

วงจรตามแรงดันแบบซีมอสที่มีช่วงปฏิบัติการกว้างและการประยุกต์ใช้งาน  
เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบบ่อนกัลป์กระแส

RAIL TO RAIL CMOS VOLTAGE FOLLOWER AND ITS APPLICATION FOR  
CURRENT FEEDBACK OPERATIONAL AMPLIFIER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1701-7

วงจรตามแรงดันแบบซิมอสที่มีช่วงปฏิบัติงานกว้างและการประยุกต์ใช้งาน  
เป็นวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส

RAIL TO RAIL CMOS VOLTAGE FOLLOWER AND ITS APPLICATION FOR  
CURRENT FEEDBACK OPERATIONAL AMPLIFIER



พัฒน์ บุญชากรณ์  
PATT BOONYAPORN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 60514  
วัน,เดือน,ปี..... - 3 ก.ค. 2549

b. 11516281  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2548  
ISBN 974-15-1701-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**RAIL TO RAIL CMOS VOLTAGE FOLLOWER AND ITS APPLICATION FOR  
CURRENT FEEDBACK OPERATIONAL AMPLIFIER**



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

**2005**

**ISBN 974-15-1701-7**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATED STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรตามแรงดันแบบซิมอสที่มีช่วงปฏิบัติงานกว้าง และการประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส
นักศึกษา	นายพัฒน์ บุญยาภรณ์
รหัสนักศึกษา	44061317
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. วรากร เกษมสุวรรณ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. กิตติพล ชิตสกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวงจรตามแรงดันแบบซิมอสที่มีช่วงปฏิบัติงานกว้าง และการประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส วงจรตามแรงดันที่นำเสนอออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีซิมอส 0.5 ไมโครเมตร วงจรที่นำเสนอสามารถทำงานภายใต้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง  $\pm 1.5$  โวลต์ โดยมีช่วงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุต  $\pm 1.25$  โวลต์ ที่โหลดความต้านทาน 250 โอห์ม วงจรตามแรงดันที่นำเสนอมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ (0.87% ที่สัญญาณอินพุต 1 เมกกะเฮิรตซ์  $\pm 1.25$  โวลต์) แบนด์วิธ (Bandwidth) ในการทำงานกว้าง (327 เมกกะเฮิรตซ์) และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ (12.2  $\Omega$  dB) วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสออกแบบโดยใช้โครงสร้างของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ วงจรทั้งสองได้รับการทดสอบประสิทธิภาพโดยโปรแกรม HSPICE หลังจากนั้นทำการเลย์เอาต์ (Layout) และเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของวงจรทั้งสองโดยโปรแกรม LEDIT และ โปรแกรม HSPICE ตามลำดับ

<b>Thesis Title</b>	Rail to Rail CMOS Voltage Follower and Its Application for Current Feedback Operational Amplifier
<b>Student</b>	Mr. Patt Boonyaporn
<b>Student ID.</b>	44061317
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electronics Engineering
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Varakorn Kasemsuwan
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Dr. Kitiphol Chitsakul

### ABSTRACT

This thesis presents a rail to rail CMOS voltage follower and its application for current feedback operational amplifier. The proposed voltage follower is implemented using a standard 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS technology. The circuit can operate under the supply voltage of  $\pm 1.5$  volts with the output swing as large as  $\pm 1.25$  volts (250  $\Omega$  load). The proposed voltage follower has low distortion (0.87% @ 1 MHz,  $\pm 1.25$  volts), large bandwidth (327 MHz) and low output impedance (12.2  $\Omega$ dB). The current feedback operational amplifier is then designed based on the proposed voltage follower. The performances of both circuits are verified using HSPICE. Finally, the layout of the circuits and their post simulations are carried out using LEDIT and HSPICE respectively.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญภาพ .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 กล่าวนำ .....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	1
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการทำวิจัย .....	1
1.3.1 แนวความคิดในการออกแบบวงจรตามแรงดัน .....	2
1.3.2 แนวความคิดในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส .....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย .....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอสทรานซิสเตอร์ .....	6
2.1 บทนำ .....	6
2.2 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ .....	6
2.3 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ .....	7
2.4 หลักการพื้นฐานของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ .....	8
2.4.1 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ .....	8
2.4.2 โหมดการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ .....	10
2.4.2.1 ช่วงคัทออฟ (Cutoff Region) .....	10
2.4.2.2 ช่วงเชิงเส้น (Linear Region) .....	10
2.4.2.3 ช่วงอิ่มตัว (Saturation Region) .....	11
2.4.3 แบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่ต่ำ .....	12
2.4.4 แบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่ปานกลาง .....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 ชนิดของแบบจำลองต่าง ๆ ของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรม	
H-Spice .....	17
2.5 บทสรุป .....	19
บทที่ 3 วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) .....	20
3.1 บทนำ .....	20
3.2 คุณสมบัติทั่วไปของวงจรตามแรงดัน .....	20
3.2.1 วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ .....	22
3.2.2 วงจรตามแรงดันแบบคลาสบี .....	25
3.2.3 วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบี .....	28
3.3 วงจรตามแรงดันที่ได้มีการนำเสนอมาก่อน .....	30
3.4 วงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	35
3.4.1 วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบีพื้นฐาน .....	35
3.4.2 หลักการทำงานของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	37
3.5 ผลการจำลองการทำงาน .....	43
3.5.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	44
3.5.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการ	
เลย์เอาต์ (Layout) .....	50
3.6 บทสรุป .....	55
บทที่ 4 วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier) .....	57
4.1 บทนำ .....	57
4.2 คุณสมบัติทั่วไปของวงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส .....	57
4.2.1 การทำงานของวงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส .....	58
4.2.2 วงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต และเอาต์พุตที่มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับ	
ศูนย์ .....	62
4.2.3 เสถียรภาพของวงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส .....	64
4.3 วงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการจำลองการทำงาน .....	73
4.4.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส ที่นำเสนอ .....	74
4.4.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส ที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	79
4.5 บทสรุป .....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	86
เอกสารอ้างอิง .....	88
ภาคผนวก .....	90
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบวงจรตามแรงดันที่นำเสนอด้วยโปรแกรม H-Spice .....	91
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) ด้วยโปรแกรม H-Spice .....	94
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอด้วย โปรแกรม H-Spice .....	105
ภาคผนวก ด. ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจาก การเลย์เอาต์ (Layout) ด้วยโปรแกรม H-Spice .....	111
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และ ได้รับการตีพิมพ์ .....	132
ประวัติผู้เขียน .....	147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นแชนซ์เม้นท์ชนิด NMOS และ PMOS .....	8
2.2 ชื่อเฉพาะของแบบจำลองมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ใน H-Spice .....	17
3.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ .....	43
3.2 ขนาดมอสทรานซิสเตอร์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	43
3.3 ประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	45
3.4 ประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ และวงจรตามแรงดันที่นำเสนอมาก่อน ....	49
3.5 ประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอทางกายภาพ (Layout) .....	50
4.1 ขนาดของทรานซิสเตอร์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส .....	73
4.2 ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	75
4.3 ประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ และวงจรขยาย สัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอมาก่อน .....	79
4.4 ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการ เลย์เอาต์ (Layout) .....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของวงจรมตามแรงดัน .....	2
1.2 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของวงจรมตามสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส .....	3
1.3 วงจรมตามสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ .....	4
2.1 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นแชนซ์มีนที่ชนิดเอ็น .....	6
2.2 โครงสร้างเทคโนโลยีซีมอส .....	7
2.3 การสร้างช่องทางเดินกระแสให้กับมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นแชนซ์มีนที่ชนิดเอ็น ..	8
2.4 การกำหนดจุดการทำงานให้มอสทรานซิสเตอร์ เมื่อ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS}$ มีค่าน้อย ..	9
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดัน $V_{DS}$ ที่มีค่าน้อย .....	9
2.6 การกำหนดจุดการทำงานให้มอสทรานซิสเตอร์ เมื่อ $V_{GS} > V_T$ และปรับค่า $V_{DS}$ มีค่ามากกว่า $V_{GS} - V_T$ .....	10
2.7 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS ...	12
2.8 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ต่ำ .....	12
2.9 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์กรณีพื้นฐานที่ไม่ต่ออยู่กับขาซอส	13
2.10 แบบจำลองวงจรมมูลของมอสทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ปานกลาง .....	15
2.11 การหาอัตราขยายกระแสขณะปิควงจรม .....	16
3.1 ลักษณะของกระแสเอาต์พุตสำหรับวงจรมตามแรงดัน (ก) แบบคลาสเอ (ข) แบบคลาสบีและ (ค) แบบคลาสเอบี .....	21
3.2 วงจรมตามแรงดันแบบคลาสเอ .....	22
3.3 คุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรมตามแรงดันแบบคลาสเอ .....	23
3.4 วงจรมตามแรงดันแบบคลาสบี .....	25
3.5 คุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรมตามแรงดันแบบคลาสบี .....	26
3.6 ความผิดเพี้ยนของวงจรมตามแรงดันแบบคลาสบี .....	26
3.7 วงจรมตามแรงดันแบบคลาสเอบี .....	29
3.8 คุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรมตามแรงดันแบบคลาสเอบี .....	30
3.9 วงจรมตามแรงดันแบบเสมือน (Pseudo Source Follower) .....	31
3.10 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรมตามแรงดันแบบเสมือน .....	32
3.11 แบบจำลองดีซีของวงจรมตามแรงดันแบบเสมือน .....	33
3.12 โครงสร้างแบบพื้นฐานของวงจรมตามแรงดันแบบคลาสเอบี .....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้จัดทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13 วงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	38
3.14 แสดงการแก้ปัญหาในเรื่องความไม่เท่ากันของแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และพี และการลดเอ๊าท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	39
3.15 คุณสมบัติทางคิซีของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	45
3.16 การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ...	46
3.17 การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทขนาด $\pm 1.25$ โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 50 โอห์ม .....	46
3.18 การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทขนาด $\pm 1.25$ โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 150 โอห์ม .....	47
3.19 การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทขนาด $\pm 1.25$ โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 250 โอห์ม .....	47
3.20 การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทขนาด $\pm 1.25$ โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 500 โอห์ม .....	48
3.21 ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	48
3.22 เอ๊าท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ .....	49
3.23 วงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	51
3.24 คุณสมบัติทางคิซีของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	51
3.25 การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	52
3.26 การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทขนาด $\pm 1.25$ โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 50 โอห์มของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	52
3.27 การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทขนาด $\pm 1.25$ โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 150 โอห์มของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.28 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด $\pm 1.25$ โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ต ที่โหลดความต้านทาน 250 โอห์มของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	53
3.29 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด $\pm 1.25$ โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ต ที่โหลดความต้านทาน 500 โอห์มของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	54
3.30 ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	54
3.31 เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) .....	55
4.1 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส .....	59
4.2 โครงสร้างของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ .....	59
4.3 การใช้งานวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะป้อนกลับแบบลบ .....	60
4.4 แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ขณะเปิดรูปของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (ก) ทางอุดมคติ (ข) ในทางปฏิบัติ .....	62
4.5 แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ขณะเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต และเอาต์พุตมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ .....	64
4.6 การตอบสนองความถี่ของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส ( $R_{2A} = 4\tau_2/C_c$ , $R_{2B} = 2\tau_2/C_c$ , $R_{2C} = \tau_2/C_c$ และ $R_{2D} = 0.5\tau_2/C_c$ ) .....	66
4.7 ขนาดและการตอบสนองเฟสของลู่อัตราขยาย (Loop Gain) ( $R'_{2A} = 10K\Omega$ , $R'_{2B} = 1K\Omega$ , $R'_{2C} = 100\Omega$ และ $R'_{2D} = 10\Omega$ ) .....	67
4.8 วงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	70
4.9 วงจรสะท้อนกระแสที่มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง (Regulated Cascode Current Mirror). .....	72
4.10 ความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	75
4.11 อัตราขยายทรานอิมพีแดนซ์ขณะเปิดรูปของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	76
4.12 การตอบสนองเวลาที่อัตราขยายเท่ากับ 20 dB ของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 การตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันไดอัตราขยายเท่ากับ 2 ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	77
4.14 อัตราสัญญาณขึ้นของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	77
4.15 อัตราสัญญาณลงของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	78
4.16 อินพุทอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสัญญาณอินพุทลบ ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ .....	78
4.17 วงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์(Layout) .....	80
4.18 ความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิธ (Bandwidth) ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์(Layout) .....	81
4.19 อัตราขยายทรานอิมพีแดนซ์ขณะเปิดลูปของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์(Layout) .....	82
4.20 การตอบสนองทางเวลาที่อัตราขยายเท่ากับ 20 dB ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์(Layout) .....	82
4.21 การตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันไดอัตราขยายเท่ากับ 2 ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์(Layout) .....	83
4.22 อัตราสัญญาณขึ้นของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์(Layout) .....	83
4.23 อัตราสัญญาณลงของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์(Layout) .....	84
4.24 อินพุทอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสัญญาณอินพุทลบ ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์(Layout) .....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันพบว่าอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีการพัฒนา และประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ อุตสาหกรรมวงจรรวม (Integrated Circuit) เป็นการนำวงจรหลาย ๆ วงจรมาประกอบเข้าด้วยกันบนผลึกสารกึ่งตัวนำ หนึ่งในจำนวนนั้นคือ วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) วงจรตามแรงดันมีประโยชน์ และความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้งานเป็นภาคเอาต์พุต คุณสมบัติที่ทำให้วงจรตามแรงดันโดดเด่นได้แก่ความสามารถในการขับโหลดที่มีความต้านทานต่ำ วงจรตามแรงดันจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรอื่น ๆ ได้อีกมากมาย ตัวอย่างการนำวงจรตามแรงดัน ไปประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier) ซึ่งมีวงจรตามแรงดันเป็นองค์ประกอบหลัก วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสมีคุณสมบัติโดดเด่นในเรื่องการมีอัตราสลับที่สูง และความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) จากที่กล่าวมาแล้วพบว่า วงจรตามแรงดัน และวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสมีความสำคัญ และประโยชน์อย่างมากสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

