถเขียนในรูปแบบของการสะท้อนกระแสส่งผ่านได้ดังนี้

กรณีกระแสเอาต์พุต ($I_X + I_Y$)

กรณี I_X เป็น (+), I_Y เป็น (+)

การสะท้อนกระแสของ I_X ผ่าน $M12, M13, M3, M4$

การสะท้อนกระแสของ I_Y ผ่าน $M15, M16, M3, M4$

ได้กระแส $I_X + I_Y$

กรณี I_X เป็น (+) , I_Y เป็น (-)

การสะท้อนกระแสของ I_X ผ่าน M12 M13 M3 M4

การสะท้อนกระแสของ I_Y ผ่าน M5 M6 M19 M20

ได้กระแส $I_X+(-I_Y) = I_X-I_Y$

กรณี I_X เป็น (-) , I_Y เป็น (+)

การสะท้อนกระแสของ I_X ผ่าน M1 M2 M10 M11

การสะท้อนกระแสของ I_Y ผ่าน M15 M16 M3 M4

ได้กระแส $-I_X+I_Y = I_Y-I_X$

กรณี I_X เป็น (-) , I_Y เป็น (-)

การสะท้อนกระแสของ I_X ผ่าน M1 M2 M10 M11

การสะท้อนกระแสของ I_Y ผ่าน M5 M6 M19 M20

ได้กระแส $(-I_X)+(-I_Y) = -I_X-I_Y$

กรณีกระแสเอาต์พุต (I_X-I_Y)

กรณี I_X เป็น (+) , I_Y เป็น (+)

การสะท้อนกระแสของ I_X ผ่าน M12 M14 M8 M9

การสะท้อนกระแสของ I_Y ผ่าน M15 M17

ได้กระแส I_X-I_Y

กรณี I_X เป็น (+) , I_Y เป็น (-)

การสะท้อนกระแสของ I_X ผ่าน M12 M14 M8 M9

การสะท้อนกระแสของ I_Y ผ่าน M5 M7

ได้กระแส $I_X-(-I_Y) = I_X+I_Y$

กรณี I_X เป็น (-) , I_Y เป็น (+)

การสะท้อนกระแสของ I_X ผ่าน M1 M2 M10 M18

การสะท้อนกระแสของ I_Y ผ่าน M15 M17

ได้กระแส $-I_X-I_Y$

กรณี I_X เป็น (-) , I_Y เป็น (-)

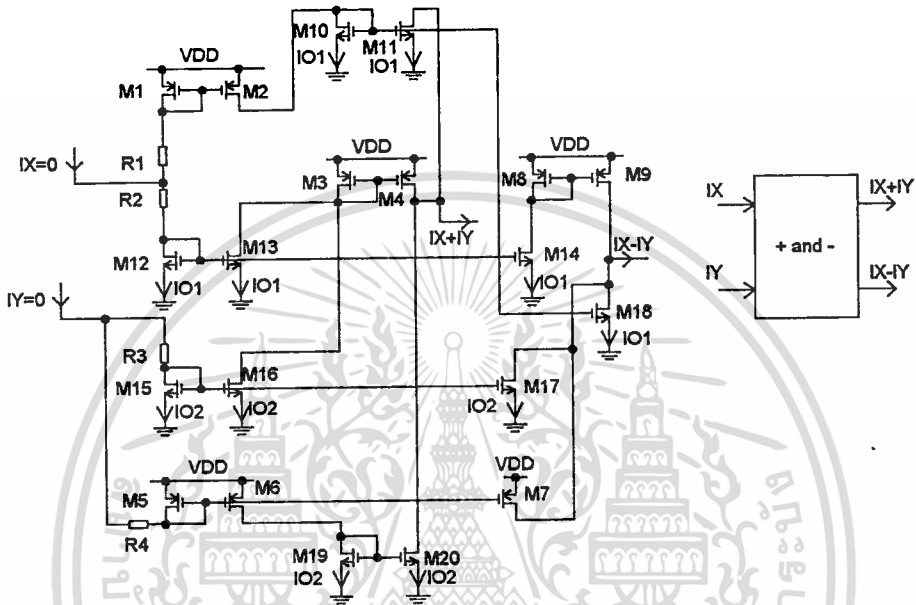
การสะท้อนกระแสของ I_X ผ่าน M1 M2 M10 M18

การสะท้อนกระแสของ I_Y ผ่าน M5 M7

ได้กระแส $(-I_X)-(-I_Y) = -I_X+I_Y$

โดยในการวิเคราะห์หมีเงื่อนไขสำหรับกระแสอินพุตคือ กระแสไหลเข้าวงจรเป็น (+) ส่วนกระแสไหลออกจากวงจรเป็น (-) และเงื่อนไขสำหรับกระแสเอาต์พุตคือ กระแสไหลเข้าวงจรเป็น (-) ส่วนกระแสไหลออกจากวงจรเป็น (+)

3.3.1 การพิจารณาค่าของ R_1, R_2, R_3 และ R_4 ที่มีผลกระทบต่อวงจร



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรพูลโหมคกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์หาผลกระทบของค่า R_1, R_2, R_3 และ R_4 ที่มีต่อวงจร

จากวงจรพูลโหมคกระแสในรูปที่ 3.6 ถ้าพิจารณาเมื่อให้กระแสอินพุตของวงจร I_X และ I_Y เป็นศูนย์ จะพบว่ามีกระแสที่ไหลในวงจรทางด้านอินพุต จาก V_{DD} ไปกราวด์ 2 จุดคือ จุดที่ 1 ให้เป็นกระแส I_{O1} ไหลจาก V_{DD} ผ่าน M1 ผ่าน R_1 ผ่าน R_2 ผ่าน M12 ลงกราวด์ จุดที่ 2 ให้เป็นกระแส I_{O2} ไหลจาก V_{DD} ผ่าน M5 ผ่าน R_4 ผ่าน R_3 ผ่าน M15 ลงกราวด์

โดย

$$I_{O1} = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2 + R_{SD1} + R_{DS12}} \tag{3.31}$$

$$I_{O2} = \frac{V_{DD}}{R_3 + R_4 + R_{SD5} + R_{DS15}} \tag{3.32}$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{DS} = \frac{1}{\mu_D} \quad (3.33)$$

เมื่อ

$$\lambda = \frac{K_{DS}}{\sqrt{V_{DS} + (-V_{eff}) + \Phi_0}} \quad (3.34)$$

$$K_{DS} = \sqrt{\frac{2K_S \epsilon_0}{qN_A}} \quad (3.35)$$

I_D คือกระแสเดรนของมอสเฟตที่ทำงานในย่านอิ่มตัวจากสมการที่ (2.4)

N_A คือค่า acceptor concentration ของการโด๊ป สำหรับมอสเฟตแบบ N-ch

N_B คือค่า acceptor concentration ของการโด๊ป สำหรับมอสเฟตแบบ P-ch

ϵ_0 คือค่า permittivity ของ free space ซึ่งมีค่าเท่ากับ $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m

q คือค่าประจุของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.6 \cdot 10^{-19}$ C

K_S คือ relative permittivity ของซิลิคอน เท่ากับ 11.8

V_{eff} คือ $V_{GS} - V_T$

Φ_0 คือ แรงดันของรอยต่อ PN เมื่อทำการเปิดวงจร

ในการพิจารณา ให้อัตราส่วน W/L ของมอสเฟตในวงจรถัดไปทั้งหมดมีค่าเท่ากัน และ R_1-R_4 มีค่าเท่ากันแล้ว

$$I_{O1} = I_{O2} = I_O \quad (3.36)$$

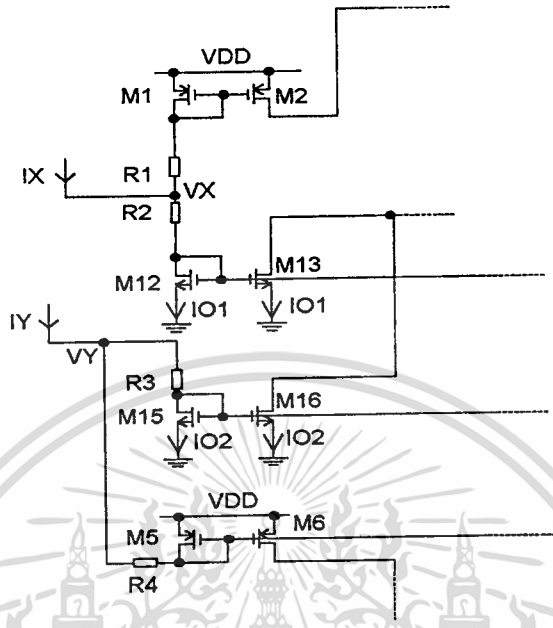
จากรูปที่ 3.6 จะพบได้ว่าค่ากระแส I_O จะไม่มีผลต่อค่าความผิดพลาดของวงจร กระแสเหล่านี้จะไปหักล้างกันหมดที่เอาต์พุตของวงจร ทำให้กระแสเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์เมื่อกระแสอินพุตทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์

ผลกระทบของกระแส I_O นี้จะมีผลต่อค่ากำลังงานสูญเสียของวงจร โดยจะมีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายแรงดัน V_{DD} ลงกราวด์ ถ้าพิจารณาจำนวนกระแสที่ไหลลงที่กราวด์ และถ้าให้ I_{OT} เป็นกระแสรวมของวงจรถัดไปทั้งหมดที่ไหลจาก V_{DD} ลงกราวด์ในขณะที่กระแสอินพุตทั้งสองของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ จะได้

$$I_{OT} = 11I_O \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การวิเคราะห์หาค่าการทำงานของวงจร



รูปที่ 3.7 แสดงส่วนอินพุตของวงจรพอลิโคมครอสส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการทำงานของวงจร

จากรูปที่ 3.7 พิจารณาที่ขั้วกระแส I_X โดยสมมติให้วงจรเป็นอุดมคติคือ I_X เป็นบวกจะไหลผ่าน M_{12} และ I_X เป็นลบจะไหลผ่าน M_1 ส่วน I_Y เป็นบวกจะไหลผ่าน M_{15} และ I_Y เป็นลบจะไหลผ่าน M_5

หา $I_{X(\max)}$

สมมติให้แหล่งจ่ายกระแสอินพุตเป็นอุดมคติคือ $V_{X(\max)} = V_{DD}$ เพราะฉะนั้น

$$I_{X(\max)} = \frac{V_{DD} - V_{T12}}{R_2} - I_o \quad (3.38)$$

หา $-I_{X(\max)}$

สมมติให้แหล่งจ่ายกระแสอินพุตเป็นอุดมคติคือ $-V_{X(\max)} = 0$ เพราะฉะนั้น

$$-I_{X(\max)} = \frac{V_{DD} - V_{T1}}{R_1} - I_o \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

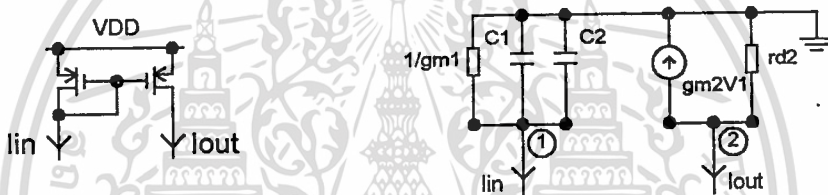
ในการทำงานเดียวกันสามารถหา

$$I_{Y(\max)} = \frac{V_{DD} - V_{T15}}{R_3} - I_O \quad (3.40)$$

$$-I_{Y(\max)} = \frac{V_{DD} - V_{T5}}{R_4} - I_O \quad (3.41)$$

3.3.3 การวิเคราะห์ห่าอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรสะท้อนกระแส

ในการวิเคราะห์ห่าอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรจะต้องทำการเปลี่ยนวงจรให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูล โดยวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch ในรูปที่ 3.8 จะเปลี่ยนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.8ข



(ก) วงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch

(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch และวงจรสมมูล

วิเคราะห์ที่ทั้งวงจรสมมูลที่โหนด 1 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้

$$V_1(g_{m1} + SC_1 + SC_2) + I_{in} = 0$$

$$V_1(g_{m1} + SC_1 + SC_2) = -I_{in} \quad (3.42)$$

ที่โหนด 2 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้

$$g_{d2}V_2 + I_{out} + g_{m2}V_1 = 0$$

$$g_{d2}V_2 = -g_{m2}V_1 - I_{out} \quad (3.43)$$

จากสมการที่ (3.43) จะพบว่าเทอม $(g_{d2}V_2) \ll 1$ ดังนั้นให้ $(g_{d2}V_2) \cong 0$ จะทำให้สมการที่ (3.43) เป็น

$$V_1 = -\frac{I_{out}}{g_{m2}} \quad (3.44)$$

แทนสมการที่ (3.44) ในสมการที่ (3.42) จะได้

$$\begin{aligned} -\frac{I_{out}}{g_{m2}}(g_{m1} + SC_1 + SC_2) &= -I_{in} \\ \frac{(g_{m1} + SC_1 + SC_2)}{g_{m2}} &= \frac{-I_{in}}{-I_{out}} \\ \frac{I_{out}}{I_{in}} &= \frac{g_{m2}}{g_{m1} + SC_1 + SC_2} \end{aligned} \quad (3.45)$$

นำ g_{m1} ทหารทั้งเศษและส่วน

$$\begin{aligned} \frac{I_{out}}{I_{in}} &= \frac{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}}{1 + \frac{S(C_1 + C_2)}{g_{m1}}} \\ \frac{I_{out}}{I_{in}} &= \frac{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}}{T_1 S + 1} \end{aligned} \quad (3.46)$$

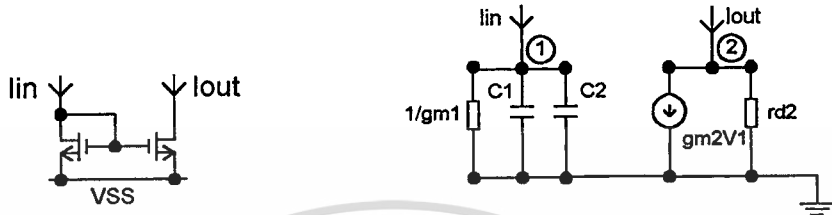
ซึ่งเวลาคงที่ T_1 มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{C_1 + C_2}{g_{m1}} \\ f_{-3dB} &= \frac{1}{2\pi T_1} = \frac{1}{2\pi \left(\frac{C_1 + C_2}{g_{m1}} \right)} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{-3db} = \frac{g_{m1}}{2\pi(C_1 + C_2)} \quad (3.47)$$

สำหรับวงจรสะท้อนกระแสแบบ N-ch ในรูปที่ 3.9ก จะเปลี่ยนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.9ข



(ก) วงจรสะท้อนกระแสแบบ N-ch

(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 3.9 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบ N-ch และวงจรสมมูล