### 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

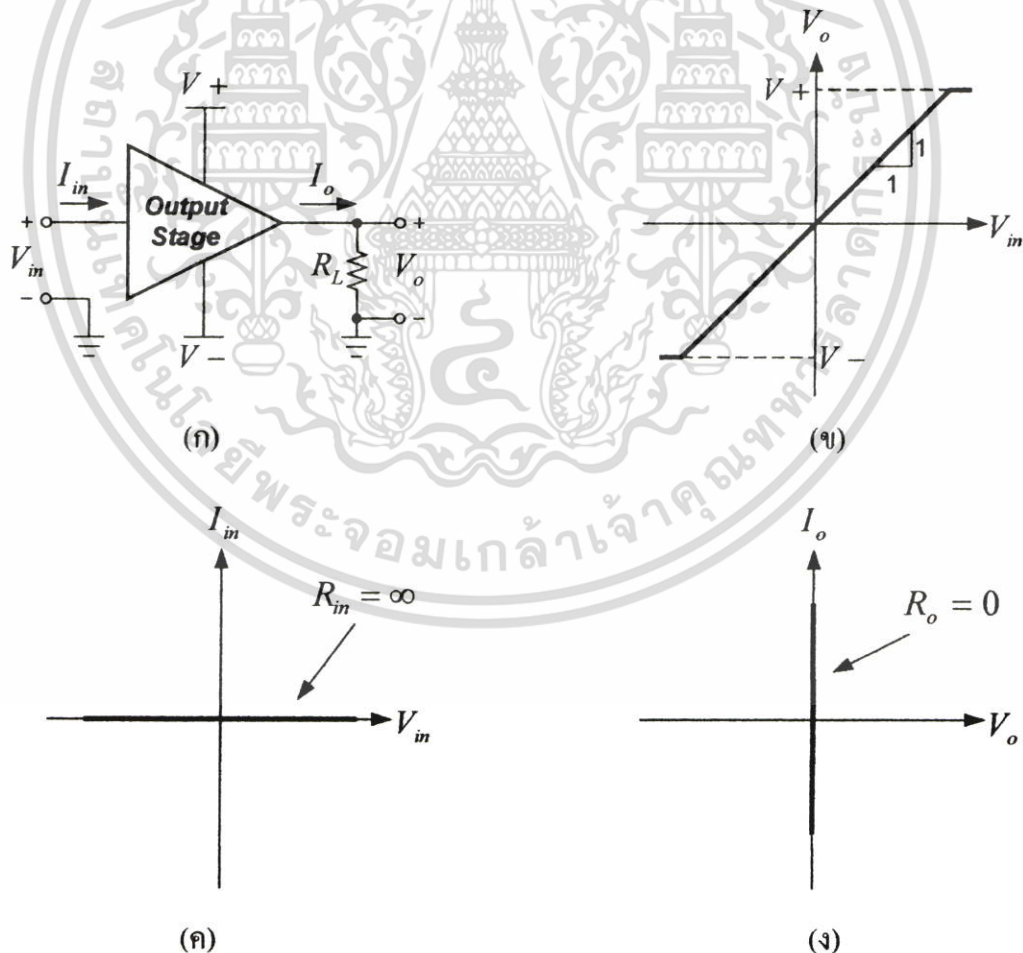
- ศึกษา และพัฒนาทักษะความรู้ ความเข้าใจในการออกแบบวงจรรวม
- วิเคราะห์ และหากระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรวม
- นำเสนอหลักการ และแนวความคิดในการออกแบบวงจรตามแรงดันแบบซีมอส (CMOS) ที่มีช่วงการปฏิบัติงานกว้าง
- นำเสนอหลักการ และแนวความคิดในการนำวงจรตามแรงดันที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส

### 1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่ง การวิเคราะห์ และออกแบบวงจรตามแรงดันแบบซีมอส (CMOS) ที่มีช่วงการปฏิบัติงานกว้าง ส่วนที่สอง การนำวงจรตามแรงดันที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส โดยมีแนวความคิดในการทำวิจัยครั้งนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3.1 แนวความคิดในการออกแบบวงจรตามแรงดัน

วัตถุประสงค์หลักในการนำวงจรตามแรงดันไปใช้งานคือ การใช้งานในลักษณะของวงจรถูกเอาท์พุท วงจรตามแรงดันที่มีประสิทธิภาพจึงควรมีความสามารถในการขับโหลดได้ดี สามารถส่งกำลังงานสูงสุดสู่โหลดได้อย่างเต็มที่ มีกำลังงานสูญเสียที่สภาวะสงบนิ่งต่ำ และสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง โดยสัญญาณมีความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด รูปที่ 1.1 แสดงคุณลักษณะของวงจรตามแรงดันทางอุดมคติ รูปที่ 1.1 (ข) แสดงคุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรตามแรงดัน จากรูปพบว่าวงจรตามแรงดันทางอุดมคติควรมีความเป็นเชิงเส้นสูง ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาท์พุทต่ำ การสวิงของสัญญาณเอาท์พุทควรใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟลบ ( $V^-$ ) และแหล่งจ่ายแรงดันไฟบวก ( $V^+$ ) เพื่อให้สัญญาณอินพุทสามารถส่งผ่านสู่โหลดได้อย่างเต็มที่ รูปที่ 1.1 (ค) แสดงอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดัน จากรูปพบว่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรควรมีค่าเป็นอนันต์ เพื่อที่จะไม่เป็นภาระของวงจรถูกก่อนหน้า รูปที่ 1.1 (ง) แสดงคุณสมบัติทางอุดมคติของวงจรตามแรงดันในเรื่องเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ จากรูปพบว่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรควรมีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสสู่โหลดได้ตามที่โหลดต้องการ



รูปที่ 1.1 คุณสมบัติทางอุดมคติของวงจรตามแรงดัน

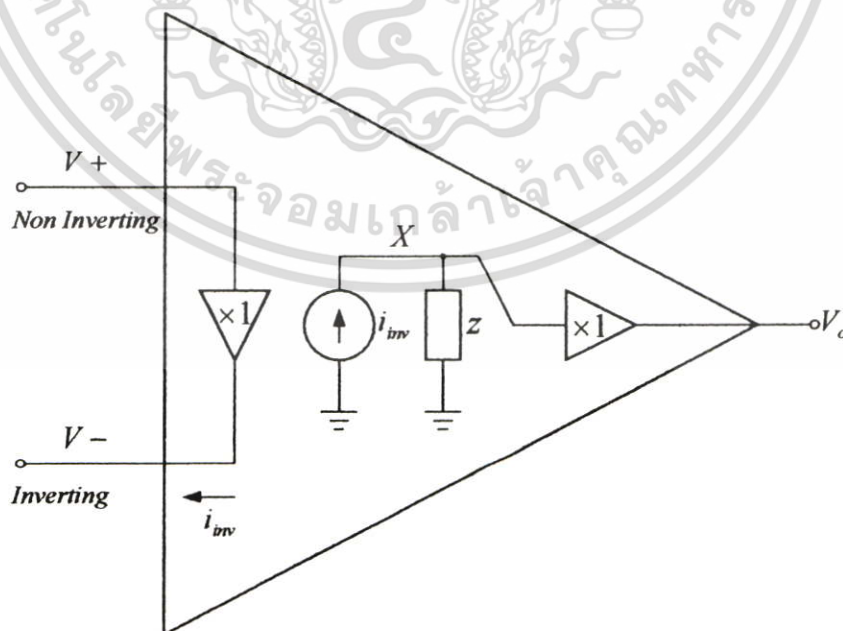
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแนวความคิดดังกล่าวสามารถสรุปคุณสมบัติที่สำคัญของวงจรมตามแรงดันได้ดังนี้

- สามารถขับโหลดที่มีความต้านทานต่ำได้
- มีช่วงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุตกว้าง
- อินพุตอิมพีแดนซ์สูง
- เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ
- สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง
- ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ
- กำลังงานสูญเสียต่ำ

### 1.3.2 แนวความคิดในการออกแบบวงจรมขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส

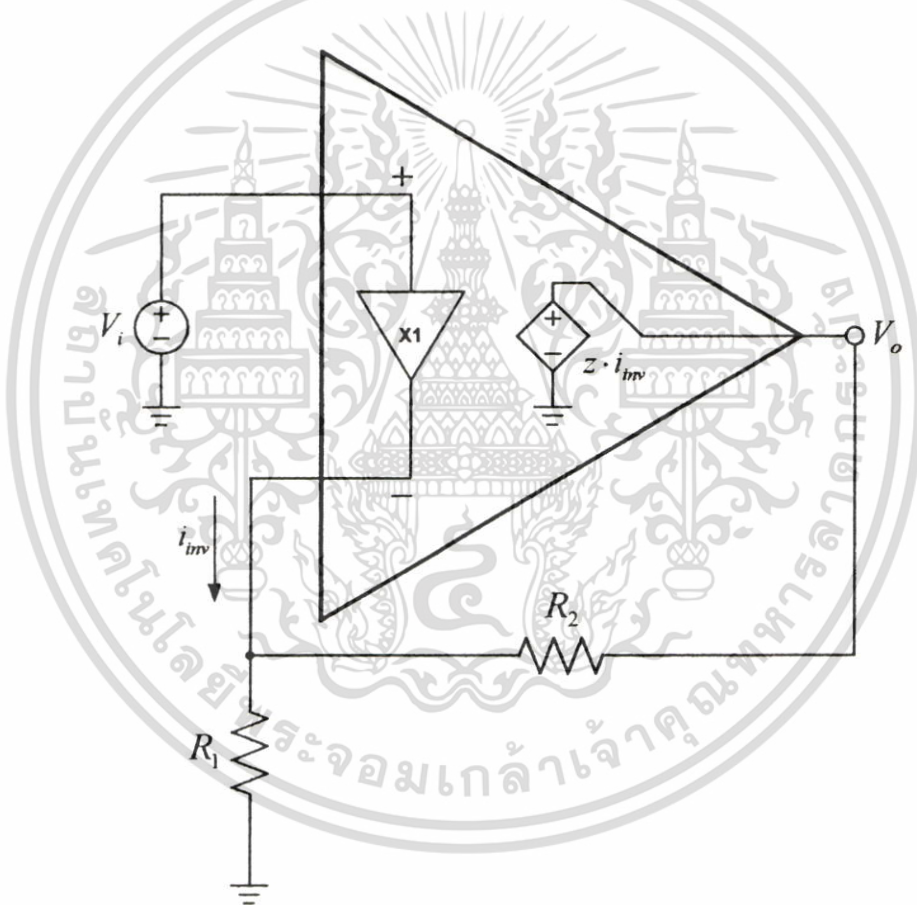
วงจรมขยายสัญญาณที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้แก่ วงจรมขยายสัญญาณแบบป้อนกลับแรงดัน (Voltage Feedback Operational Amplifier) ซึ่งมีขีดจำกัดในเรื่องความไม่เป็นอิสระระหว่างอัตราขยายและแบนด์วิดท์ (Bandwidth) และอัตราสลับของวงจรมมีค่าต่ำ วงจรมขยายสัญญาณอีกประเภทหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยม และแพร่หลายอย่างมากได้แก่ วงจรมขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier) คุณสมบัติโดดเด่นของวงจรมขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสได้แก่ความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยายและแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ทำให้สามารถกำหนดพารามิเตอร์ทั้งสองในการใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน และอัตราสลับของวงจรมมีค่าสูง ทำให้การทำงานที่ความถี่สูงมีความผิดเพี้ยนน้อย



รูปที่ 1.2 แบบจำลองทางอุดมคติของวงจรมขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.2 แสดงแบบจำลองทางอุดมคติของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส จากรูปพบว่าวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสประกอบด้วยวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตต่ออยู่ระหว่างขั้วสัญญาณอินพุตบวก และขั้วสัญญาณอินพุตลบ จากคุณสมบัติของวงจรตามแรงดันทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วอินพุตบวกมีค่าเป็นอนันต์ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วอินพุตลบมีค่าเท่ากับศูนย์ รูปที่ 1.3 แสดงการต่อวงจรในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วอินพุตลบมีค่าเท่ากับศูนย์ สัญญาณที่ป้อนกลับมาจึงเสมือนผ่านความต้านทาน  $R_2$  เพียงตัวเดียว จากผลดังกล่าวแบนด์วิดท์ (Bandwidth) จึงสามารถกำหนดได้ด้วยความต้านทาน  $R_2$  และค่าอัตราขยายของวงจรถ่ายสัญญาณสามารถกำหนดได้ด้วยความต้านทาน  $R_1$  ซึ่งต่ออยู่ระหว่างขั้วสัญญาณอินพุตลบและกราวด์ด้วยเหตุนี้อัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรถ่ายสัญญาณจึงเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน



รูปที่ 1.3 วงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ

จากรูปที่ 1.2 กระแส  $i_{mv}$  จากขั้วสัญญาณอินพุตลบจะถูกคัดลอก และสะท้อนด้วยวงจรสะท้อนกระแส ไปสู่โหนด  $X$  ซึ่งเป็นโหนดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ( $z$ ) กระแส  $i_{mv}$  จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันด้วยอัตราขยายทรานซิมพีแดนซ์ของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส สามารถหาแรงดันเอาต์พุตได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = z \cdot i_{inv} \quad (1.1)$$

แรงดันที่โหนด  $X$  จะถูกส่งผ่านสู่โหลดโดยวงจรวงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุต ซึ่งมีช่วงการสวิงของสัญญาณกว้าง และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ เพื่อให้สามารถขับ โหลดที่มีความต้านทานต่ำได้ตามต้องการ

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรตามแรงดัน โดยใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมโครเมตร วงจรที่นำเสนอสามารถทำงานภายใต้แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 1.5$  โวลต์ ช่วงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุต  $\pm 1.25$  โวลต์ ที่โหลดความต้านทาน 250 โอห์ม วงจรที่นำเสนอมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียต่ำ หลังจากนั้นนำวงจรตามแรงดันที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส การออกแบบจะทำการจำลอง และวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม H-Spice โดยใช้โมเดลพารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์ระดับ 49 และทำการเลย์เอาต์ (Layout) วงจรที่นำเสนอทั้งสองด้วยโปรแกรม L-Edit เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ และจากการเลย์เอาต์ (Layout) ซึ่งรวมผลของตัวเก็บประจุแฝง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานของมอสทรานซิสเตอร์

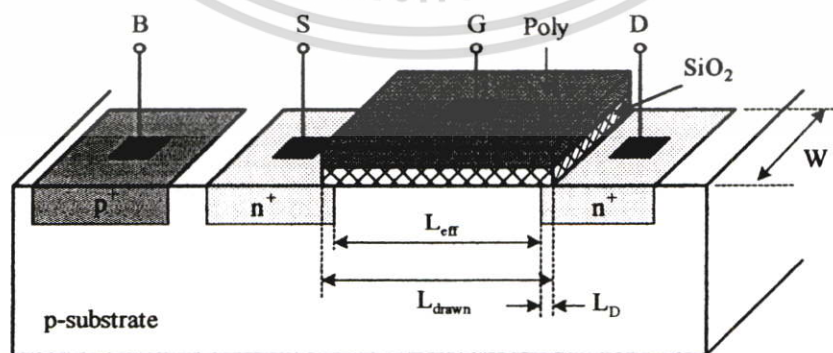
### 2.1 บทนำ

มอสทรานซิสเตอร์ (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีการทำงานในลักษณะที่แปลงแรงดันเป็นกระแส กระแสที่ได้เป็นผลมาจากอิเล็กตรอน หรือ โฮล ซึ่งเป็นพาหะข้างมาก (Majority Carrier) ขึ้นอยู่กับว่าอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) หรือมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) ดังนั้นมอสทรานซิสเตอร์จึงจัดอยู่ในอุปกรณ์จำพวกสารกึ่งตัวนำประเภทประจุเดียว (Unipolar Device)

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอสทรานซิสเตอร์ โดยกล่าวถึงโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ สัญลักษณ์ ย่านการทำงาน คุณสมบัติกระแส-แรงดัน และวงจรสมมูลที่ใช้ในการพิจารณาวงจรแบบสัญญาณขนาดเล็ก

### 2.2 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์

มอสทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ มอสทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชัน (Depletion) และมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ (Enhancement) มอสทรานซิสเตอร์แต่ละประเภทยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิดคือ มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) ซึ่งมีประจุพาหะอิเล็กตรอนเป็นตัวนำกระแส และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) ซึ่งมีประจุพาหะโฮลเป็นตัวนำกระแส วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้มอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ในการออกแบบทั้งหมด ดังนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์เท่านั้น



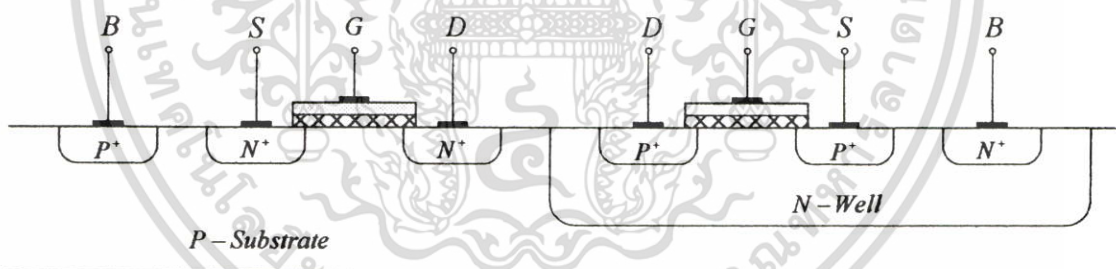
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดเอ็น(NMOS) ขั้วซอส (Source) และขั้วเดรน (Drain) ถูกสร้างขึ้น โดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นมาก (Heavily Doped N-Type Region) เข้าไปในฐานรอง (Substrate) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นแผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยว (Single-Crystal) ที่มีความหนาแน่นน้อย (Lightly Doped P-Type Substrate) ขั้วเกต (Gate) จะเป็นส่วนของโลหะ (Metal) หรือชั้นของโพลีซิลิกอน (Poly-Silicon) ซ้อนอยู่บนชั้นของออกไซด์ระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอส โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองเป็นความยาวของมอสทรานซิสเตอร์ (Channel Length, L) และมีระยะทางด้านข้าง(Side-Wall) เป็นความกว้างของมอสทรานซิสเตอร์ (Channel Width, W)

โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดพี (PMOS) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดเอ็น(NMOS) แต่จะสลับกัน คือ มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีจะประกอบด้วยผลึกฐานรองชนิดเอ็น (N-Type) ที่มีความหนาแน่นน้อยและมีการแพร่อะตอมสารเจือชนิดพีที่มีความหนาแน่นมากเข้าไปฐานรองเพื่อเป็นขั้วซอสและขั้วเดรน

เทคโนโลยีซีมอส (CMOS) เป็นการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) บนผลึกแผ่นสารกึ่งตัวนำเดียวกัน มอสทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งจะถูกสร้างอยู่ในบ่อฐานรอง (Well) โดยทั่วไปจะนิยมสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีในบ่อฐานรองชนิดเอ็น (N-Well) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างเทคโนโลยีซีมอส

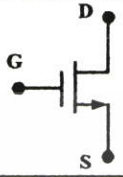
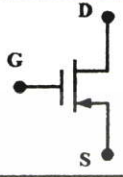
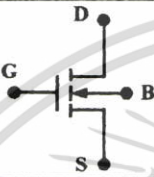
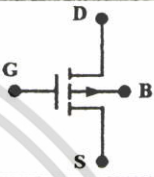
### 2.3 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์

ตารางที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดเอ็น และชนิดพี ช่องซ้ายมือแสดงสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดเอ็น (NMOS) และช่องขวามือแสดงสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดพี (PMOS) แฉวแรกเป็นการแสดง NMOS และ PMOS ที่มีฐานรอง (Bulk) และขาซอส (Source) เชื่อมถึงกัน ทำให้แรงดันระหว่างขั้วของฐานรอง (Bulk) และขั้วซอส มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $V_{BS} = 0$ ) จึงแสดงขั้วซอสเพียงขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดี่ยว การใช้งานจริงนั้นบางครั้งขาซอส และขาฐานรอง (Bulk) ไม่ได้ต่อถึงกัน แถวที่สองแสดง สัญลักษณ์ของ NMOS และ PMOS ในกรณีดังกล่าว

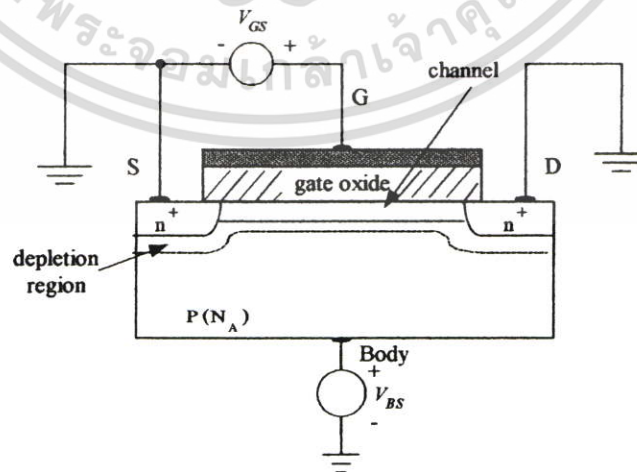
ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิด NMOS และ PMOS

NMOS	PMOS
	
	

## 2.4 หลักการพื้นฐานของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์

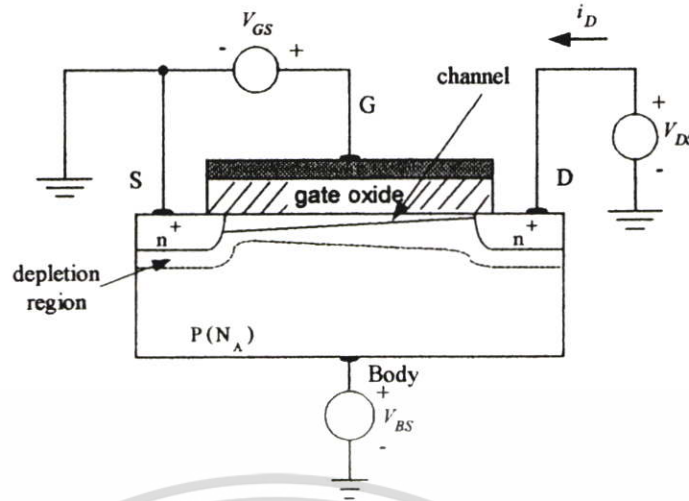
### 2.4.1 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์

รูปที่ 2.3 เมื่อป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขาเกตเทียบกับขาซอส ( $V_{GS}$ ) ที่มีขนาดเพียงพอจะทำให้เกิดช่องทางเดินของกระแสระหว่างขาซอส และขาเดรน ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดช่องทางเดินของกระแสนี้เรียกว่า แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage,  $V_T$ ) จากรูปที่ 2.3 พบว่ายังไม่มีกระแสไหลผ่านช่องทางเดินกระแสเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างขาเดรนและขาซอสมีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับการเกิดของช่องทางเดินกระแสในมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดพี (PMOS) สามารถทำได้โดยป้อนแรงดันค่าลบเข้าที่เกตเทียบกับซอสให้มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม



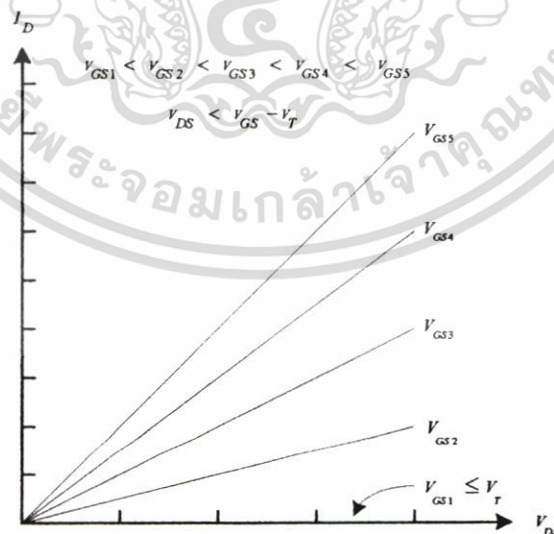
รูปที่ 2.3 การสร้างช่องทางเดินกระแสให้กับมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