วิเคราะห์ที่วงจรสมมูลที่โหนด 1 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้

$$V_1(g_{m1} + SC_1 + SC_2) - I_{in} = 0$$

$$V_1(g_{m1} + SC_1 + SC_2) = I_{in} \quad (3.48)$$

ที่โหนด 2 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้

$$g_{d2}V_2 = I_{out} - g_{m2}V_1 \quad (3.49)$$

จากสมการที่ (3.49) จะพบว่าเทอม $(g_{d2}V_2) \ll 1$ ดังนั้นให้ $(g_{d2}V_2) \cong 0$ จะทำให้สมการที่ (3.49) เป็น

$$V_1 = \frac{I_{out}}{g_{m2}} \quad (3.50)$$

แทนสมการที่ (3.50) ในสมการที่ (3.48) จะได้

$$\frac{(g_{m1} + SC_1 + SC_2)}{g_{m2}} = \frac{I_{in}}{I_{out}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{g_{m2}}{g_{m1} + sC_1 + sC_2} \quad (3.51)$$

นำ g_{m1} หารทั้งเศษและส่วน

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}}{1 + \frac{s(C_1 + C_2)}{g_{m1}}}$$

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}}{T_1 s + 1} \quad (3.52)$$

ซึ่งเวลาคงที่ T_1 มีค่าเป็น

$$T_1 = \frac{C_1 + C_2}{g_{m1}}$$

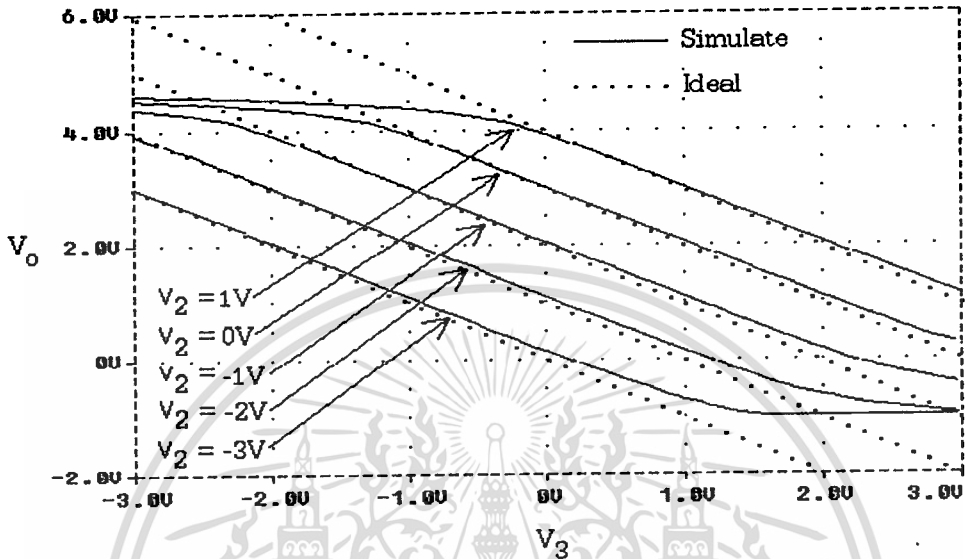
$$f_{-3db} = \frac{1}{2\pi T_1} = \frac{1}{2\pi \left(\frac{C_1 + C_2}{g_{m1}} \right)}$$

$$f_{-3db} = \frac{g_{m1}}{2\pi(C_1 + C_2)} \quad (3.53)$$

จากการวิเคราะห์หาอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch และ N-ch ซึ่งจะได้ค่าความถี่ที่อัตราการตอบสนองของวงจรตกลงมา 3 db ดังสมการที่ (3.47) และ (3.53) ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าสมการทั้งสองสมการเหมือนกัน และในวงจรพูลโวมอดกระแสจะใช้วงจรสะท้อนกระแสประกอบร่วมกันในการส่งผ่านกระแสจากอินพุตไปยังเอาต์พุต โดยค่า W และ L ของมอสเฟตทุกตัวในวงจรมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความถี่ที่อัตราการตอบสนองของวงจรตกลงมา 3 db มีค่าเท่ากับสมการที่ (3.47) หรือ (3.53) โดยจะมีค่าเท่ากับสมการที่มีค่าความถี่ต่ำกว่า

3.4 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice

3.4.1 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรพอลิโคมดแรงดันด้วยโปรแกรม Pspice

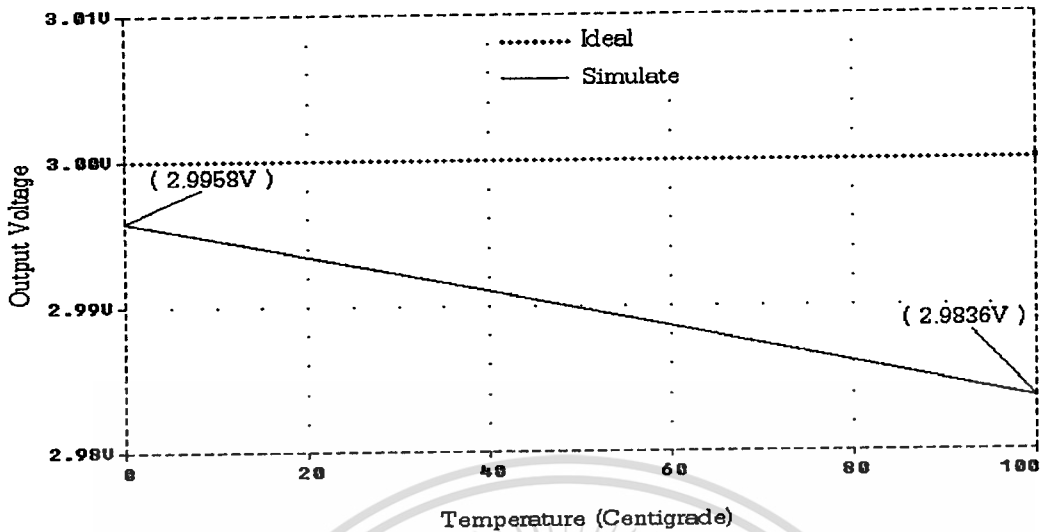


รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจรพอลิโคมดแรงดันระหว่าง V_1, V_2, V_3 และ V_o เมื่อ $V_1 = 3$ โวลต์ $V_2 = -3, -2, -1, 0,$ และ 1 โวลต์ V_3 เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -3 ถึง 3 โวลต์

รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจรพอลิโคมดแรงดันระหว่าง V_1, V_2, V_3 และ V_o เมื่อ $V_1 = 3$ โวลต์ $V_2 = -3, -2, -1, 0,$ และ 1 โวลต์ V_3 เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -3 ถึง 3 โวลต์ โดยมอสเฟต M1 ถึง M4 มีค่า $W = 10\mu\text{m}$, $L = 30\mu\text{m}$ และมอสเฟต M5 ถึง M8 มีค่า $W = 60\mu\text{m}$, $L = 10\mu\text{m}$ โดยทำการป้อนแหล่งจ่ายแรงดัน $\pm 5V$ ให้กับวงจร จะได้ย่านของ V_o ที่เป็นเชิงเส้นประมาณ $0-4$ โวลต์

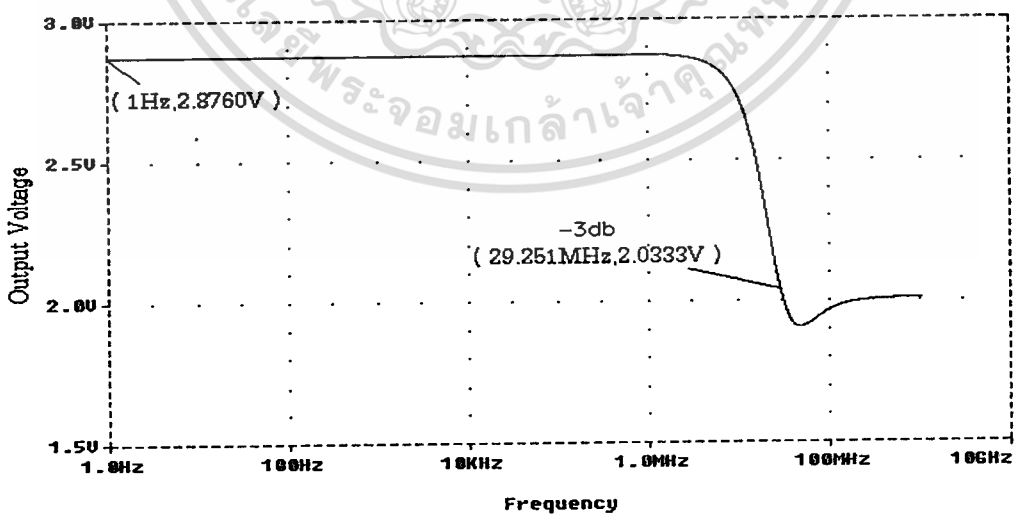
สำหรับการกำหนดค่า W/L ในวงจรมัน ค่า W/L ของ M1-M4 จะต้องมีค่าเท่ากันและค่า W/L ของ M5-M8 จะต้องมีค่าเท่ากันด้วยเพื่อให้ได้เงื่อนไขสมการดังสมการที่ (3.3) และในส่วน of แหล่งจ่ายแรงดันถ้าแหล่งจ่ายแรงดันมีค่ามากขึ้นของ V_o ก็จะกว้าง ในทางกลับกันถ้าแหล่งจ่ายแรงดันมีค่าน้อยของ V_o ก็จะแคบ ดังสมการวิเคราะห์ย่านแรงดันการทำงานของวงจรพอลิโคมดแรงดันที่ (3.18)

จากรูปที่ 3.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต (V_o) กับอุณหภูมิโดยทำการป้อนแรงดันอินพุต V_1, V_2 และ V_3 เท่ากับ 3 โวลต์ ในทางอุดมคติแรงดันเอาต์พุตจะต้องเท่ากับ 3 โวลต์ตลอด โดยไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิจะมีผลต่อ



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต (V_O) ของวงจรพูลโหมดแรงดันกับอุณหภูมิ โดยทำการป้อนแรงดันอินพุต V_1, V_2 และ V_3 เท่ากับ 3 โวลต์

แรงดันเอาต์พุต จากกราฟจะพบว่าระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตั้งแต่ 0-100 องศาเซนติเกรดจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตตั้งแต่ 2.9958 ถึง 2.9836 ตามลำดับ หรือถ้าคิดเป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อ 1 องศาจะได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาแรงดันเอาต์พุตจะลดลงเท่ากับ 1.22×10^{-4} โวลต์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมินั้นจะเป็นไปตามหัวข้อที่ 2.8 เรื่องผลของอุณหภูมิในมอสเฟต



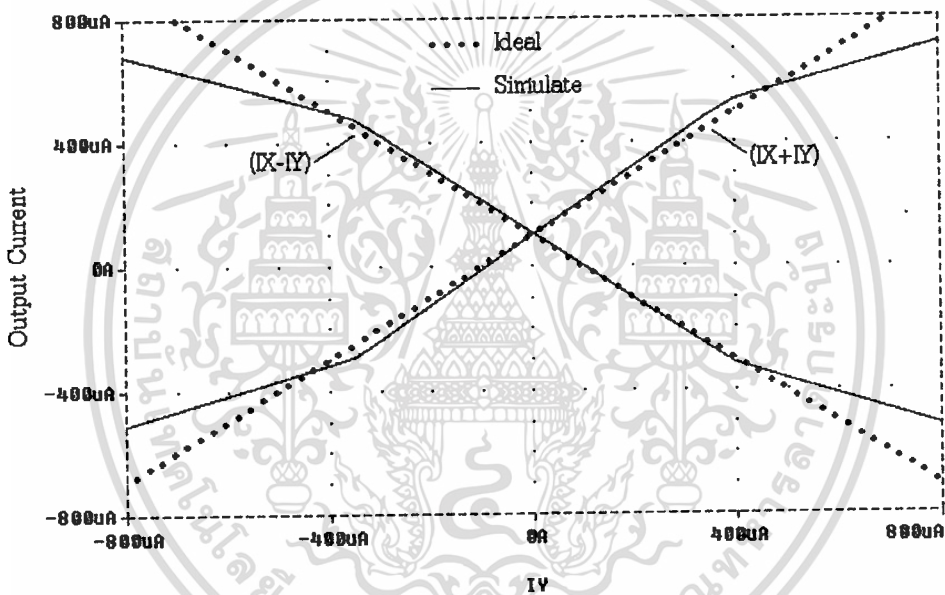
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรพูลโหมดแรงดันเมื่อป้อนอินพุต V_1, V_2 และ V_3 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 3 โวลต์ที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 Hz ถึง

1 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.12 เป็นกราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรพูลโหมคแรงดันเมื่อป้อนอินพุต V_1, V_2 และ V_3 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 3 โวลต์ที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 Hz ถึง 1 GHz จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงดันเอาต์พุตเริ่มลดทอนเมื่อความถี่อินพุตประมาณ 1.6 MHz และจะลดทอนลงมา 3 db ที่ความถี่ 29.251 MHz ซึ่งความถี่ที่อัตราการตอบสนองของวงจรลดทอนลงมา 3 db นี้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.30) ซึ่งเป็นสมการวิเคราะห์หาอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรพูลโหมคแรงดัน

3.4.2 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรพูลโหมคกระแสด้วยโปรแกรม Pspice

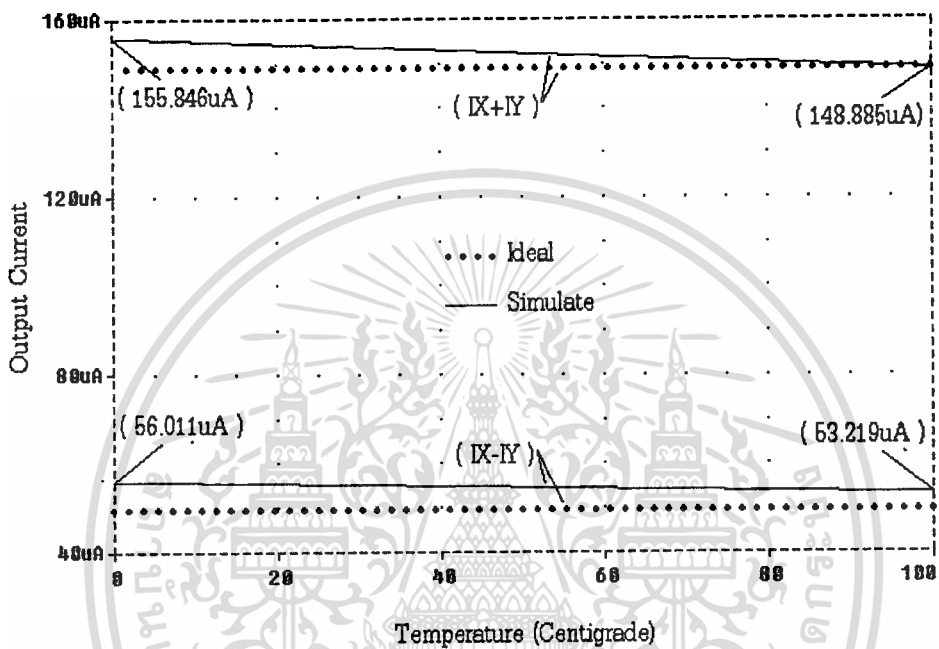


รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจรพูลโหมคกระแส เมื่อ $I_x=100\mu A$ และ $I_y=-800\mu A$ ถึง $800\mu A$