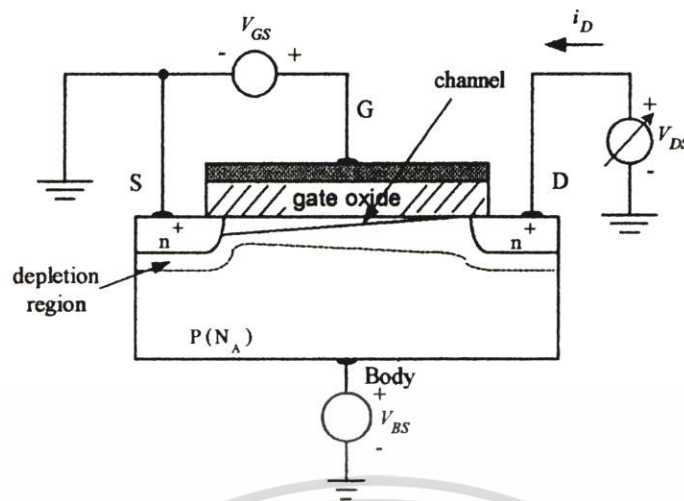
รูปที่ 2.4 การกำหนดจุดการทำงานให้มอสทรานซิสเตอร์ เมื่อ  $V_{GS} > V_T$  และ  $V_{DS}$  มีค่าน้อย

จากรูปที่ 2.4 เมื่อป้อนแรงดันบวกระหว่างขาเกตเทียบกับขาซอสให้มีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม และป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขาเดรนเทียบกับขาซอส ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง ( $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ ) กระแสเดรนจะไหลผ่านช่องทางเดินกระแสจากขาเดรนไปยังขาซอส โดยคุณสมบัติของกระแสเดรน ( $I_D$ ) เมื่อเทียบกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเดรนและซอส ( $V_{DS}$ ) แสดงดังรูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเดรน และซอสจะเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Region) ลักษณะการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ช่วงนี้มีลักษณะเป็นความต้านทานเชิงเส้นที่ถูกควบคุมโดยแรงดันที่ขาเกตเทียบกับขาซอส ( $V_{GS}$ )



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดัน  $V_{DS}$  ที่มีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การกำหนดจุดการทำงานให้มอสทรานซิสเตอร์ เมื่อ  $V_{GS} > V_T$  และปรับค่า  $V_{DS}$  มีค่ามากกว่า  $V_{GS} - V_T$

จากรูปที่ 2.6 เมื่อปรับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเดรนและซอส  $V_{DS}$  ให้มีค่ามากขึ้นจนกระทั่ง  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$  ลักษณะของช่องทางเดินกระแสจะมีลักษณะที่ลาดเอียงไปทางส่วนของเดรนจนถึงจุดที่เรียกว่าจุดพินช์ออฟ (Pinched Off) ศักย์ค่าไฟฟ้าที่จุดพินช์ออฟนี้จะมีค่าเท่ากับ  $V_{DSAT} = V_{GS} - V_T$  สถานะนี้มอสทรานซิสเตอร์จะทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation Region)

#### 2.4.2 โหมดการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์

การแบ่งย่านการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์พิจารณาจากการจัดไบอัสของมอสทรานซิสเตอร์ซึ่งได้แก่ แรงดัน  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$  และ  $V_T$  สามารถแบ่งช่วงการทำงานออกได้เป็น 3 ขอบเขต (Region) ดังต่อไปนี้

##### 2.4.2.1 ช่วงกัทออฟ (Cutoff Region) ; ( $V_{GS} < V_T$ )

เป็นช่วงที่มอสทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน กรณีนี้จะไม่มีช่องทางเดินกระแสจึงทำให้มอสทรานซิสเตอร์ไม่สามารถนำกระแสเดรน ( $I_D$ ) ได้

$$I_D = 0 \quad (2.1)$$

##### 2.4.2.2 ช่วงเชิงเส้น (Linear Region) ; ( $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ )

เป็นช่วงที่แรงดันไบอัสที่ขาเกต และขาซอสมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} > V_T$ ) และแรงดันระหว่างขาเดรนกับขาซอส ( $V_{DS}$ ) มีค่าน้อยกว่า  $V_{GS} - V_T$  โดยสามารถหากระแสเดรน ( $I_D$ ) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_D = k' \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (2.2)$$

โดยที่  $k'$  = สัมประสิทธิ์ความนำ (Transconductance Parameter) มีค่าเท่ากับ  $\mu_o C_{OX}$  ( $A/V^2$ )  
 $\mu_o$  = สภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron Mobility) ( $cm^2/V\text{-sec}$ )  
 $C_{OX}$  = ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของเกตออกไซด์ (Oxide Capacitance) ( $F/cm^2$ )

สำหรับกรณีที่แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส ( $V_{DS}$ ) มีค่าน้อยมาก เทอมของ  $V_{DS}^2/2$  ในสมการ (2.2) สามารถตัดทิ้งได้ กระแสเดรน ( $I_D$ ) จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยขึ้นอยู่กับแรงดันระหว่างขาเดรนกับขาซอส ( $V_{DS}$ ) กรณีนี้มอสทรานซิสเตอร์จะประพฤติตัวเสมือนตัวต้านทาน โดยมีค่าความต้านทาน ( $R_{ON}$ ) ดังนี้

$$\frac{V_{DS}}{I_D} = R_{ON} = \frac{L}{k'W(V_{GS} - V_T)} \quad (2.3)$$

#### 2.4.2.3 ช่วงอิ่มตัว (Saturation Region) ; ( $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ )

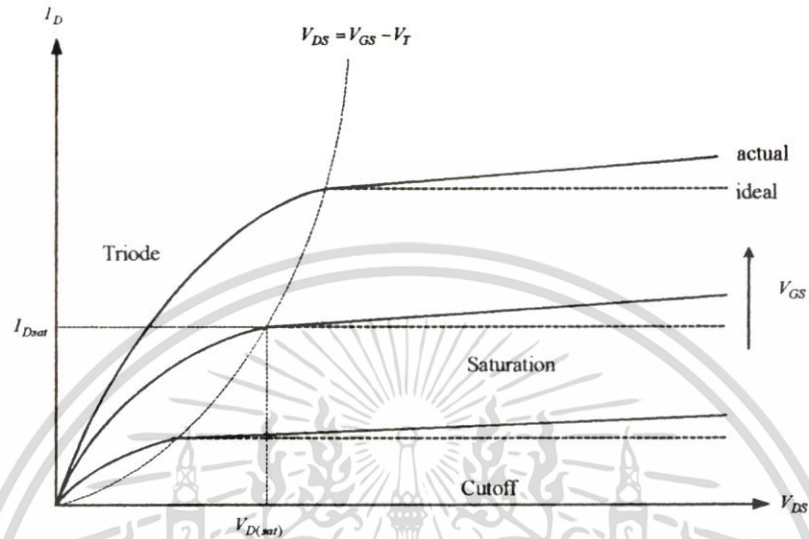
ช่วงอิ่มตัวเป็นช่วงที่แรงดันที่ขาเกต และขาซอสมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} > V_T$ ) และแรงดันระหว่างขาเดรนกับขาซอส ( $V_{DS}$ ) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $V_{GS} - V_T$  สามารถหากระแสเดรน ( $I_D$ ) ได้ดังนี้

$$I_D = \frac{k'W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2.4)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ แชนแนล เลนจ์ มอดูเลชัน (Channel Length Modulation) ( $V^{-1}$ )

รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) จากรูปพบว่าในความเป็นจริงแล้วการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ในย่านอิ่มตัวจะมีความยาวของช่องทางเดินกระแสลดลง อันเป็นผลมาจาก แชนแนล เลนจ์ มอดูเลชัน กระแส  $I_D$  ในช่วงอิ่มตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $V_{DS}$  มากขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.4) โดยความต้านทานเสมือนของสัญญาณขนาดเล็กที่ขาเดรนเมื่อเทียบกับขาซอส ( $g_d$ ) สามารถหาได้ดังนี้

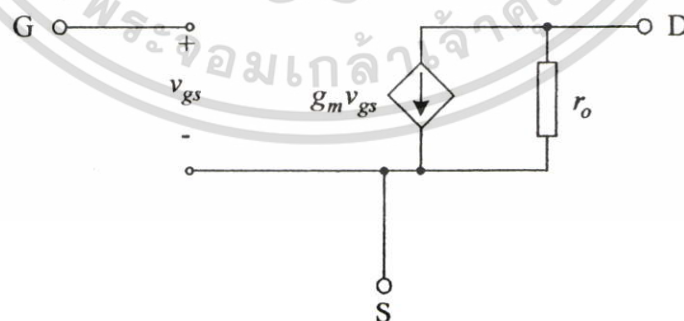
$$g_d = \left[ \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right]_{V_{GS}=\text{Constant}} = \lambda I_D \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.7 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS

#### 2.4.3 แบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่ต่ำ

รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่ต่ำ (Low Frequency Small Signal Equivalent Circuit Models) จากรูปเป็นการแทนมอสทรานซิสเตอร์ด้วยวงจรไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลของการตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็ก



รูปที่ 2.8 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

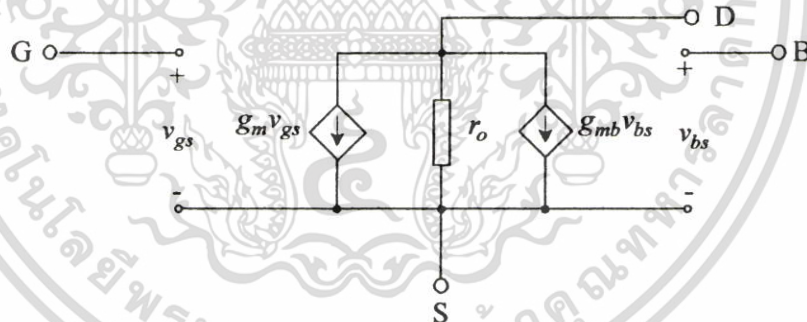
มอสทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแรงดันที่ขาเกตเทียบกับขาซอส ( $v_{gs}$ ) ให้เป็นกระแสที่ขาเดรน ( $g_m v_{gs}$ ) ความต้านทานที่ขาเกตมีค่าสูงมากซึ่งในทางอุดมคติถือว่ามีค่าเป็นอนันต์ ความต้านทานที่ขาเดรน ( $r_o$ ) มีค่าค่อนข้างสูง พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก คือ ค่าทรานคอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \quad (2.6)$$