รูปที่ 3.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจรพูลโหมคกระแส เมื่อ $I_x=100\mu A$ และ $I_y=-800\mu A$ ถึง $800\mu A$ โดยมอสเฟตทุกตัวจะมีค่า $W=50\mu m$ และ $L=5\mu m$ โดยจะป้อนแหล่งจ่ายแรงดัน +10 โวลต์ให้กับวงจร

จากรูปที่ 3.13 ย่นการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรอยู่ที่ I_y ประมาณ $\pm 350\mu A$ โดยในย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นนี้ค่าของกระแสเอาต์พุตที่ได้จะใกล้เคียงกับทางทฤษฎี สำหรับพารามิเตอร์ที่มีผลต่อย่านการทำงานของวงจรคือค่าของแหล่งกำเนิดแรงดัน โดยถ้าแหล่งกำเนิดแรงดันมีค่ามากย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรจะกว้าง ในทางกลับกันถ้าค่าของแหล่งกำเนิดแรงดัน

ในวงจรมีค่าน้อยก็จะทำให้ย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรลดน้อยลง และค่าของ R_1 - R_4 ถ้ามีค่าน้อยย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรจะกว้าง ในทางกลับกันถ้าค่าของ R_1 - R_4 มีค่ามาก ย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรจะแคบ ดังสมการวิเคราะห์ย่านการทำงานของวงจรพูลโหมดกระแสที่ (3.38)-(3.41)

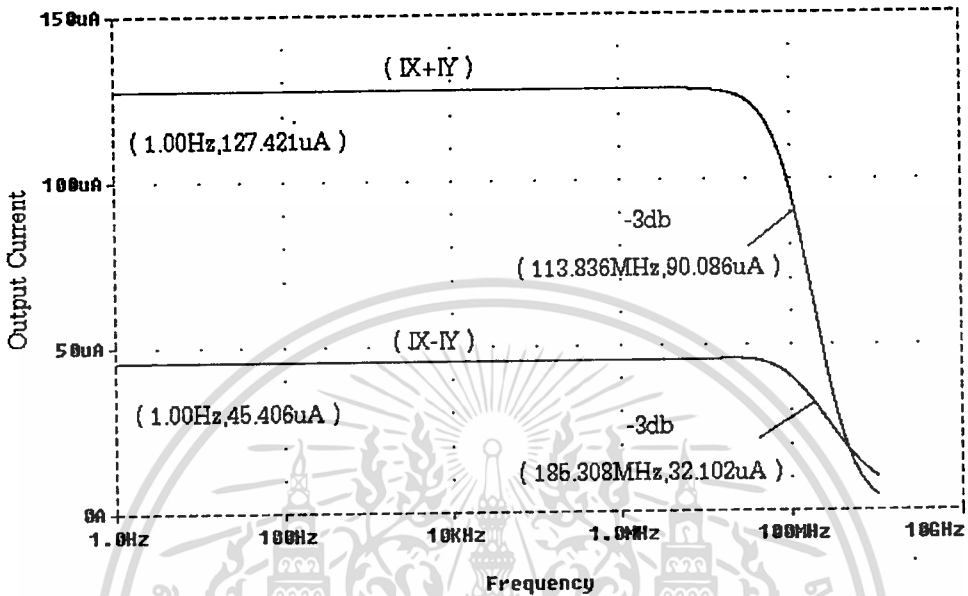


รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตของวงจรพูลโหมดกระแสกับอุณหภูมิ ตั้งแต่ 0-100 องศาเซนติเกรด โดยให้กระแสอินพุต $I_X=100\mu\text{A}$ และ $I_Y=50\mu\text{A}$

จากรูปที่ 3.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตของวงจรพูลโหมดกระแสกับอุณหภูมิตั้งแต่ 0-100 องศาเซนติเกรด โดยให้กระแสอินพุต $I_X=100\mu\text{A}$ และ $I_Y=50\mu\text{A}$ ในทางอุดมคติ (I_X+I_Y) จะมีค่าเท่ากับ 150 uA และ (I_X-I_Y) จะมีค่าเท่ากับ 50 uA สำหรับในทางปฏิบัติกระแส (I_X+I_Y) เมื่ออุณหภูมิเป็นศูนย์องศาจะมีค่าเท่ากับ 155.846 uA และที่อุณหภูมิเป็น 100 องศาจะมีค่าเท่ากับ 148.885 uA เมื่อคิดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อ 1 องศาเซนติเกรดจะได้คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศากระแส (I_X+I_Y) จะลดลง 0.06961 uA และสำหรับกระแส (I_X-I_Y) เมื่ออุณหภูมิเป็นศูนย์องศาจะมีค่าเท่ากับ 56.011 uA และที่อุณหภูมิเป็น 100 องศาจะมีค่าเท่ากับ 53.219 uA เมื่อคิดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อ 1 องศาเซนติเกรดจะได้คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศากระแส (I_X-I_Y) จะลดลง 0.02792 uA ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของกระแสเอาต์พุตที่มีค่ามากก็จะมีอัตราการลดลงมาก และกระแสเอาต์พุตที่มีค่าน้อยก็จะมีอัตราการลดลงน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยถ้ามองโดยรวมแล้วจะพบว่าอัตราการลดลงของกระแสเอาต์พุตต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอุณหภูมิจะมีค่าน้อยมาก สำหรับการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุตต่ออุณหภูมินั้นจะเป็นไปตามหัวข้อที่ 2.8 เรื่องผลของอุณหภูมิในมอสเฟต



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส $(I_X + I_Y)$ และ $(I_X - I_Y)$ ของวงจรพูลโหมค กระแสกับความถี่ เมื่อป้อน V_X เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 2 โวลต์ เข้าที่จุดป้อนกระแส I_X และป้อน V_Y เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 โวลต์ เข้าที่จุดป้อนกระแส I_Y

จากรูปที่ 3.15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส $(I_X + I_Y)$ และ $(I_X - I_Y)$ กับความถี่ เมื่อป้อน V_X เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 2 โวลต์ เข้าที่จุดป้อนกระแส I_X และป้อน V_Y เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 โวลต์ เข้าที่จุดป้อนกระแส I_Y จากกราฟกระแส $(I_X + I_Y)$ จะพบว่าค่าของกระแสในช่วงตอบสนองความถี่ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ 127.421uA และลดทอนลง 3db ที่ความถี่ 113.836 MHz และจากกราฟกระแส $(I_X - I_Y)$ จะพบว่าค่าของกระแสในช่วงตอบสนองความถี่ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ 45.406uA และลดทอนลง 3db ที่ความถี่ 185.308 MHz ซึ่งความถี่ที่อัตราการตอบสนองของวงจรลดทอนลงมา 3 db นี้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.47) หรือ (3.53) ซึ่งเป็นสมการวิเคราะห์หาอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรพูลโหมคกระแส โดยเลือกจากสมการที่มีอัตราการตอบสนองความถี่ที่ต่ำกว่า

3.5 บทสรุป

จากวงจรพูลโหมคแรงดันที่ทำหน้าที่บวกและลบแรงดันเมื่อทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice จะพบว่าย่านของ V_o ที่วงจรทำงานเป็นเชิงเส้นจะอยู่ในช่วงประมาณ 0V ถึง 4V ซึ่งย่านของการทำงานนี้สามารถปรับได้โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจร โดยถ้าแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจรมีค่าสูงย่านของการทำงานก็จะกว้างและในทางกลับกันถ้าแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจรมีค่าต่ำย่านของการทำงานก็จะแคบ สำหรับผลของอูณหภูมิที่มีต่อแรงดัน V_o ของวงจรมานั้นคือถ้าอูณหภูมิสูงขึ้นค่าของแรงดัน V_o จะลดลงแต่ก็เป็นการลดลงที่น้อยมาก และสำหรับย่านการตอบสนองความถี่ของวงจรมันอยู่ในย่านประมาณ 30 MHz และจากวงจรพูลโหมคกระแสที่ทำหน้าที่บวกและลบกระแสเมื่อทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice จะพบว่าย่านของกระแสเอาต์พุตที่วงจรทำงานเป็นเชิงเส้นจะอยู่ในช่วงประมาณ $\pm 350 \mu A$ ของกระแสอินพุต I_x ซึ่งย่านของการทำงานนี้สามารถปรับได้โดยค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจร โดยถ้าแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจรมีค่าสูงย่านของการทำงานก็จะกว้างและในทางกลับกันถ้าแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจรมีค่าต่ำย่านของการทำงานก็จะแคบ สำหรับผลของอูณหภูมิที่มีต่อกระแสเอาต์พุตของวงจรมันคือถ้าอูณหภูมิสูงขึ้นค่าของกระแสเอาต์พุตจะลดลงแต่ก็เป็นการลดลงที่น้อยมาก และสำหรับย่านการตอบสนองความถี่ของวงจรมันอยู่ในย่านประมาณ 100 MHz

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมดแรงดันเป็นวงจรหารและ วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมดแรงดัน

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างวงจรหารและวงจรคูณสี่ควอดแดนท์ ซึ่งทั้งวงจรหารและวงจรคูณสี่ควอดแดนท์ที่กล่าวถึงจะทำงานในโหมดแรงดันโดยจะใช้บล็อกของวงจรพูลโหมดแรงดันมาประกอบรวมกันกับมอสเฟตเพื่อที่จะนำกฎกำลังสองของมอสเฟตมาใช้ ซึ่งจะมีการอ้างอิงผลลัพท์เป็นสมการคณิตศาสตร์ และทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice สำหรับวงจรหารโหมดแรงดันจะใช้บล็อกของวงจรพูลโหมดแรงดันทั้งหมด 3 บล็อกร่วมกับวงจรรขยายทรานสคอนดักเตนท์ 1 วงจรและมอสเฟตแบบ N-ch 2 ตัว และสำหรับวงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมดแรงดันจะใช้บล็อกของวงจรพูลโหมดแรงดันทั้งหมด 11 บล็อกร่วมกับมอสเฟตชนิด N-ch 4 ตัว

4.2 การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมดแรงดันเป็นวงจรหารโหมดแรงดัน [18]

แนวความคิดพื้นฐานของวงจรหาร จะได้มาจากสมการ

$$(a+b)^2 - (a-b)^2 = 4ab \equiv c \quad (4.1)$$

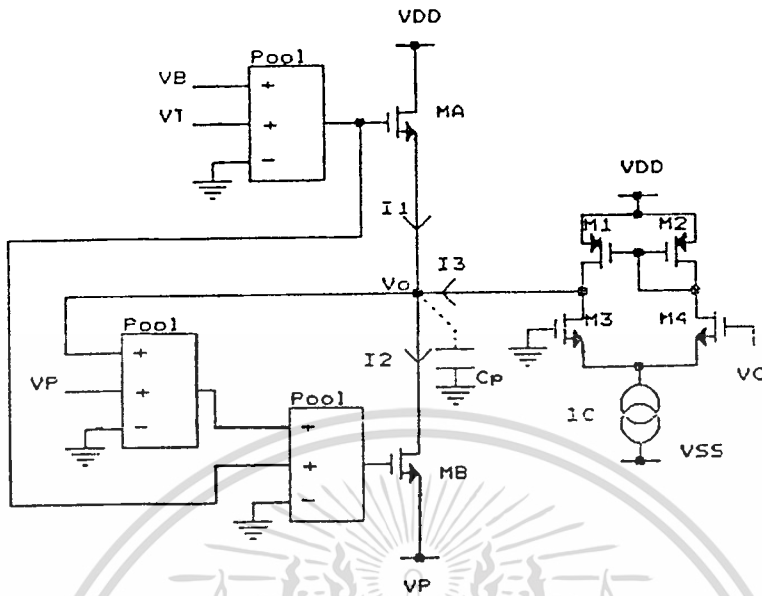
ถ้า “ b ” และ “ c ” เป็นสัญญาณอินพุตทั้งสอง และ “ a ” เป็นสัญญาณเอาต์พุต ก็จะสามารถได้รับฟังก์ชันของการหาร

รูปที่ 4.1 เป็นวงจรหารโหมดแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมดแรงดัน โดยจะใช้วงจรพูลโหมดแรงดัน 3 วงจร วงจรรขยายทรานสคอนดักเตนท์ 1 วงจรและมอสเฟตแบบ N-ch 2 ตัว ซึ่งสามารถหาแรงดันระหว่างเกตและซอสของ MA และ MB ในรูปที่ 4.1 ได้จาก

$$V_{GSA} = V_B - V_O + V_T \quad (4.2)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 วงจรหารโหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมคแรงดัน

$$V_{GSB} = V_B + V_O + V_T \tag{4.3}$$

เมื่อ V_B เป็นสัญญาณอินพุต (ตัวหาร) ของวงจร, V_T เป็นแรงดันขีดเริ่มของ MA และ MB สมมติว่า K_A เป็นค่าทรานสคอนดักแตนซ์ของ MA และ MB ค่ากระแสทรานของ MA และ MB สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= K_A (V_B - V_O)^2 - K_A (V_B + V_O)^2 \\ &= -4K_A V_B V_O \end{aligned} \tag{4.4}$$

จากสมการค่าทรานสคอนดักแตนซ์ของวงจร g_m เท่ากับ (กระแสเอาต์พุต / แรงดันอินพุต) โดยกระแสเอาต์พุตของวงจรคือ I_3 และแรงดันอินพุตของวงจรคือ V_C โดยที่ V_O ของ M3 ถูกต่อลงกราวด์ จะสามารถหาค่า I_3 ได้โดย

$$I_3 = g_m V_C \tag{4.5}$$

เมื่อ $g_m = \sqrt{(2K_C I_C)}$, K_C เป็นค่าทรานสคอนดักแตนซ์ของ M3 และ M4 ในรูปที่ 4.1 และ I_C เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ V_C เป็นสัญญาณอินพุต (ตัวถูกหาร) ดังนั้นจากวงจรจะได้สมการ V_O เป็น

$$V_O = \frac{g_m V_C}{4K_A V_B} \quad (4.6)$$

4.8 การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมคแรงดันเป็นวงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคแรงดัน [18]

จากสมการที่ (4.1) ถ้าอินพุตทั้งสองเป็น “a” และ “b” และเอาต์พุตเป็น “c” จะได้รับฟังก์ชันของการคูณ โดยวงจรคูณสี่ควอดแดนท์ที่กล่าวถึงจะแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งกระแสเอาต์พุตของวงจรคูณสี่ควอดแดนท์สามารถหาได้คือ

$$I_O = I_1 + I_4 - I_3 - I_2 \quad (4.7)$$

เมื่อ

$$I_1 = K(V_1 + V_3 + V_Q)^2$$

$$I_4 = K(V_2 + V_4 + V_Q)^2$$

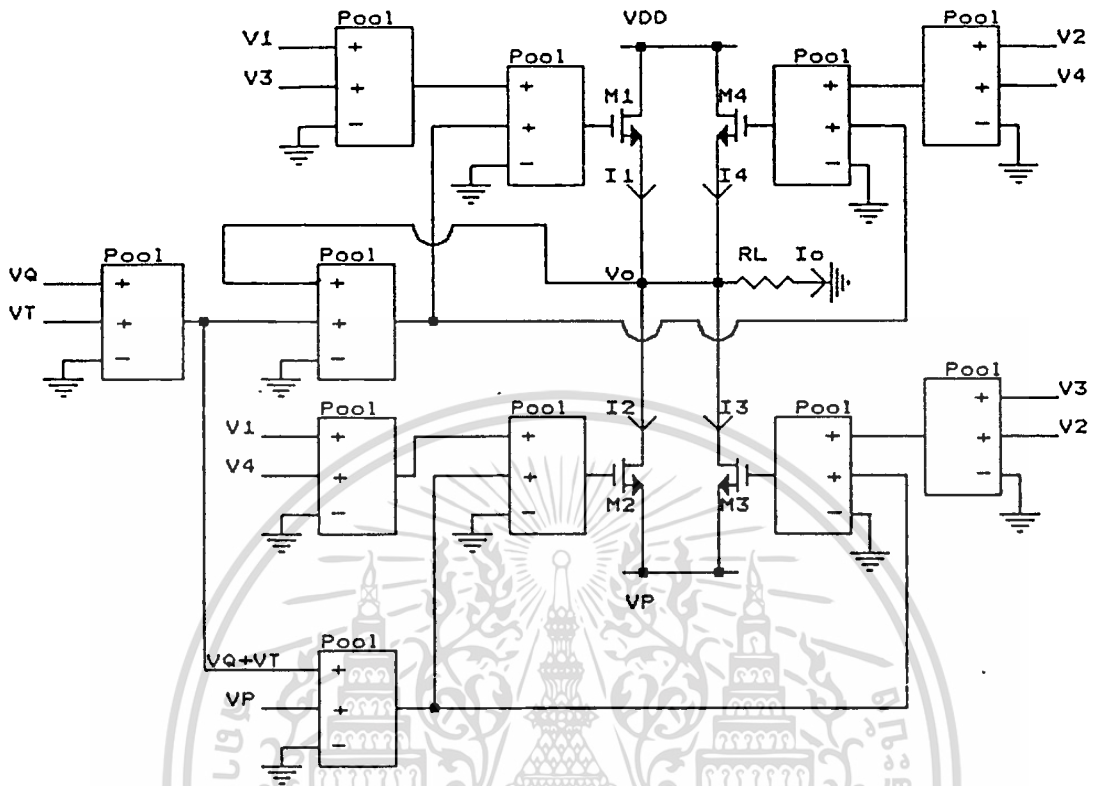
$$I_3 = K(V_2 + V_3 + V_Q)^2$$

$$I_2 = K(V_1 + V_4 + V_Q)^2$$

แทนค่า I_1, I_4, I_3, I_2 ในสมการที่ (4.7) เราจะได้

$$I_O = 2K(V_1 - V_2)(V_3 - V_4) \quad (4.8)$$

เมื่อ V_Q เป็นแรงดันกระแสตรง K เป็นค่าทรานสคอนดักแตนซ์ และ V_T เป็นแรงดันขีดเริ่มของ M1 ถึง M4 ในรูปที่ 4.2 ตามลำดับ



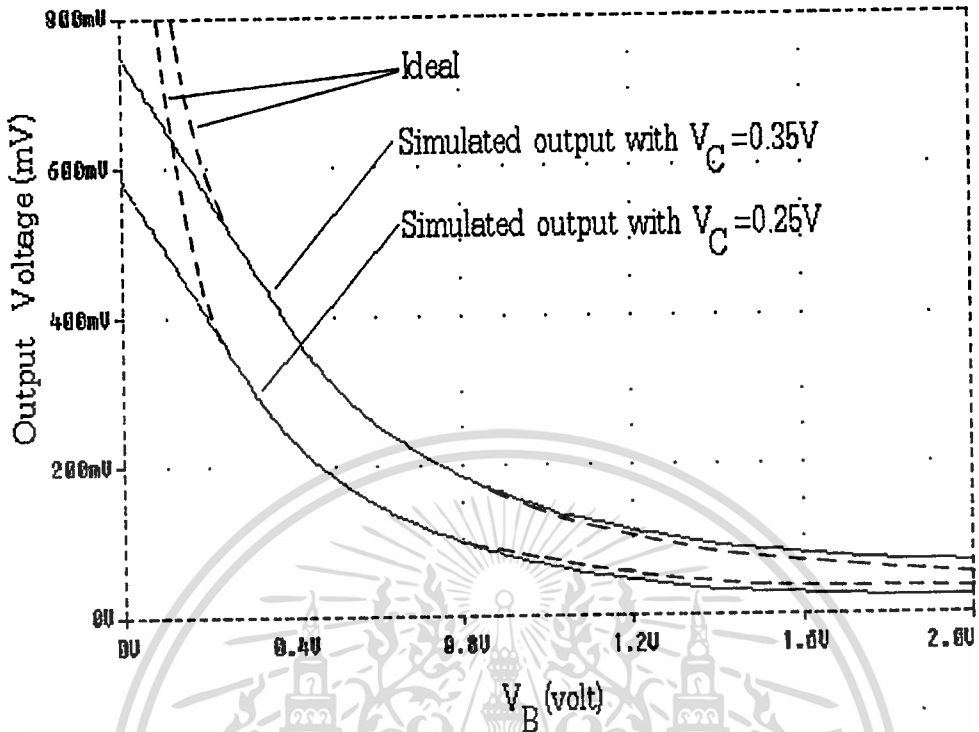
รูปที่ 4.2 วงจรคู่อัตราส่วนโหนดโหนดแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหนดแรงดัน

จากรูปที่ 4.2 เป็นวงจรคู่อัตราส่วนโหนดโหนดแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหนดแรงดัน 11 วงจร และมอสเฟตชนิด N-ch 4 ตัว

4.4 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice :

4.4.1 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรหารโหนดแรงดันด้วยโปรแกรม Pspice

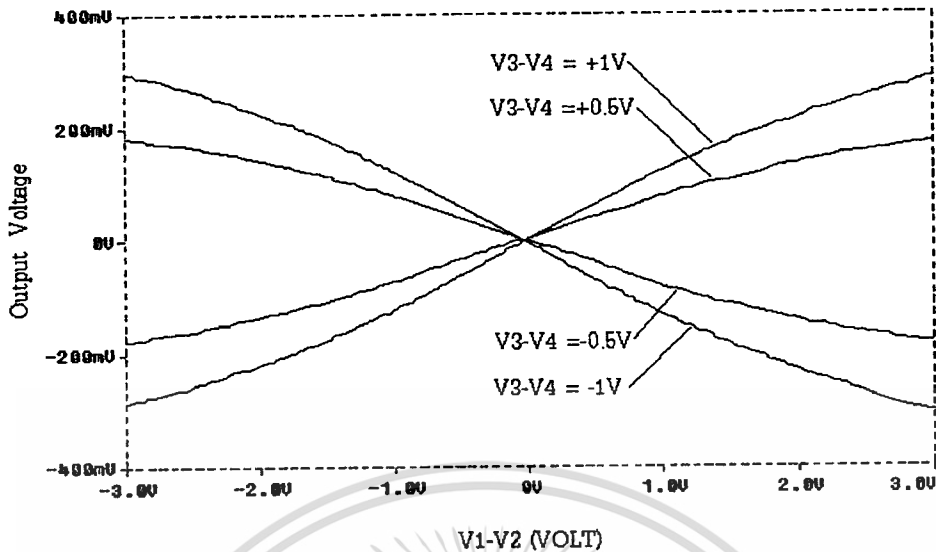
จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_o และ V_b เมื่อ $V_c = 0.35$ โวลต์ และ 0.25 โวลต์ โดยมอสเฟต MA และ MB ในรูปจะมีค่า $W=10\mu m$, $L=10\mu m$ แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจรเท่ากับ ± 5 โวลต์, $V_T=1$ โวลต์, $V_p=-1.95$ โวลต์ จากกราฟแสดงการทำงานจะได้ย่านของแรงดัน V_o ที่ได้ค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีอยู่ที่ค่า V_b เท่ากับ 0.3 โวลต์ถึง 0.8 โวลต์



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_O และ V_B เมื่อ $V_C = 0.35$ โวลต์ และ 0.25 โวลต์

4.4.2 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรถูกใส่ควอดแดนท์โหมคแรงดัน ด้วยโปรแกรม Pspice

จากรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง V_O กับ (V_1-V_2) และ (V_3-V_4) ของวงจรรูปที่ 4.2 เมื่อ $V_Q=1$ โวลต์ โดยสาเหตุที่ต้องมี V_Q ในวงจรถูกใส่เพื่อลดค่าความผิดพลาดของวงจรถูกใส่ในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำซึ่งสามารถดูได้จากกราฟแสดงการทำงานของวงจรถูกใส่โหมคแรงดันในรูปที่ 3.10 , $V_1=V_2$, $V_3=V_4$, ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟต $V_T=1$ โวลต์ , $V_P=-1.95$ โวลต์ และ $R_L=20$ กิโลโอห์ม ค่า (V_3-V_4) เปลี่ยนแปลงจาก -1 โวลต์ถึง 1 โวลต์ และ (V_1-V_2) เปลี่ยนแปลงจาก -3 โวลต์ถึง 3 โวลต์ โดยมีมอสเฟต M1 ถึง M4 มีค่า $W=10\mu\text{m}$, $L=40\mu\text{m}$ แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจรถูกใส่เท่ากับ ± 5 โวลต์ จากกราฟจะได้ย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นอยู่ที่ ± 1 โวลต์ของแรงดัน (V_1-V_2)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง V_O กับ (V_1-V_2) และ (V_3-V_4) ของวงจรในรูปที่ 4.2 เมื่อ $V_1=-V_2, V_3=-V_4, V_Q=1$ โวลต์, $V_T=1$ โวลต์ และ $R_L=20$ กิโลโอห์ม ค่า (V_3-V_4) เปลี่ยนแปลงจาก -1 โวลต์ถึง 1 โวลต์ และ (V_1-V_2) เปลี่ยนแปลงจาก -3 โวลต์ถึง 3 โวลต์

4.5 บทสรุป

วงจรหารและวงจรคูณสี่ควอดแดนต์โทมอดแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโทมอดแรงดันที่กล่าวถึงเป็นวงจรแบบ CMOS ซึ่งทำการออกแบบโดยใช้ออสเฟททั้งหมด เป็นวงจรที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น จากผลของการทดลองเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice จะพบว่าผลของการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับทางทฤษฎี ในย่านการทำงานของวงจร โดยสำหรับวงจรหารโทมอดแรงดันจะอยู่ในย่าน $V_B = 0.3$ โวลต์ถึง 0.8 โวลต์ และสำหรับวงจรคูณสี่ควอดแดนต์โทมอดแรงดันจะอยู่ในย่าน $(V_1-V_2) = \pm 1$ โวลต์ ในส่วนของอุณหภูมิที่มีผลต่อการทำงานของวงจรมานั้น โดยวงจรหารและวงจรคูณสี่ควอดแดนต์ที่กล่าวถึงจะใช้วงจรพูลโทมอดแรงดันเป็นส่วนใหญ่ เพราะฉะนั้นผลของอุณหภูมิที่มีต่อวงจรจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับของวงจรพูลโทมอดแรงดันที่ทำการวิเคราะห์ในบทที่ 3 และย่านการตอบสนองความถี่ของวงจรก็เช่นกันจะได้ใกล้เคียงกับของวงจรพูลโทมอดแรงดันในบทที่ 3 ด้วย

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมดกระแสเป็น วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมดกระแส

5.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นเรื่องเกี่ยวกับ วงจรคูณสี่ควอดแดนท์ที่ทำงานในโหมดกระแส โดยใช้บล็อกของวงจรพูลโหมดกระแส และวงจรกำลังสองโดยใช้ออสเฟทที่มีอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรเป็นกระแส โดยจะใช้บล็อกของวงจรพูลโหมดกระแส 1 บล็อก บล็อกของวงจรกำลังสอง 2 บล็อก และวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch 1 ชุด โดยมีการยืนยันผลการทดลองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice ซึ่งวงจรที่น่าเสนอในบทนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำออสเฟทเข้ามาแทนที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายแก่การนำมาสร้างเป็นวงจรรวม ใช้พื้นที่ในชิปน้อย มีค่าความต้านทานอินพุตที่สูง มีสัญญาณรบกวนและกำลังสูญเสียที่ต่ำ และจากโครงสร้างของออสเฟทที่มีอินพุตเป็นแรงดันและเอาต์พุตเป็นกระแสจึงสะดวกแก่การนำมาสร้างวงจรในโหมดแรงดัน ซึ่งในการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นการใช้สัญญาณในโหมดกระแสจะสะดวกและง่ายกว่าโหมดแรงดัน โดยในบทนี้จะได้นำเสนอ วงจรคูณสี่ควอดแดนท์ที่ทำงานในโหมดกระแส โดยใช้บล็อกของวงจรพูลโหมดกระแส และวงจรกำลังสองโหมดกระแสที่ใช้พื้นฐานสมการทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบวงจร

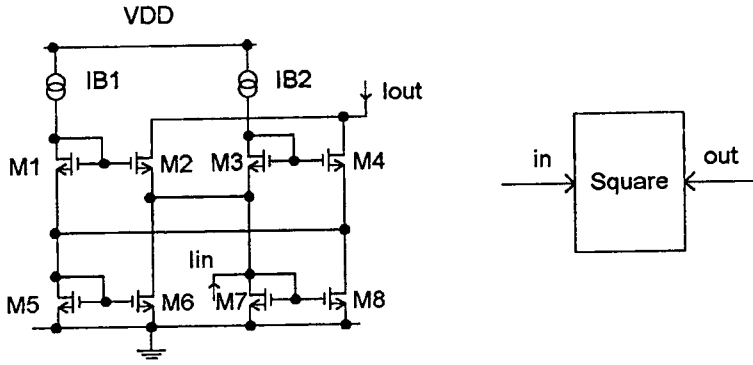
5.2 วงจรยกกำลังโหมดกระแส [11]