สำหรับในกรณีที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิมิตัว ค่าทรานคอนดักแตนซ์ มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \sqrt{\frac{2K'W}{L} |I_D| (1 + \lambda V_{DS})} \cong \sqrt{\frac{2K'W}{L} |I_D|} \quad (2.7)$$

แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่ได้กล่าวถึงข้างต้น เป็นแบบจำลองที่ยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของฐานรอง (Body Effect) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อฐานรองนั้นไม่ได้ต่อยูกับขาซอส เมื่อรวมผลของฐานรองจะทำให้ได้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์กรณีที่ฐานรองไม่ต่อยูกับขาซอส

จากรูปที่ 2.9 สัญญาณขนาดเล็กที่เกิดขึ้นระหว่างฐานรอง และขาซอส ( $v_{bs}$ ) จะทำให้เกิดกระแสเดรนเท่ากับ  $g_{mb} v_{bs}$  โดย  $g_{mb}$  คือค่าทรานคอนดักแตนซ์ที่ฐานรอง (Body Transconductance) ของมอสทรานซิสเตอร์

$$g_{mb} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{BS}} \right|_{\substack{V_{GS}=\text{Constant} \\ V_{DS}=\text{Constant}}} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีมอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิ่มตัว จะได้

$$g_{mb} = g_m \frac{\gamma}{2(2|\phi_F| + V_{BS})^{\frac{1}{2}}} = \eta g_m \quad (2.9)$$

โดยที่  $\eta = \frac{\gamma}{2(2|\phi_F| + V_{BS})^{\frac{1}{2}}}$

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{sub}}{n_i}\right)$$

#### 2.4.4 แบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่ปานกลาง

รูปที่ 2.10 แสดงแบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่ปานกลาง ซึ่งรวมผลของตัวเก็บประจุแฝงได้แก่  $C_{GS}$ ,  $C_{GD}$ ,  $C_{GB}$ ,  $C_{SB}$  และ  $C_{DB}$  ตัวเก็บประจุ  $C_{SB}$  และ  $C_{DB}$  เป็นค่าตัวเก็บประจุแฝงบริเวณรอยต่อ (Junction Capacitance) ระหว่างฐานรองกับซอสและฐานรองกับเดรน ตามลำดับ สามารถหาค่าได้ดังนี้

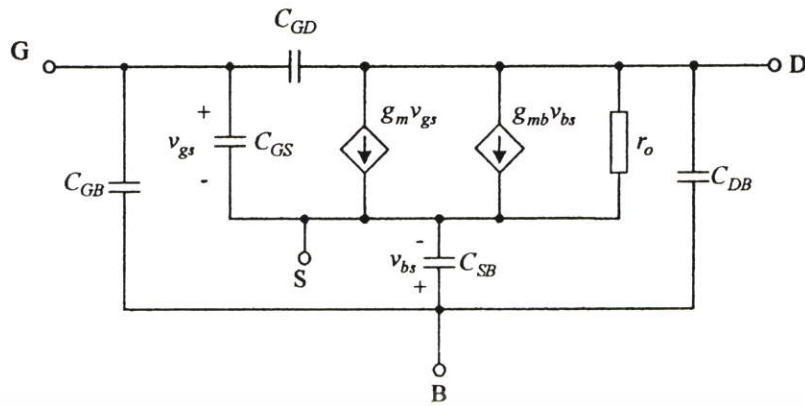
$$C_{SB} = \frac{A_S C_{SBO}}{\left(1 + \frac{V_{SB}}{\psi_O}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.10)$$

และ

$$C_{DB} = \frac{A_D C_{DBO}}{\left(1 + \frac{V_{DB}}{\psi_O}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.11)$$

โดยที่ $n = 2$	กรณีรอยต่อพีเอ็นเป็นแบบขั้นบันได (Step Junction)
$n = 3$	กรณีรอยต่อพีเอ็นเป็นแบบลาด (Graded Junction)
$C_{SB}$ และ $C_{DB}$	เป็นค่าความจุไฟฟ้ากรณี $v_{bs}$ และ $v_{bd}$ มีค่าเป็นศูนย์ ตามลำดับ
$\psi_O$	เป็นแรงดันที่รอยต่อพีเอ็นขณะที่แรงดันภายนอกเป็นศูนย์ (Built-in Potential)
$A_S$ และ $A_D$	เป็นพื้นที่ของซอสและเดรน รวมถึงพื้นที่ด้านข้าง (Side-Wall)
$V_{SB}$ และ $V_{DB}$	เป็นแรงดันระหว่างขาซอสกับฐานรองและแรงดันระหว่างขาเดรนกับฐานรอง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แบบจำลองวงจรสมมูลของมอสทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ปานกลาง

ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าระหว่างเกตและฐานรอง ( $C_{GB}$ ) เป็นค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าแฝงของออกไซด์ (Parasitic Oxide Capacitance) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างชั้นสารทางด้านเกต (โลหะหรือโพลีซิลิกอน) กับฐานรอง ขณะที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงเชิงเส้นและช่วงอิ่มตัว ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_{GB}$  จะมีค่าประมาณศูนย์ ขณะที่มอสทรานซิสเตอร์ไม่ทำงานหรืออยู่ในช่วงคัทออฟ สามารถหาค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_{GB}$  ได้ดังนี้

$$C_{GB} = C_{OX}WL + 2C_{GB0}L \quad (2.12)$$

ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_{GS}$  และ  $C_{GD}$  ขณะที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงเชิงเส้นจะมีค่าเท่ากัน โดยสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$C_{GS} = C_{GD} = \frac{1}{2}C_{OX}WL \quad (2.13)$$

เมื่อมอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิ่มตัว ช่องทางเดินกระแสจะหดแคบลง แรงดันที่ขาเดรนจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อทั้งช่องทางเดินกระแส และประจุที่เกต ทำให้ค่าของตัวเก็บประจุ  $C_{GD}$  มีค่าเท่ากับค่าตัวเก็บประจุแฝงที่ออกไซด์อันเกิดจากส่วนของเกตซ้อนทับกับส่วนของเดรน (Overlap Capacitor) โดยค่า  $C_{GD}$  มีค่าประมาณอยู่ในระดับ 1 ถึง 10 เฟมโตฟารัด

ค่าตัวเก็บประจุระหว่างขาเกต และขาซอส  $C_{GS}$  ในช่วงอิ่มตัวสามารถหาได้ดังนี้

$$C_{GS} = \frac{\partial Q_T}{\partial V_{GS}} = \frac{2}{3}C_{OX}WL \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

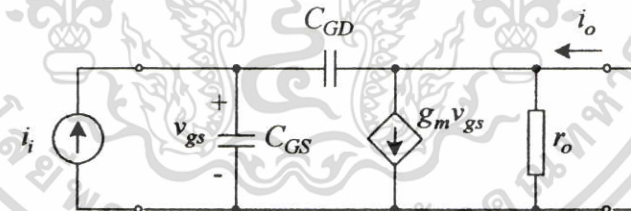
ในทางปฏิบัติค่าตัวเก็บประจุ  $C_{GS}$  ยังต้องรวมผลของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดจากค่าตัวเก็บประจุออกไซด์แฝง เนื่องจากพื้นที่ส่วนของเกตที่ซ้อนทับกับส่วนของซอสเช่นเดียวกับ  $C_{GD}$  ดังที่กล่าวมาแล้ว

คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่ง สำหรับการทำงานที่ความถี่สูงของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นวงจรถยาย คือ ความถี่ที่มีอัตราขยายเป็นหนึ่ง (Unity Gain Frequency,  $f_T$ ) โดยนิยามว่าเป็นความถี่ที่อัตราขยายกระแสของมอสทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่ในรูปแบบของวงจรถวมมอนซอส (Common Source Configuration) ขณะที่เป็นวงจร (Short-Circuit) มีค่าเป็นหนึ่ง รูปที่ 2.11 แสดงแบบจำลองไฮบริด-ไพ (Hybrid- $\pi$ ) ของมอสทรานซิสเตอร์ในลักษณะวงจรถวมมอนซอสพร้อมทั้งกระแสอินพุต ( $i_i$ ) และกระแสเอาต์พุต ( $i_o$ ) การหาอัตราขยายกระแสขณะเป็นวงจรจะต้องทำการป้อนแหล่งกำเนิดกระแสอินพุต  $i_i$  ที่ขาเข้า ซึ่งจะได้กระแสที่ขาออก ( $i_o$ ) มีค่าเท่ากับ

$$i_o = g_m v_{gs} - s C_{GD} v_{gs} \quad (2.15)$$

จากที่กล่าวข้างต้น  $C_{GD}$  มีค่าน้อยมาก ทำให้พจน์สุดท้ายของสมการ (2.15) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะได้สมการกระแสขาออกใหม่ มีค่าเป็น

$$i_o \cong g_m v_{gs} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.11 การหาอัตราขยายกระแสขณะเป็นวงจร

จากรูปที่ 2.11 สามารถแสดง  $v_{gs}$  ในพจน์ของกระแสขาเข้า  $i_i$  ได้ดังนี้

$$v_{gs} = \frac{i_i}{s(C_{GS} + C_{GD})} \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.16) และ (2.17) จะได้อัตราขยายกระแสขณะเป็นวงจรมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{i_o}{i_i} = \frac{g_m}{s(C_{GS} + C_{GD})} \quad (2.18)$$