วงจรรยกกำลังโหมดกระแสดังเอกสารอ้างอิงที่ [11] จะสร้างจาก วงจรสะท้อนกระแสชนิด N-ch 4 ชุดดังรูปที่ 5.1 ซึ่งออสเฟททุกตัวในวงจรทำงานในย่านอิมิตัว โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสคนที่ $I_{B1}=I_{B2}=I_B$ จะได้กระแสครนของ M2 และ M4 คือ

$$I_{D2} = \frac{(4I_B + I_{in})^2}{16I_B} \quad \text{เมื่อ} \quad |I_{in}| \leq 4I_B \quad (5.1)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



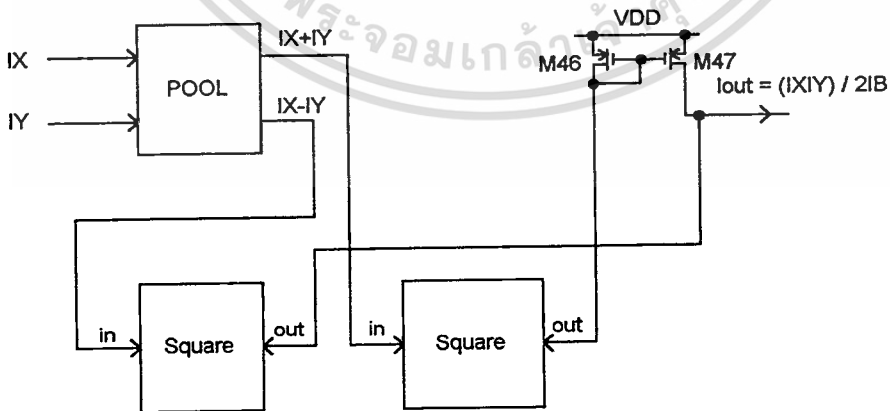
รูปที่ 5.1 วงจรยกกำลังสองโหมคกระแส และบล็อกสัญลักษณ์

$$I_{D4} = \frac{(4I_B - I_{in})^2}{16I_B} \quad \text{เมื่อ } |I_{in}| \leq 4I_B \quad (5.2)$$

จากวงจรกระแสเอาต์พุตคือ

$$\begin{aligned} I_{out} &= I_{D2} + I_{D4} \\ &= 2I_B + \frac{I_{in}^2}{8I_B} \end{aligned} \quad (5.3)$$

5.3 การประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมคกระแสเป็นวงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคกระแส



รูปที่ 5.2 วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคกระแส ที่สร้างจากบล็อกของวงจรพูลโหมคกระแส วงจรยกกำลังสองโหมคกระแสและวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch

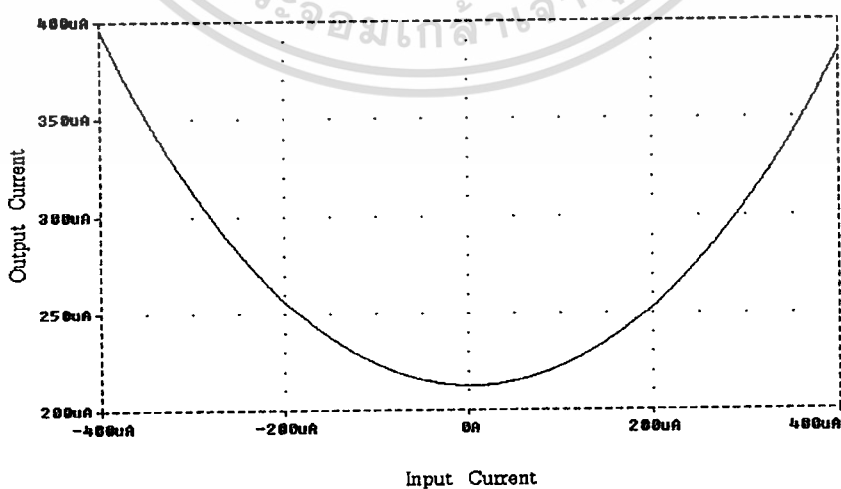
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 กระแส I_X กับ I_Y ผ่านเข้าสู่อุปกรณ์รวมกระแสจะได้กระแส (I_X+I_Y) กับ (I_X-I_Y) ออกทางเอาต์พุต ซึ่งจากนั้นกระแส (I_X+I_Y) กับ (I_X-I_Y) จะถูกป้อนเป็นกระแสอินพุตให้กับวงจรยกกำลังสองโหมดกระแส ซึ่งจะได้เอาต์พุตออกมาเป็นกระแส (I_X+I_Y) กับ (I_X-I_Y) ยกกำลังสอง จากนั้นจึงนำมาผ่านวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch เพื่อให้หลักการทำงานของเคอร์ซอร์เพื่อลบกระแสให้ได้กระแสเอาต์พุต ดังสมการอ้างอิง

$$\begin{aligned}
 I_{out} &= 2I_B + \frac{1}{8I_B}(I_X + I_Y)^2 - 2I_B - \frac{1}{8I_B}(I_X - I_Y)^2 \\
 &= \frac{1}{8I_B} \left((I_X + I_Y)^2 - (I_X - I_Y)^2 \right) \\
 &= \frac{1}{8I_B} (4I_X I_Y) \\
 &= \frac{I_X I_Y}{2I_B}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

5.4 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice

5.4.1 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรยกกำลังสองโหมดกระแสด้วยโปรแกรม Pspice



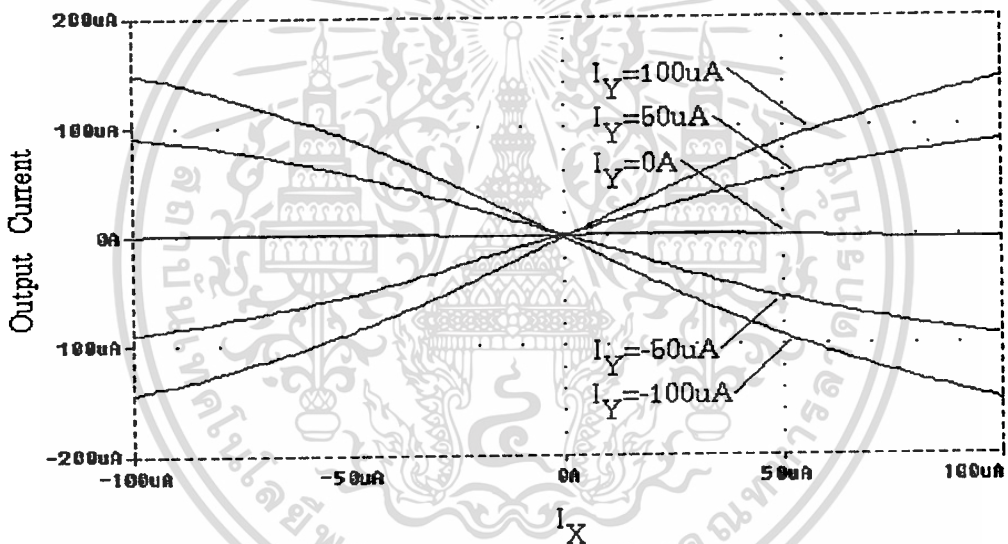
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} กับ I_{out} ของวงจรยกกำลังสองโหมดกระแส

ในรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

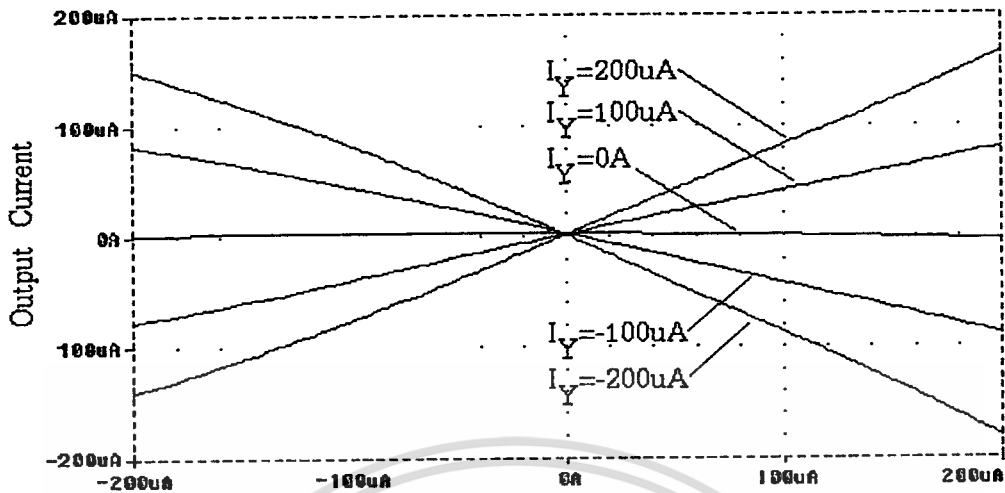
จากรูปที่ 5.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} กับ I_{out} ของวงจรรอยกำลังสอง โหมดกระแสในรูปที่ 5.1 โดยมอสเฟตทุกตัวมีค่า $W = 50 \mu\text{m}$, $L = 5 \mu\text{m}$ กระแสไบอัส $I_{B1} = I_{B2} = 100 \mu\text{A}$ และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจรเท่ากับ +5 โวลต์ ซึ่งย่านการทำงานของ วงจรจะขึ้นอยู่กับค่าของแหล่งจ่ายกระแสที่ดังสมการที่ (5.1) และ (5.2) โดยถ้าแหล่งจ่าย กระแสที่อยู่ในวงจรมีค่าสูง ย่านการทำงานก็จะกว้าง ในทางตรงกันข้ามถ้าแหล่งจ่ายกระแสที่อยู่ใน วงจรมีค่าต่ำ ย่านการทำงานก็จะแคบ

5.4.2 ผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรรอยกำลังสองโหมดกระแสด้วย โปรแกรม Pspice



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการทำงานของวงจรรอยกระแสสี่ควอดแดนต์ที่ใช้วงจรพูลโหมดกระแส โดย จะทำการเลียนแบบการทำงานด้วยค่าแหล่งจ่ายกระแสที่อยู่ในวงจรรอยกำลังสองกระแส เท่ากับ $20 \mu\text{A}$

จากรูปที่ 5.4 เป็นกราฟแสดงการทำงานของวงจรรอยกระแสสี่ควอดแดนต์ที่ใช้วงจรพูล โหมดกระแส โดยจะทำการเลียนแบบการทำงานด้วยค่าแหล่งจ่ายกระแสที่อยู่ในวงจรรอยกำลังสอง กระแสเท่ากับ $20 \mu\text{A}$ และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจรเท่ากับ +10 โวลต์ โดยกราฟจะแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{out} กับ I_X และ I_Y โดยให้ $I_X = -100 \mu\text{A}$ ถึง $100 \mu\text{A}$ $I_Y = -100 \mu\text{A}$, $-50 \mu\text{A}$, 0 , $50 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$ จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 5.4 การทดลองจะได้ย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้น ระหว่าง I_X เท่ากับ $-40 \mu\text{A}$ ถึง $+40 \mu\text{A}$ ซึ่งจะทำให้วงจรมีขีดจำกัดโดยขีดจำกัดนี้เกิดจากค่าความ



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการทำงานของวงจรถูกกระแสสี่ควอดแดนท์ที่ใช้วงจรถูกโหมคกระแส โดย จะทำการเขียนแบบการทำงานด้วยค่าแหล่งจ่ายกระแสคงที่ในวงจรถูกกำลังสองกระแส เท่ากับ $100\mu\text{A}$

ผิดพลาดเนื่องจากย่านการทำงานของวงจรถูกกำลังสองกระแสเป็นส่วนมาก โดยมอสเฟต M46 และ M47 ในรูปที่ 5.2 จะมีค่า $W = 50\ \mu\text{m}$, $L = 5\ \mu\text{m}$

และในรูปที่ 5.5 เราจะลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากย่านการทำงานของวงจรถูกกำลังสอง กระแส โดยเพิ่มแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_B เป็น $100\mu\text{A}$ โดยกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{out} กับ I_X และ I_Y โดยให้ $I_X = -200\mu\text{A}$ ถึง $200\mu\text{A}$ $I_Y = -200\mu\text{A}$, $-100\mu\text{A}$, 0 , $100\mu\text{A}$, $200\mu\text{A}$ จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 5.5 การทดลองจะได้ย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นเป็นระหว่าง I_X เท่ากับ $-80\mu\text{A}$ ถึง $+80\mu\text{A}$

5.5 บทสรุป

วงจรถูกสี่ควอดแดนท์โหมคกระแสที่ได้นำเสนอในบทนี้ สร้างขึ้นจากบล็อกของวงจรถูก โหมคกระแส บล็อกของวงจรถูกกำลังสองโหมคกระแสและวงจรถูกย้อนกระแสแบบ P-ch ซึ่ง เป็นวงจรมีประสิทธิภาพดี และง่ายแก่การประยุกต์ใช้งานในด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น ในรูปของกระแส จากการทดลองเขียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice จะเห็นได้ว่าผลของ การทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีในย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรถูก ในส่วนของ อุณหภูมิที่มีผลต่อการทำงานของวงจรมันก็จะไปตามสมการที่ (2.7) คือถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า กระแสเอาต์พุตจะลดลงแต่ก็เป็นการลดลงที่น้อยมาก และในส่วนของอัตราการทำงานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจรมัน เนื่องจากวงจรประกอบด้วยวงจรสะท้อนกระแสที่มีค่า W และ L เท่ากันทั้งหมด ดังนั้นอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรมีค่าเท่ากับอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรสะท้อนกระแสซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.47) หรือ (3.53) โดยอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรมีค่าเท่ากับสมการที่มีอัตราการตอบสนองความถี่ต่ำกว่า



บทที่ 6

บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึง วงจรพูลโหมคแรงดันที่มีการทำงานเป็นวงจรวกและลบแรงดัน วงจรพูลโหมคกระแสที่มีการทำงานเป็นวงจรวกและลบกระแส และการประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมคแรงดันและวงจรพูลโหมคกระแสมาสร้างเป็นวงจรคณิตศาสตร์ในโหมคแรงดันและกระแส ซึ่งวงจรพูลและวงจรคณิตศาสตร์ที่กล่าวถึงจะมีโครงสร้างของวงจรเป็นแบบ CMOS ซึ่งเป็นที่นิยมในการออกแบบวงจรรวมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีกำลังงานสูญเสียต่ำ ไซพื้นที่ในการสร้างน้อย มีความต้านทานอินพุตสูง และสัญญาณรบกวนต่ำ โดยในการประยุกต์ใช้งานวงจรพูลโหมคแรงดันและวงจรพูลโหมคกระแสมาสร้างเป็นวงจรคณิตศาสตร์ในโหมคแรงดันและกระแสสามารถแบ่งแยกออกเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

6.1 วงจรหารโหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมคแรงดัน

สำหรับวงจรหารโหมคแรงดันที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้จะสร้างจากวงจรพูล 3 วงจร วงจรขยายทรานสคอนดักแทนท์ 1 วงจรและมอสเฟทแบบ N-ch 2 ตัว ซึ่งวงจรหารโหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมคแรงดันนี้มีโครงสร้างเป็น MOS ทั้งหมดทำให้สะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม และจากวงจรเมื่อนำมาทำการทดลองเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice จะได้ผลการทดลองที่ดีและใกล้เคียงกับทางทฤษฎีในย่านการทำงานของวงจร

6.2 วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมคแรงดัน

สำหรับ วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมคแรงดัน ที่ได้กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้ จะสร้างจากวงจรพูล 11 วงจรและมอสเฟทแบบ N-ch 4 ตัวซึ่งเราจะเห็นได้ว่า วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมคแรงดันที่สร้างจากวงจรพูลโหมคแรงดันนี้จะใช้มอสเฟทมาก และจากการนำมาทำการทดลองเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice จะได้ผลการทดลองที่ไม่ดี โดยผลการทดลองที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีในย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นต่ำ โดยอยู่ในช่วงประมาณ ± 1 โวลท์ของ (V_1-V_2) ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรจะใช้มอสเฟทเป็นจำนวนมากและมีย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นต่ำ

6.3 วงจรคุณสี่ควอดแดนต์โหมคกระแสที่สร้างจากวงจรพูลโหมคกระแส

สำหรับวงจรคุณสี่ควอดแดนต์โหมคกระแสที่สร้างจากวงจรพูลโหมคกระแสที่ได้กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้ จะสร้างจากวงจรพูลโหมคกระแส 1 วงจร วงจรยกกำลังสองโหมคกระแสสองวงจร และวงจรสะท้อนกระแสแบบ P-ch 1 วงจร ซึ่งวงจรคุณสี่ควอดแดนต์โหมคกระแสที่สร้างจากวงจรพูลโหมคกระแสนี้มีข้อดีคือ มีอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเป็นกระแสซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นได้สะดวกและง่ายกว่าวงจรคุณในโหมคแรงดัน จากวงจรที่ออกแบบและนำมาทำการทดลองเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice จะได้ผลการทดลองที่ดีและใกล้เคียงกับทางทฤษฎีในย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจร ส่วนข้อเสียของวงจรก็คือ วงจรจะไหม้สเฟทเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับวงจรคุณสี่ควอดแดนต์ในโหมคแรงดัน



บรรณานุกรม

- [1] เกียรติศักดิ์ คมวิหระ, “การสร้างวงจรสายพานกระแสและวงจรแปลงความต้านทานค่าลบด้วย CMOS”, ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534.
- [2] โรจนากร กัมตะพงษ์, “วงจรวีความถี่โดยใหม่อสเฟท”, ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534.
- [3] C.T. Sah, “Characteristics of the Metal-Oxide-Semiconductor transistor,” IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-11, pp. 324-325, July 1964.
- [4] D. Ghosh and D. Patranabis, “A simple analog divider having independent control of sensitivity and design condition,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.39, pp.522-526, June 1990.
- [5] D.H. Sheingold, Ed., “Nonlinear Circuit Handbook,” Norwood, MA: Analog Devices, 1974.
- [6] D.G. Ony, “Modern MOS Technology,” Mc Graw-Hill Book Co, Inc. New York, pp. 1-9, 1986.
- [7] E. Seevinck, R.F. Wassenaar, “A Versatile CMOS Liner Transconductor / Square Law Function Circuit,” IEEE J.Solid State Circuits, Vol.SC-22, No.3,1987.
- [8] H. Shichman and D. Hodges, “Modelling and Simulation of Insulated-Gate Field-Effect Transistor Switching Circuits,” IEEE J.Solid-State Circuits, Vol.SC-3, No.3, pp. 285-289, Sep. 1968.
- [9] H.J. Song and C.K. Kim, “An MOS four-quadrant analog multiplier using simple two input squaring circuits with source follower,” IEEE J.Solid-State Circuits, vol.25, pp.841-847, June 1990.
- [10] I.M. Filancvsky and H.P. Baltes, “Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits,” IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, 1992.
- [11] M. Ismail and T. Fiez “Analog VLSI Signal and Information Processing,” McGraw-Hill Book Co., pp. 304 , 1994.

- [12]M.W. Penney and L. Lav, Ed., "MOS Integrated Circuit," New York, Van Nostrand Reinhold, 1972.
- [13]N.I. Khachab and M. Ismail "A nonlinear CMOS analog cell for VLSI signal and information processing," IEEE J. of Solid-State Circuits, vol.26, pp.1689-1698, Nov 1991.
- [14]P.E. Allen and D.R. Holberg, "CMOS Analog Circuit Design," Holt Rinehart and Winston, Inc, 1987.
- [15]Randall L. Geiger and Phillip E. Allen, "VLSI Design Techniques for Analog and Digital Circuit," New York : McGraw-Hill, pp. 240-246, 1990.
- [16]R.F. Coughlin, "Principle and Application of Semiconductors and Circuits," Prentice-Hall, 1971.
- [17]R.J. Wiegink, "A CMOS Four-Quadrant Analog Circuit Multiplier," IEEE Proc. ISCAS 1991, Vol.4, June 1991.
- [18]S.I. Liu and C.C. Chang, "CMOS Analog Divider and Four-Quadrant Multiplier Using Pool Circuits," IEEE J.Solid-State Circuits, vol 30, pp.1025-1029, Sept. 1995.
- [19]S.I. Liu, D.S. Wu, H.W.Taso, J.Wu, and J.H. Tsay, "Nonlinear circuit applications with current conveyors," IEE Proc.-G, vol.140, pp.1-6, Feb 1993.
- [20]S.I. Liu and Y.S. Hwang, "CMOS four-quadrant multiplier using bias offset cross coupled pairs," Electron.Lett., vol.20, pp.1737-1738, September 1993.
- [21]S.W. Tasy and R. Newcomb, "A neuro - type pool arithmetic unit," in Proc. IEEE ISCAS '91 (Singapore), pp.2518-2521, 1991.
- [22]Th. L. Laopoulos and C.A. Karybakas, "A simple analog division scheme," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.40, pp.779-782, Aug 1991.
- [23]Y.P. Tsvividis, "Operation and Modeling of The MOS Transistor," Mc Graw-Hill, pp. 168-175, 1988.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Pspice สำหรับการวิเคราะห์การทำงานของวงจรถูโหมดแรงดัน

VOLTAGE MODE POOL CIRCUIT

VDD 1 0 DC 5

VSS 11 0 DC -5

V1 7 0 DC 3

V2 9 0 DC 4

V3 8 0 DC 6

IB1 5 11 DC 60U

IB2 6 11 DC 60U

M1 2 7 5 5 NMOS1 W=10U L=30U

M2 3 3 5 5 NMOS1 W=10U L=30U

M3 3 8 6 6 NMOS1 W=10U L=30U

M4 4 9 6 6 NMOS1 W=10U L=30U

M5 2 2 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M6 3 2 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M7 3 4 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M8 4 4 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

-----ES-2-WORSE CASE MODEL-----

.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=2 NSUB=9.50E+15 VTO=+1.07 TOX=44.0N

+LD=0.15U XJ=1.0U DELTA=1.68 UO=0.693K UEXP=0.111 UCRIT=10.0K

+VMAX=41.0K NFS=0.1T PB=0.45 JS=100.0U RSH=45.0 NEFF=1.16

+CGSO=0.27N CGDO=0.27N CJSW=0.24N CJ=0.105M MJ=0.48 MJSW=0.27

.MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=2 NSUB=3.24E+16 VTO=-0.79 TOX=44.0N

+LD=0.25U XJ=2.0U DELTA=0.89 UO=0.271K UEXP=0.181 UCRIT=10.0K

+VMAX=33.0K NFS=0.1T PB=1.04 JS=100.0U RSH=80.0 NEFF=0.77

+CGSO=0.35N CGDO=0.35N CJSW=0.43N CJ=0.330M MJ=0.48 MJSW=0.40

.PROBE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.DC V3 -3 3 0.1 V2 -3 1 1

.END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Pspice สำหรับการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของวงจรถวลโหมดแรงดัน

VOLTAGE MODE POOL CIRCUIT

VDD 1 0 DC 5

VSS 11 0 DC -5

V1 7 0 DC 3

V2 9 0 DC 3

V3 8 0 DC 3

IB1 5 11 DC 60U

IB2 6 11 DC 60U

M1 2 7 5 5 NMOS1 W=10U L=30U

M2 3 3 5 5 NMOS1 W=10U L=30U

M3 3 8 6 6 NMOS1 W=10U L=30U

M4 4 9 6 6 NMOS1 W=10U L=30U

M5 2 2 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M6 3 2 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M7 3 4 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M8 4 4 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

-----ES-2-WORSE CASE MODEL-----

.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=2 NSUB=9.50E+15 VTO=+1.07 TOX=44.0N

+LD=0.15U XJ=1.0U DELTA=1.68 UO=0.693K UEXP=0.111 UCRIT=10.0K

+VMAX=41.0K NFS=0.1T PB=0.45 JS=100.0U RSH=45.0 NEFF=1.16

+CGSO=0.27N CGDO=0.27N CJSW=0.24N CJ=0.105M MJ=0.48 MJSW=0.27

.MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=2 NSUB=3.24E+16 VTO=-0.79 TOX=44.0N

+LD=0.25U XJ=2.0U DELTA=0.89 UO=0.271K UEXP=0.181 UCRIT=10.0K

+VMAX=33.0K NFS=0.1T PB=1.04 JS=100.0U RSH=80.0 NEFF=0.77

+CGSO=0.35N CGDO=0.35N CJSW=0.43N CJ=0.330M MJ=0.48 MJSW=0.40

.PROBE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.DC TEMP 0 100 1

.END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Pspice สำหรับการวิเคราะห์หาอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรพูลโหมดแรงดัน

VOLTAGE MODE POOL CIRCUIT

VDD 1 0 DC 5

VSS 11 0 DC -5

V1 7 0 AC 3

V2 9 0 AC 3

V3 8 0 AC 3

IB1 5 11 DC 60U

IB2 6 11 DC 60U

M1 2 7 5 5 NMOS1 W=10U L=30U

M2 3 3 5 5 NMOS1 W=10U L=30U

M3 3 8 6 6 NMOS1 W=10U L=30U

M4 4 9 6 6 NMOS1 W=10U L=30U

M5 2 2 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M6 3 2 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M7 3 4 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

M8 4 4 1 1 PMOS1 W=60U L=10U

-----ES-2-WORSE CASE MODEL-----

.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=2 NSUB=9.50E+15 VTO=+1.07 TOX=44.0N

+LD=0.15U XJ=1.0U DELTA=1.68 UO=0.693K UEXP=0.111 UCRIT=10.0K

+VMAX=41.0K NFS=0.1T PB=0.45 JS=100.0U RSH=45.0 NEFF=1.16

+CGSO=0.27N CGDO=0.27N CJSW=0.24N CJ=0.105M MJ=0.48 MJSW=0.27

.MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=2 NSUB=3.24E+16 VTO=-0.79 TOX=44.0N

+LD=0.25U XJ=2.0U DELTA=0.89 UO=0.271K UEXP=0.181 UCRIT=10.0K

+VMAX=33.0K NFS=0.1T PB=1.04 JS=100.0U RSH=80.0 NEFF=0.77

+CGSO=0.35N CGDO=0.35N CJSW=0.43N CJ=0.330M MJ=0.48 MJSW=0.40

.PROBE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.AC OCT 101 1 1G

.END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Pspice สำหรับวิเคราะห์การทำงานของวงจรถูกโหมดกระแส

CURRENT MODE POOL CIRCUIT

VDD 1 0 DC 10

IX 0 2 DC 100U

IY 0 3 DC 1600U

M1 20 20 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M2 4 20 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M3 5 5 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M4 6 5 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M5 23 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M6 7 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M7 9 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M8 8 8 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M9 9 8 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M10 4 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M11 6 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M12 21 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M13 5 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M14 8 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M15 22 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M16 5 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M17 9 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M18 9 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M19 7 7 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M20 6 7 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

R1 20 2 20K

R2 2 21 20K

R3 3 22 20K

R4 23 3 20K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R5 1 10 1K

R6 10 0 1K

R7 9 10 0.1

R8 1 11 1K

R9 11 0 1K

R10 6 11 0.1

-----ES-2-WORSE CASE MODEL-----

.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=2 NSUB=9.50E+15 VTO=+1.07 TOX=44.0N

+LD=0.15U XJ=1.0U DELTA=1.68 UO=0.693K UEXP=0.111 UCRIT=10.0K

+VMAX=41.0K NFS=0.1T PB=0.45 JS=100.0U RSH=45.0 NEFF=1.16

+CGSO=0.27N CGDO=0.27N CJSW=0.24N CJ=0.105M MJ=0.48 MJSW=0.27

.MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=2 NSUB=3.24E+16 VTO=-0.79 TOX=44.0N

+LD=0.25U XJ=2.0U DELTA=0.89 UO=0.271K UEXP=0.181 UCRIT=10.0K

+VMAX=33.0K NFS=0.1T PB=1.04 JS=100.0U RSH=80.0 NEFF=0.77

+CGSO=0.35N CGDO=0.35N CJSW=0.43N CJ=0.330M MJ=0.48 MJSW=0.40

.PROBE

.DC IY -800U 800U 1U

.END

โปรแกรม Pspice สำหรับการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของวงจรถวลโหมดกระแส

CURRENT MODE POOL CIRCUIT

VDD 1 0 DC 10

IX 0 2 DC 100U

IY 0 3 DC 50U

M1 20 20 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M2 4 20 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M3 5 5 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M4 6 5 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M5 23 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M6 7 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M7 9 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M8 8 8 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M9 9 8 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M10 4 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M11 6 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M12 21 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M13 5 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M14 8 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M15 22 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M16 5 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M17 9 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M18 9 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M19 7 7 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M20 6 7 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

R1 20 2 20K

R2 2 21 20K

R3 3 22 20K

R4 23 3 20K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R5 1 10 1K

R6 10 0 1K

R7 9 10 0.1

R8 1 11 1K

R9 11 0 1K

R10 6 11 0.1

-----ES-2-WORSE CASE MODEL-----

.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=2 NSUB=9.50E+15 VTO=+1.07 TOX=44.0N