โดยที่  $s = j\omega$

จากสมการ (2.18) จะได้ความถี่ที่ทำให้ขนาดของอัตราขยายกระแสมีค่าเป็นหนึ่งดังนี้

$$\omega_T = \frac{g_m}{(C_{GS} + C_{GD})} \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.19) จะได้ความถี่  $f_T$  มีค่าเท่ากับ

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{GS} + C_{GD})} \quad (2.20)$$

โดยที่  $f_T = \omega_T/2\pi$

#### 2.4.5 ชนิดของแบบจำลองต่างๆ ของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรม H-Spice

แบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ด้วยโปรแกรม H-Spice มีอยู่หลายระดับซึ่งในแต่ละระดับมีชื่อเรียกเฉพาะดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชื่อเฉพาะของแบบจำลองมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ใน H-Spice

ระดับที่	ชื่อแบบจำลองมอสทรานซิสเตอร์
1	Schichman-Hodges Model
2	MOS2 Grove-Frohman Model (SPICE 2G)
3	MOS3 Empirical Model (SPICE 2G)
4	Grove-Frohman: Level 2 Model Derived from SPICE 2E.3
5	AMI-ASPEC Depletion and Enhancement (Taylor-Huang)
6	Lattin-Jenkins-Grove (ASPEC Style Parasitics)
7	Lattin-Jenkins-Grove (SPICE Style Parasitics)
8	Advance Level 2 Model
9	AMD
10	AMD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ต่อ

ระดับที่	ชื่อแบบจำลองมอสทรานซิสเตอร์
11	Fluke-Mosaid Model
12	CASMOS Model (GTE style)
13	BSIM Model
14	Siemens Level = 4
15	User-Define Model Based on Level 3
16	Not Used
17	Cypress model
18	Sierra 1
19	Dallas Semiconductor Model
20	GE_CRD FRANZ
21	STC-ITT
22	CASMOS (GEC style)
23	Siliconix
24	GE-Intersil Advanced
25	CASMOS (Rutherford)
26	Sierra 2
27	SOSFET
28	BSIM Derivative; Meta-Software Proprietary Model
29	Not Used
30	VTI
31	Motorola
32	AMD
33	National Semiconductor
34	(EPFL) Not Used
35	Siemens
36	Sharp
37	TI
38	IDS: Cypress Depletion Model
39	BSIM2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.2 ต่อ

ระดับที่	ชื่อแบบจำลองมอสทรานซิสเตอร์
46	SGS-Thomson MOS Level 3
47	BSIM3 Version 2.0
49	BSIM3 Version 3.0
50	Philips MOS9

ในการเลือกชนิดของแบบจำลองสำหรับการจำลองการทำงานของวงจรมานั้น โดยทั่วไปจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่น แบบจำลองในระดับที่ 1 เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์พื้นฐานโดยผู้ออกแบบ การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับ 1 นี้ให้ผลที่ได้ไม่ถูกต้องนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับมอสทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเล็กเพราะ โมเดลระดับนี้ไม่ได้รวมผลของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก และผลของการนำกระแสในย่านที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Sub-Threshold)

เพื่อให้การจำลองการทำงาน ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำจึง ได้มีการพัฒนาแบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ใช้ได้กับมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กที่คู่กันในลักษณะวงจรมอนอลอก ตัวอย่างเช่น แบบจำลองในระดับที่ 28 ของ BSIM และแบบจำลองระดับที่ 50 (MOS9 ของฟิลิปส์ (Phillips)) เป็นต้น

## 2.5 บทสรุป

ในบทที่ 2 นี้เป็นการสรุปหลักการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ทำให้ทราบถึงโครงสร้างสัญลักษณ์ ย่านการทำงาน คุณสมบัติกระแสและแรงดัน วงจรสมมูลขนาดเล็กที่ความถี่ต่ำและความถี่ปานกลาง การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์จะทำงานโดยใช้แรงดันที่ขาเกตเป็นตัวควบคุม ความคุมปริมาณกระแสเดรน โดยสามารถแบ่งช่วงการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงคัทออฟ (Cutoff Region) ช่วงเชิงเส้น (Linear Region หรือ Triode Region) และช่วงอิ่มตัว (Saturation Region)

## บทที่ 3

### วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower)

#### 3.1 บทนำ

วงจรขยายโดยทั่วไปนั้นจะมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรที่สูง วงจรขยายจึงมีปัญหาอย่างมากในเรื่องของการขับโหลด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขับโหลดที่มีขนาดเล็กเนื่องจากจะทำให้อัตราขยายของวงจรขยายลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรเพื่อต่อระหว่างวงจรขยาย และ โหลดของวงจร วงจรที่ต่ออยู่ระหว่างวงจรขยาย และ โหลดจะต้องสามารถรักษาประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขยายได้ สัญญาณเอาต์พุตจะต้องไม่มีความผิดเพี้ยนจากสัญญาณที่ได้จากวงจรขยาย เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรจะต้องมีค่าต่ำ เพื่อสามารถขับโหลดที่มีขนาดเล็กได้ จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าวงจรที่มีคุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ วงจรตามแรงดัน

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทั่วไปของวงจรตามแรงดัน ประเภทของวงจรตามแรงดัน วงจรตามแรงดันที่มีการนำเสนอมาก่อน ในเนื้อหาตอนท้ายจะเป็นการนำเสนอหลักการทํางาน และผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

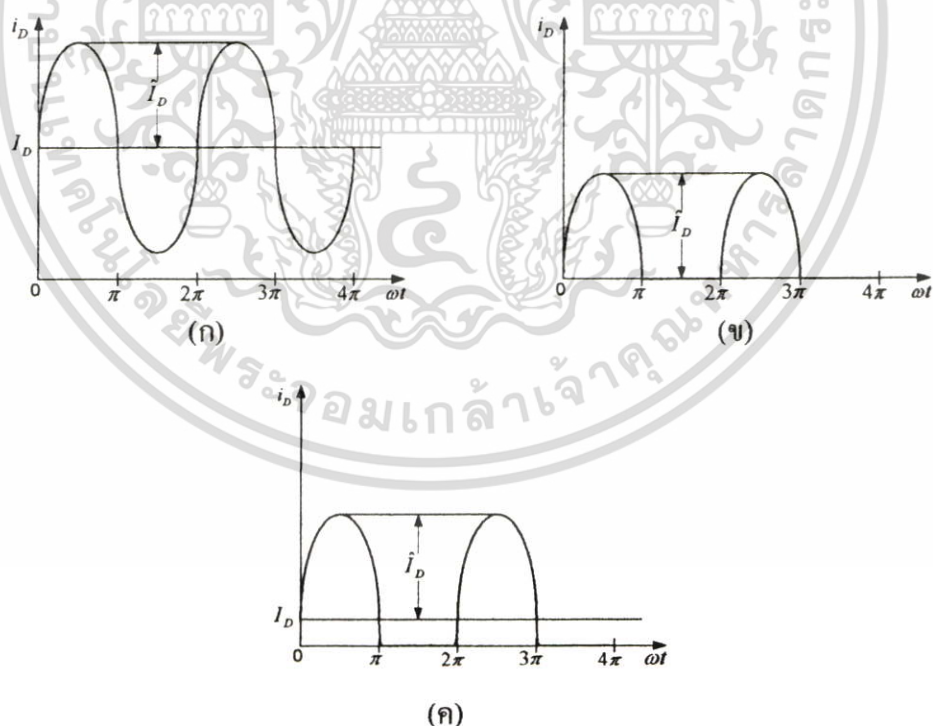
#### 3.2 คุณสมบัติทั่วไปของวงจรตามแรงดัน

วงจรตามแรงดันเป็นวงจรที่มีความสำคัญ และมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในวงจรมานานทุกวันนี้ ความสามารถที่โดดเด่นของวงจรตามแรงดันได้แก่ความสามารถในการขับโหลดที่มีความต้านทานต่ำ วงจรตามแรงดันควรให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด และมีความเป็นเชิงเส้นสูง นอกจากนั้นแล้วการส่งกำลังงานสู่โหลดจะต้องมีกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด วงจรตามแรงดันที่ดีจึงควรมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถขับโหลดที่มีความต้านทานต่ำได้
- การสวิตช์ของสัญญาณเอาต์พุตมีขนาดใหญ่
- อินพุตอิมพีแดนซ์สูง
- เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ
- สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้
- ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ
- กำลังงานสูญเสียต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะสัญญาณกระแสเอาต์พุตที่เกิดจากการป้อนสัญญาณอินพุตจากภายนอกเข้าสู่วงจร จากรูปสามารถแยกประเภทของวงจรตามแรงดันได้ดังนี้ รูปที่ 3.1 (ก) แสดงลักษณะสัญญาณกระแสเอาต์พุตของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ ขนาดของกระแสไบอัส  $I_B$  มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของกระแสเอาต์พุต  $I_o$  ดังนั้นทรานซิสเตอร์ในวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอจึงทำงานตลอดช่วงของสัญญาณอินพุต หรือ 360 องศา รูปที่ 3.1 (ข) แสดงกระแสเอาต์พุตของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี กระแสไบอัสของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีมีค่าเท่ากับศูนย์ ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีจะทำงานเพียงครึ่งเดียวของสัญญาณอินพุต หรือ 180 องศา ดังนั้นสำหรับสัญญาณครึ่งลบจึงต้องใช้ทรานซิสเตอร์อีกชุดหนึ่งสลับกันทำงาน สำหรับรูปที่ 3.1(ค) แสดงกระแสเอาต์พุตของวงจรตามแรงดันแบบคลาสซี การทำงานของวงจรจะอยู่ระหว่างวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ และวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี กระแสไบอัสของวงจรตามแรงดันแบบคลาสซีจะไม่เท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าน้อยกว่ากระแสเอาต์พุต สัญญาณเอาต์พุตจึงมีขนาดใหญ่กว่าครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุต หรืออยู่ในช่วง 180-360 องศา ในทำนองเดียวกับวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีสำหรับสัญญาณครึ่งลบจะต้องอาศัยทรานซิสเตอร์อีกชุดหนึ่งสลับกันทำงาน กระแสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองชุดจะสลับกันจ่ายสู่โหลด โดยมีช่องว่างระหว่างการสลับสับเปลี่ยนการทำงานของทรานซิสเตอร์ทั้งสองชุด ใกล้เคียงศูนย์