+LD=0.15U XJ=1.0U DELTA=1.68 UO=0.693K UEXP=0.111 UCRIT=10.0K

+VMAX=41.0K NFS=0.1T PB=0.45 JS=100.0U RSH=45.0 NEFF=1.16

+CGSO=0.27N CGDO=0.27N CJSW=0.24N CJ=0.105M MJ=0.48 MJSW=0.27

.MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=2 NSUB=3.24E+16 VTO=-0.79 TOX=44.0N

+LD=0.25U XJ=2.0U DELTA=0.89 UO=0.271K UEXP=0.181 UCRIT=10.0K

+VMAX=33.0K NFS=0.1T PB=1.04 JS=100.0U RSH=80.0 NEFF=0.77

+CGSO=0.35N CGDO=0.35N CJSW=0.43N CJ=0.330M MJ=0.48 MJSW=0.40

.PROBE

.DC TEMP 0 100 1

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Pspice สำหรับการวิเคราะห์หาอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรพูลโมดกระแส

CURRENT MODE POOL CIRCUIT

VDD 1 0 DC 10

VX 0 2 AC 2

VY 0 3 AC 1

M1 20 20 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M2 4 20 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M3 5 5 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M4 6 5 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M5 23 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M6 7 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M7 9 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M8 8 8 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M9 9 8 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M10 4 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M11 6 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M12 21 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M13 5 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M14 8 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M15 22 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M16 5 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M17 9 22 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M18 9 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M19 7 7 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M20 6 7 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

R1 20 2 20K

R2 2 21 20K

R3 3 22 20K

R4 23 3 20K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R5 1 10 1K

R6 10 0 1K

R7 9 10 0.1

R8 1 11 1K

R9 11 0 1K

R10 6 11 0.1

-----ES-2-WORSE CASE MODEL-----

.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=2 NSUB=9.50E+15 VTO=+1.07 TOX=44.0N

+LD=0.15U XJ=1.0U DELTA=1.68 UO=0.693K UEXP=0.111 UCRIT=10.0K

+VMAX=41.0K NFS=0.1T PB=0.45 JS=100.0U RSH=45.0 NEFF=1.16

+CGSO=0.27N CGDO=0.27N CJSW=0.24N CJ=0.105M MJ=0.48 MJSW=0.27

.MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=2 NSUB=3.24E+16 VTO=-0.79 TOX=44.0N

+LD=0.25U XJ=2.0U DELTA=0.89 UO=0.271K UEXP=0.181 UCRIT=10.0K

+VMAX=33.0K NFS=0.1T PB=1.04 JS=100.0U RSH=80.0 NEFF=0.77

+CGSO=0.35N CGDO=0.35N CJSW=0.43N CJ=0.330M MJ=0.48 MJSW=0.40

.PROBE

.AC OCT 101 1 1G

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Pspice สำหรับวิเคราะห์การทำงานของวงจรรยกกำลังสองโหมดกระแส

CURRENT MODE SQUARING CIRCUIT

VDD 1 0 DC 5

IB1 1 2 DC 100U

IB2 1 3 DC 100U

IIN 0 4 DC 800U

M1 2 2 5 5 NMOS1 W=50U L=5U

M2 6 2 4 4 NMOS1 W=50U L=5U

M3 3 3 4 4 NMOS1 W=50U L=5U

M4 6 3 5 5 NMOS1 W=50U L=5U

M5 5 5 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M6 4 5 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M7 4 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M8 5 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

R1 1 6 0.1

-----ES-2-WORSE CASE MODEL-----

.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=2 NSUB=9.50E+15 VTO=+1.07 TOX=44.0N

+LD=0.15U XJ=1.0U DELTA=1.68 UO=0.693K UEXP=0.111 UCRIT=10.0K

+VMAX=41.0K NFS=0.1T PB=0.45 JS=100.0U RSH=45.0 NEFF=1.16

+CGSO=0.27N CGDO=0.27N CJSW=0.24N CJ=0.105M MJ=0.48 MJSW=0.27

.MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=2 NSUB=3.24E+16 VTO=-0.79 TOX=44.0N

+LD=0.25U XJ=2.0U DELTA=0.89 UO=0.271K UEXP=0.181 UCRIT=10.0K

+VMAX=33.0K NFS=0.1T PB=1.04 JS=100.0U RSH=80.0 NEFF=0.77

+CGSO=0.35N CGDO=0.35N CJSW=0.43N CJ=0.330M MJ=0.48 MJSW=0.40

.PROBE

.DC IIN -400U 400U 1U

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Pspice สำหรับวิเคราะห์การทำงานของวงจรถวลสี่ควอดแดนต์ที่โหมดกระแสที่สร้างจากวง
จรพุดโหมดกระแส

CURRENT MODE FOUR QUADRANT MULTIPLIER CIRCUIT

VDD 1 0 DC 10

IX 0 2 DC 400U

IY 0 7 DC 400U

IB1 1 20 DC 100U

IB2 1 22 DC 100U

IB3 1 24 DC 100U

IB4 1 26 DC 100U

M1 5 5 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M2 11 5 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M3 13 5 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M4 3 3 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M5 5 3 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M6 6 6 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M7 11 6 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M8 12 12 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M9 13 12 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M10 4 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M11 6 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M12 12 4 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M13 9 9 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M14 10 9 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M15 13 9 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M16 10 10 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M17 11 10 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M18 8 8 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M19 6 8 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M20 13 8 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M30 20 20 21 21 NMOS1 W=50U L=5U

M31 23 20 11 11 NMOS1 W=50U L=5U

M32 22 22 11 11 NMOS1 W=50U L=5U

M33 23 22 21 21 NMOS1 W=50U L=5U

M34 21 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M35 11 21 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M36 11 11 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M37 21 11 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M38 24 24 25 25 NMOS1 W=50U L=5U

M39 27 24 13 13 NMOS1 W=50U L=5U

M40 26 26 13 13 NMOS1 W=50U L=5U

M41 27 26 25 25 NMOS1 W=50U L=5U

M42 25 25 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M43 13 25 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M44 13 13 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M45 25 13 0 0 NMOS1 W=50U L=5U

M46 23 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

M47 27 23 1 1 PMOS1 W=50U L=5U

R1 3 2 20K

R2 2 4 20K

R3 9 7 20K

R4 7 8 20K

R5 27 30 0.1

R6 30 1 10K

R7 30 0 10K

-----ES-2-WORSE CASE MODEL-----

.MODEL NMOS1 NMOS LEVEL=2 NSUB=9.50E+15 VTO=+1.07 TOX=44.0N

+LD=0.15U XJ=1.0U DELTA=1.68 UO=0.693K UEXP=0.111 UCRIT=10.0K

+VMAX=41.0K NFS=0.1T PB=0.45 JS=100.0U RSH=45.0 NEFF=1.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+CGSO=0.27N CGDO=0.27N CJSW=0.24N CJ=0.105M MJ=0.48 MJSW=0.27

.MODEL PMOS1 PMOS LEVEL=2 NSUB=3.24E+16 VTO=-0.79 TOX=44.0N

+LD=0.25U XJ=2.0U DELTA=0.89 UO=0.271K UEXP=0.181 UCRIT=10.0K

+VMAX=33.0K NFS=0.1T PB=1.04 JS=100.0U RSH=80.0 NEFF=0.77

+CGSO=0.35N CGDO=0.35N CJSW=0.43N CJ=0.330M MJ=0.48 MJSW=0.40

.PROBE

.DC IX -200U 200U 1U IY -200U 200U 100U

.END





ภาคผนวก ข.
บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มิถุนายน 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรถวลี่ควอดแดนท์โหมดกระแสโดยใช้วงจรถวลี่และวงจรถวลี่งอ

อดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร¹ กอบชัย เดชหาญ²

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรเสนอเกี่ยวกับ วงจรถวลี่ควอดแดนท์ที่ทำงานในโหมดกระแส โดยใช้เทคนิคควอดเตอร์-สแควร์ ซึ่งวงจรถวลี่จะออกแบบโดยใช้มอสเฟตโดยมีอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรถวลี่เป็นกระแส โดยจะใช้วงจรถวลี่โหมดกระแสที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ซึ่งใช้วงจรถวลี่งอในการออกแบบและมีเอาต์พุตเป็นค่าผลบวกและผลลบของกระแสโดยตรง 1 วงจรถวลี่งอ 2 วงจรถวลี่งอ โดยมีการทดสอบการเลียนแบบ ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ และใช้โปรแกรม PSpice วงจรถวลี่งอนี้เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น

¹ นักศึกษามัธยมศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

A Design of Current Mode Four-Quadrant Multiplier using Pool and Squaring Circuits

Adisak Monpapassorn¹ Kobchai Dejhan²

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This paper proposes a current mode four-quadrant multiplier circuit using quarter-square technique by using MOSFETS with input and output current. The circuit technique uses a new current mode pool circuit which design by using current mirror circuits and the output are direct added and subtracted with two squaring circuit. The simulating results and performances are shown by using mathematical equations and PSpice program. This circuit is suitable for applying with analog signal processing.

¹ Graduate Student

² Associate Professor, Telecommunications Engineering Department

1. บทนำ

วงจรรูณสี่ควอดแดนท์เป็นวงจรถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมอสเฟตเข้ามาแทนที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายแก่การนำมาสร้างเป็นวงจรรวม ใช้พื้นที่ในชิปน้อย ค่าความต้านทานอินพุตที่สูง สัญญาณรบกวนและกำลังสูญเสียที่ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของมอสเฟตที่มีอินพุตเป็นแรงดันและเอาต์พุตเป็นกระแส จึงสะดวกแก่การนำมาสร้างวงจรรวมในโหมดแรงดัน ดังวงจรรูณสี่ควอดแดนท์ใน [1-4] สำหรับงานด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นการใช้สัญญาณกระแสจะสะดวกและง่ายกว่าสัญญาณแรงดันเช่นการรวม(บวก) หรือการหักล้าง(ลบ)สัญญาณสามารถกระทำได้โดยตรงซึ่งไม่สามารถทำได้ในสัญญาณแรงดัน และในด้านการคัดลอก (copy) สัญญาณในสัญญาณกระแสจะใช้วงจรสะท้อนกระแสซึ่งง่ายและใช้อุปกรณ์น้อยกว่าวงจรรวมแรงดันที่ใช้ในสัญญาณแรงดัน โดยในบทความนี้ได้นำเสนอ วงจรรูณสี่ควอดแดนท์ที่ทำงานในโหมดกระแสซึ่งออกแบบโดยใช้เทคนิคควอเตอร์-สแควร์ดังใน [3] และ [4] ซึ่งเป็นวงจรรูณสี่ควอดแดนท์ในโหมดแรงดันโดยที่วงจรรวม [3] อาศัยวงจรรอบแอมป์เป็นวงจรรวมและลบแรงดันกับวงจรรวมกำลังและรวมสัญญาณ และวงจรรวม [4] อาศัยวงจรรวม [5] เป็นวงจรรวมและลบแรงดันอินพุตและอาศัยกฎกำลังสองของมอสเฟตในการยกกำลังค่าผลบวกและผลลบของแรงดันอินพุต โดยวงจรรูณสี่ควอดแดนท์ในโหมดกระแสในบทความนี้ได้ทำการออกแบบวงจรรวมโหมดกระแสขึ้นมาใหม่ซึ่งมีเอาต์พุตของวงจรรวมเป็นผลบวกและผลลบของกระแสโดยตรงซึ่งทำให้เทอมของค่าคงที่ ที่เป็นตัวคูณในสมการเอาต์พุตของวงจรรูณสี่ควอดแดนท์มีเปอร์เซ็นต์เข้าใกล้ 1 มากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ค่าของกระแส เอาต์พุตของวงจรรูณสี่ควอดแดนท์มีค่าใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้นด้วย

2. หลักการออกแบบวงจรรวมและการทำงาน

หลักการออกแบบวงจรรวมที่ใช้เทคนิคควอเตอร์-สแควร์ ดังวงจรรูณสี่ควอดแดนท์ในโหมดแรงดันใน [3] และ [4] ซึ่งมีหลักการจากสมการ

$$(a+b)^2 - (a-b)^2 = 4ab \quad (1)$$

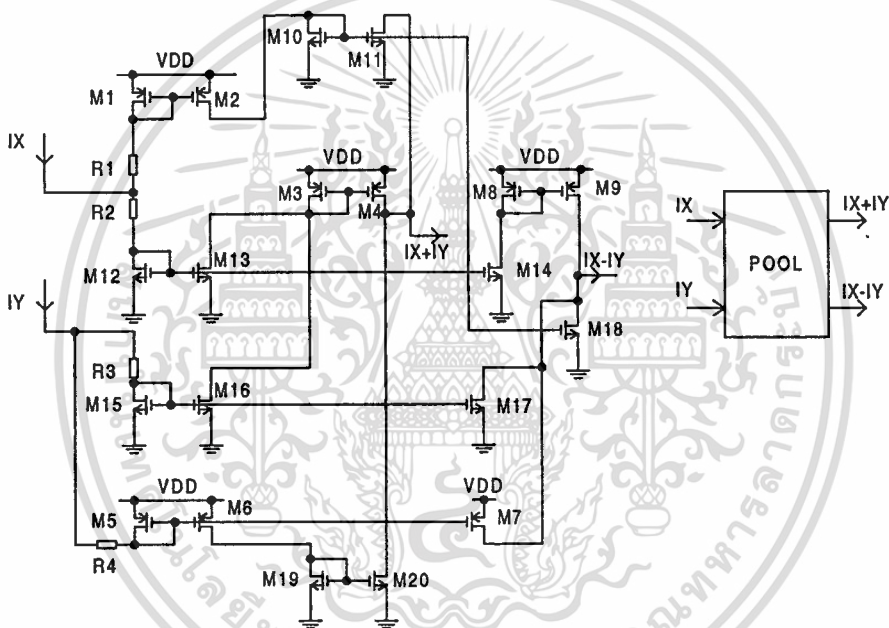
ถ้า a และ b เป็นกระแสอินพุตทั้งสองเราจะได้รับฟังก์ชันของการคูณโดยง่าย

ในบทความนี้จะทำการออกแบบวงจรรวมเป็นวงจรรูณสี่ควอดแดนท์ในโหมดกระแส โดยมีการออกแบบวงจรรวมโหมดกระแสขึ้นมาใหม่ และในส่วนของวงจรรวมกำลังสองผลบวกและผลลบของกระแสเหล่านั้นจะใช้วงจรรวมกำลังสองกระแสจาก [6] และจะใช้วงจรสะท้อนกระแสในการหาผลต่างของค่าผลบวกและผลลบยกกำลังสองของกระแสอินพุตทั้งสอง

2.1 วงจรรวมโหมดกระแส

จากวงจรรวมและลบกระแสส่วนมากในเทอมของผลบวกและผลลบของกระแสที่เอาต์พุตจะมีค่าคงที่ติดมาด้วย เมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรรูณสี่ควอดแดนท์จะทำให้เปอร์เซ็นต์ของค่าคงที่ที่เป็นตัวคูณสมการเอาต์

พุดของวงจรรูณมีค่าห่างไกลออกจาก 1 มากขึ้นซึ่งจะทำให้เอาต์พุดของวงจรรูณมีค่าผิดพลาดจากค่าที่เป็นจริงมากขึ้น หรือในวงจรวกและลบกระแสที่ [6] มีค่าของกระแสอินพุตตัวหนึ่งเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ซึ่งมีทิศทางการไหลของกระแสทางเดียว ทำให้ไม่สามารถแทนค่าบวกและค่าลบของกระแสอินพุตของวงจรรูณได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ออกแบบวงจรรูณโหมดกระแสซึ่งทำหน้าที่บวกและลบกระแสอินพุตโดยมีค่ากระแสเอาต์พุดเป็นผลบวกและผลลบของค่ากระแสอินพุตทั้งสองโดยตรงที่ทำงานได้ทั้งสี่ควอดแดนต์ ซึ่งจะออกแบบโดยใช้กฎของเคอร์ซอฟ วงจรรูณโหมดกระแสที่สร้างจะใช้วงจรสห้อนกระแสชนิด N และชนิด P เป็นหลัก โดยรูปของวงจรรูณโหมดกระแส และบล็อกจะแสดงในรูปที่ 1 จากรูปวงจรรูณโหมดกระแสจะใช้มอสเฟตทั้งหมด 20 ตัว แยกเป็น P แชนแนล 9 ตัว และ N แชนแนล 11 ตัว โดยมอสเฟตทุกตัวที่ใช้จะมีค่า $W = 150\mu\text{m}$, $L = 10\mu\text{m}$



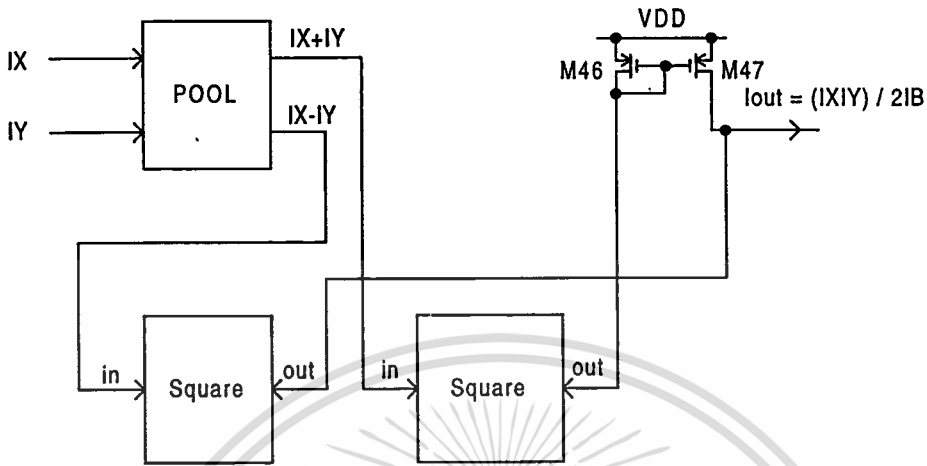
รูปที่ 1 วงจรรูณโหมดกระแส และบล็อกสัญลักษณ์

สำหรับชุดของ I_x จะมี M1, M2 เป็นชุดสห้อนกระแสสำหรับ I_x เป็นลบ และ M12, M13 สำหรับ I_x เป็นบวก ส่วนชุดของ I_y จะมี M5, M6 เป็นชุดสห้อนกระแสสำหรับ I_y เป็นลบ และ M15, M16 สำหรับ I_y เป็นบวก ตามลำดับ

สำหรับชุดของ $(I_x + I_y)$ ถ้า I_x และ I_y เป็นบวก วงจรสห้อนกระแสชุด M12, M13 และ M15, M16 จะสห้อนกระแส I_x และ I_y ตามลำดับ ผ่านวงจรสห้อนกระแสชุด M3, M4 ได้กระแส $(I_x + I_y)$ ออกที่จุดขาเดรนของ M4 ถ้าในกรณีที่ค่า I_x หรือ I_y เป็นลบจะถูกสห้อนกระแสผ่านชุด M1, M2, M10, M11 หรือ M5, M6, M19, M20 ตามลำดับ เพื่อไปลบกระแสเอาต์พุดลงกราวด์

สำหรับชุดของ $(I_x - I_y)$ ถ้า I_x และ I_y เป็นบวก วงจรสห้อนกระแสชุด M12, M14 และ M15, M17 จะสห้อนกระแส I_x และ I_y ตามลำดับ ผ่านวงจรสห้อนกระแสชุด M8, M9 ได้กระแส $(I_x - I_y)$

2.3 วงจรคูณสี่ควอดแดนต์โหมตกระแส ที่สร้างจากวงจรถวล และวงจรรยกกำลังสองโหมตกระแส



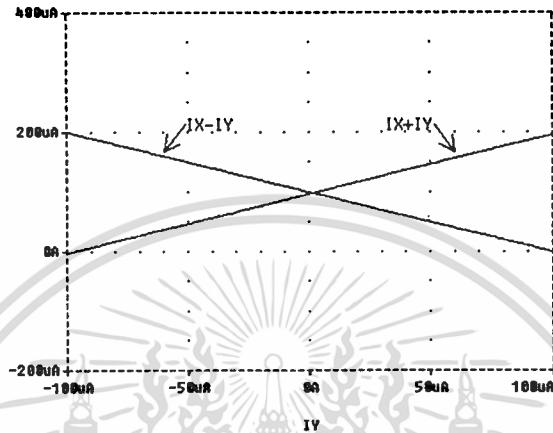
รูปที่ 3 วงจรคูณสี่ควอดแดนต์โหมตกระแสที่สร้างจากวงจรถวลและวงจรรยกกำลังสองโหมตกระแส

จากรูปที่ 3 กระแส I_x กับ I_y ผ่านเข้าลือกวงจรถวลจะได้กระแส $(I_x + I_y)$ กับ $(I_x - I_y)$ ออกทางเอาต์พุต ซึ่งจากนั้นกระแส $(I_x + I_y)$ กับ $(I_x - I_y)$ จะถูกป้อนเป็นกระแสอินพุตให้กับวงจรรยกกำลังสองโหมตกระแส ซึ่งจะได้เอาต์พุตออกมาเป็นกระแส $\frac{1}{8I_B}(I_x + I_y)^2$ และกระแส $\frac{1}{8I_B}(I_x - I_y)^2$ ตามลำดับจากนั้นจึงนำมาผ่านวงจรถวลย้อนกระแส และใช้หลักการกฎของเคอร์ชอฟเพื่อลบกระแสให้ได้กระแสเอาต์พุต ดังสมการอ้างอิง

$$\begin{aligned}
 I_{out} &= 2I_B + \frac{1}{8I_B}(I_x + I_y)^2 - 2I_B - \frac{1}{8I_B}(I_x - I_y)^2 \\
 &= \frac{1}{8I_B} \left((I_x + I_y)^2 - (I_x - I_y)^2 \right) \\
 &= \frac{1}{8I_B} (4I_x I_y) \\
 &= \frac{I_x I_y}{2I_B}
 \end{aligned} \tag{3}$$

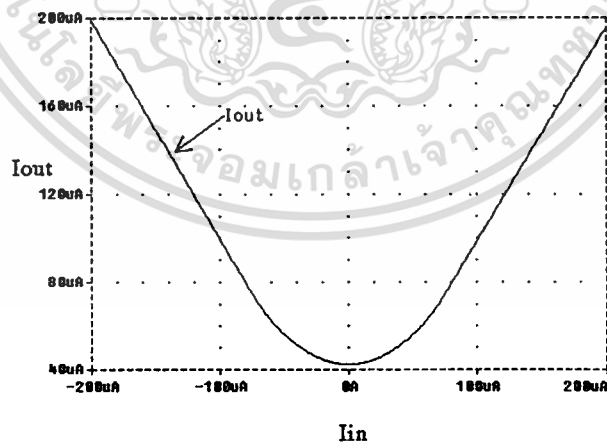
3. ผลการทดลอง

วงจรพหุโหนดกระแสในรูปที่ 1 นำมาเขียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice ได้กราฟแสดงผลการทดลองดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟ $(I_x + I_y)$ และ $(I_x - I_y)$ เมื่อ $I_x = 100\mu\text{A}$ และ $I_y = -100\mu\text{A}$ ถึง $100\mu\text{A}$

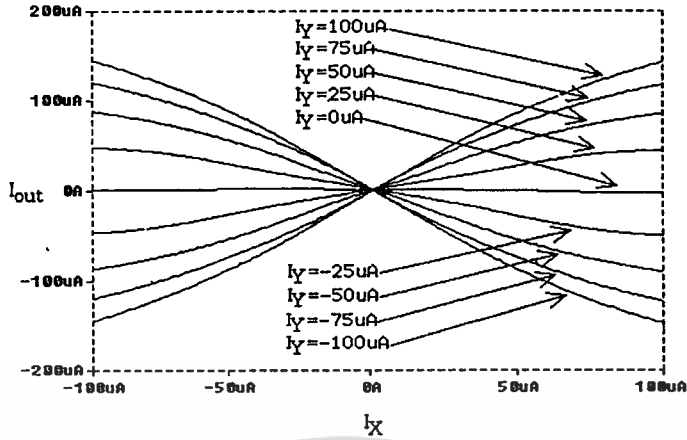
ส่วนวงจรยกกำลังสองกระแสในรูปที่ 2 นำมาเขียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice ได้กราฟแสดงผลการทดลองดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} กับ I_{out} ของวงจรยกกำลังสองโหนดกระแส

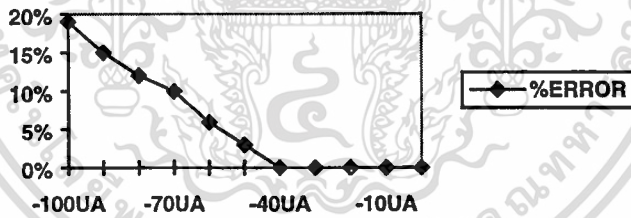
และวงจรคูณสี่ควอดเดนทีโหนดกระแสที่แสดงในรูปที่ 3 ได้นำมาเขียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice ได้ผลการทดลองเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{out} กับ I_x และ I_y ดังรูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

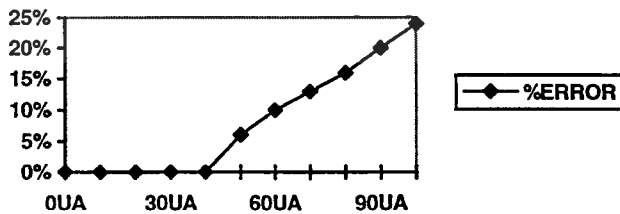


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{out} กับ I_x และ I_y โดยให้ $I_x = -100\mu A$ ถึง $100\mu A$
 $I_y = -100\mu A, -75\mu A, -50\mu A, -25\mu A, 0, 25\mu A, 50\mu A, 75\mu A, 100\mu A$

จากกราฟจะเห็นได้ว่าย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรจะอยู่ที่ประมาณ $-40\mu A$ ถึง $40\mu A$ สำหรับค่ากระแส I_x เนื่องจากข้อจำกัดของย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรพหุโหมดกระแสซึ่งทำงานได้ดีในช่วงที่กระแสมีค่าต่ำ และข้อจำกัดทางย่านการทำงานของวงจรรยกกำลังสองกระแส โดยกราฟแสดงค่าความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรจะแสดงในรูปที่ 7



(a)



(b)

รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร โดยสุ่มจากกราฟของ $I_y = -100\mu A$ โดยในรูปที่ 7(a) แสดงเมื่อค่า I_x เท่ากับ $-100\mu A$ ถึง 0 และรูปที่ 7(b) แสดงเมื่อค่า I_x เท่ากับ 0 ถึง $100\mu A$

4. สรุป

วงจรรูณสี่ควอดแดรนต์โหมตกระแสที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สร้างขึ้นจากวงจรรูณโหมตกระแส และวงจรรวมกำลังสองโหมตกระแส ซึ่งเป็นวงจรมีประสิทธิภาพดี และง่ายแก่การประยุกต์ใช้งานในด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นในรูปของกระแส ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับวงจรรูณโหมตแรงดันใน [3] และ [4] แล้วจะเห็นได้ว่าวงจรมีที่นำเสนอจะใช้มอสเฟตน้อยกว่ามาก จากการทดสอบเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice จะเห็นได้ว่าผลของการทดสอบจะได้ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีในย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรรูณ

5. เอกสารอ้างอิง

1. เกียรติศักดิ์ คมวัชร, วันชัย ธีรวิภา และ วรุตม์ สุระกำพลธร, 2537, "วงจรรูณอนาลอกโดยใช้ CMOS," การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17 หน้า 562-565, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
2. พรพรรณ ดุลยกาญจน์, พิพัฒน์ พรหมมี, กอบชัย เดชหาญ และ ถวิล กิ่งทอง, 2537, "วงจรรูณสัญญาณแบบสี่ควอดแดรนต์โดยใช้ซีมอส," การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 608-611.
3. พรเทพ จันท์คุณภาส, ธงชัย มณีชูเกต, วิภา แสงพิลลิตี, ปราโมทย์ วาดเขียน และ วิวัฒน์ กิรานนท์, 2539, "วงจรรูณสัญญาณด้วยหลักการควอดเทอร์-สแควร์โดยใช้ซีมอส," การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า EL-174 - EL-177.
4. Liu, S.I. and Chang, C.C., 1995, "CMOS Analog Divider and Four-Quadrant Multiplier Using Pool Circuits," *IEEE J.Solid-State Circuits*, vol 30, pp.1025-1029.
5. Tsay, S.W. and Newcomb, R., 1991, "A neuro-type pool arithmetic unit," *Proc.IEEE ISCAS'91* (Singapore), pp.2518-2521.
6. Ismail, M. and Fiez, T., 1994, "Analog VLSI Signal and Information Processing," McGraw-Hill Book Co., pp. 225-304.

ประวัติผู้เขียน

นาย อติศักดิ์ มนต์ประภัสสร เกิดวันที่ 18 ตุลาคม 2514 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา
 หลักสูตร อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (สื่อสาร) จากมหาวิทยาลัยสยาม ปี
 การศึกษา 2535 และเข้าทำงานเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัย
 เอเชียอาคเนย์ จนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้