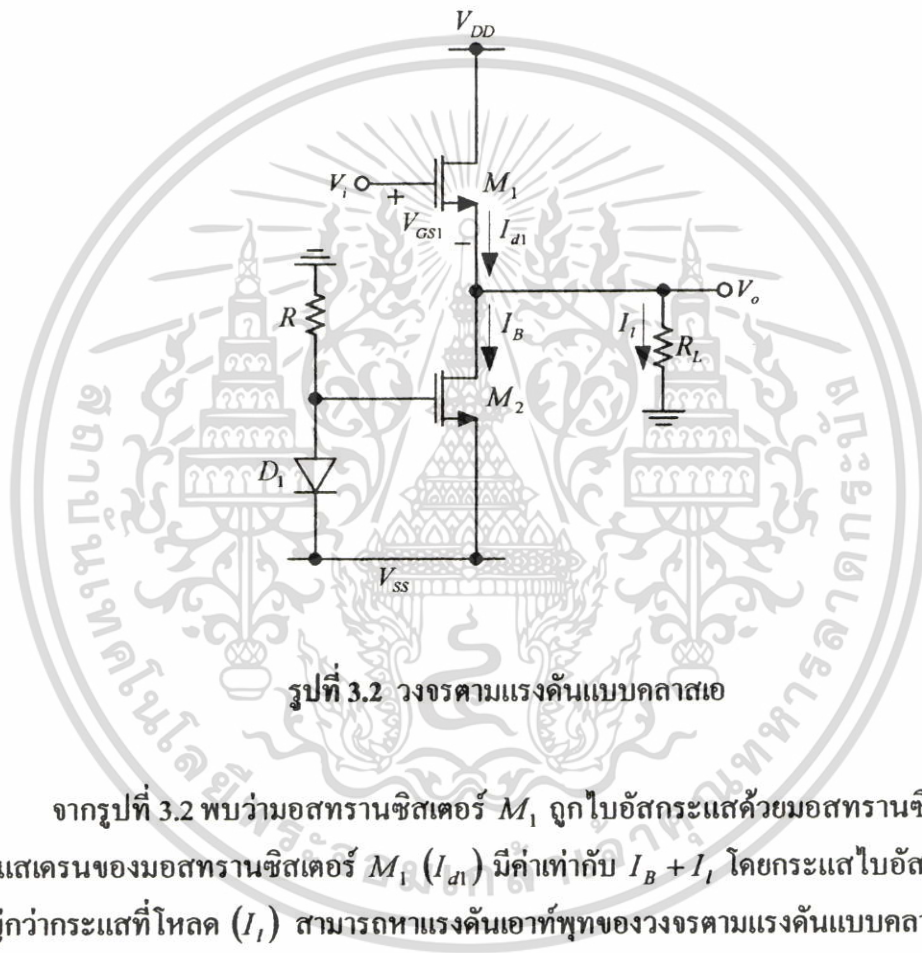


**รูปที่ 3.1** ลักษณะของกระแสเอาต์พุตสำหรับวงจรตามแรงดัน (ก) แบบคลาสเอ (ข) แบบคลาสบี และ (ค) แบบคลาสซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ สัญญาณอินพุตถูกป้อนเข้าที่ขาเกต และสัญญาณเอาต์พุตจะออกทางขาซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  สำหรับสัญญาณขนาดใหญ่แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตลบด้วยแรงดันเกตซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  ทำให้เกิดแรงดันออฟเซตระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต อัตราขยายของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากขาซอสจะตามแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้าขาเกต เป็นให้เหตุผลเรียกวงจรในลักษณะนี้ว่าวงจรตามแรงดัน



รูปที่ 3.2 วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ

จากรูปที่ 3.2 พบว่ามอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  ถูกไบอัสกระแสด้วยมอสทรานซิสเตอร์  $M_2$  กระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  ( $I_{d1}$ ) มีค่าเท่ากับ  $I_B + I_L$  โดยกระแสไบอัส  $I_B$  มีขนาดใหญ่กว่ากระแสที่โหลด ( $I_L$ ) สามารถหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอได้ดังนี้

$$V_o = V_i - V_{GS1} \quad (3.1)$$

รูปที่ 3.3 แสดงความเป็นเชิงเส้นของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ จากรูปพบว่าขีดจำกัดความเป็นเชิงเส้นซีกบวกถูกจำกัดอยู่ที่แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเดรน และขาซอสในช่วงอิมิตัวของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  โดยสามารถหาขีดจำกัดซีกบวกของวงจรได้ดังนี้

$$V_{o(MAX)} = V_{DD} - V_{DSAT1} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของซีกัลบความเป็นเชิงเส้นสามารถพิจารณาได้สองกรณีคือ กรณีแรกพิจารณาจากมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  คัทออฟ โดยสามารถหาขีดจำกัดซีกัลบของวงจรได้ดังนี้

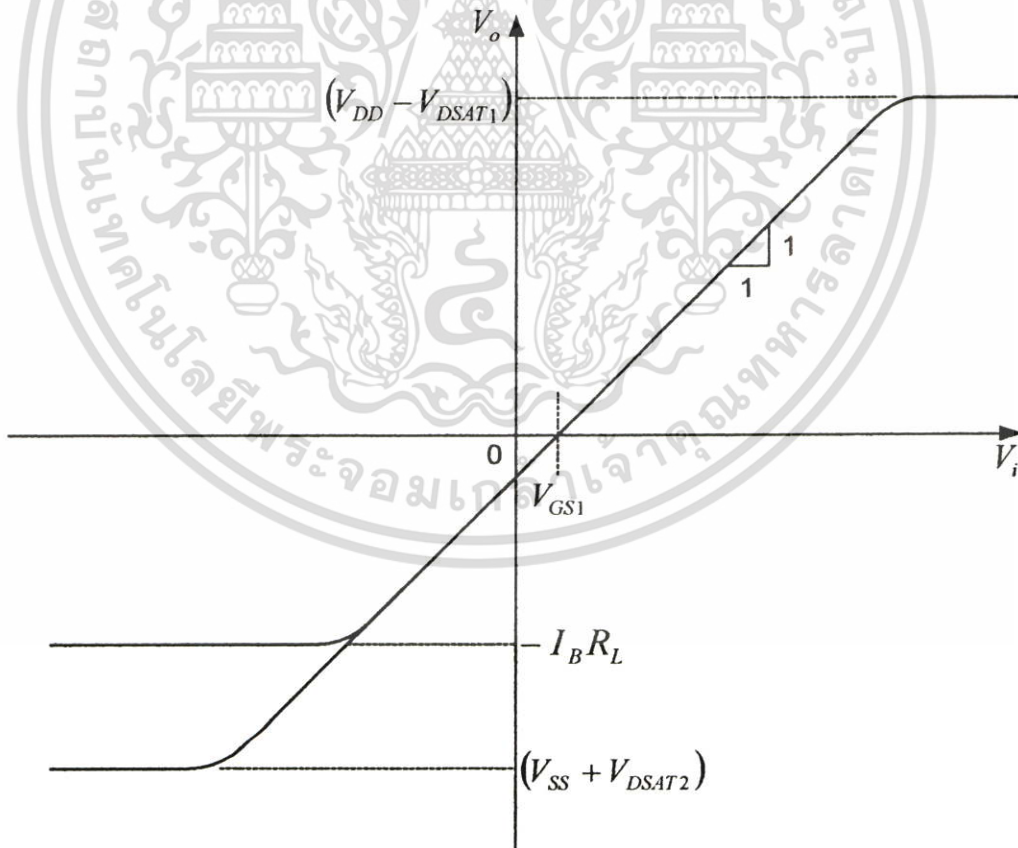
$$V_{o(MIN)} = -I_B R_L \quad (3.3)$$

หรือพิจารณาจากมอสทรานซิสเตอร์  $M_2$  ในสภาวะอิ่มตัวดังนี้

$$V_{o(MIN)} = -V_{DD} + V_{DSAT2} \quad (3.4)$$

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระแสไบอัส  $I_B$  และค่าความต้านทาน  $R_L$  ขีดจำกัดของแรงดันเอาต์พุตต่ำสุดจะเท่ากับสมการที่ (3.4) ก็ต่อเมื่อกระแสไบอัส  $I_B$  มีค่าสูงกว่าขนาดของกระแสไหลคัตนี้

$$I_B \geq \frac{|-V_{DD} + V_{DSAT2}|}{R_L} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.3 คุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันสามารถพิจารณาได้จาก

$$\eta \equiv \frac{\text{load power } (P_L)}{\text{supply power } (P_S)} \quad (3.6)$$

สัญญาณแรงดันเอาพุทของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $\hat{V}_o$  ดังนั้นค่าของกำลังงานเฉลี่ยที่โหลดสามารถหาได้ดังนี้

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_o^2}{R_L} \quad (3.7)$$

กระแสไบอัส  $I_B$  ที่มอสทรานซิสเตอร์  $M_2$  และกระแสเฉลี่ยที่มอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  มีค่าเท่ากับ  $I_B$  ดังนั้นกำลังงานเฉลี่ยที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงบวก และแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงลบจึงมีค่าเท่ากับ  $V_{DD}I_B$  สามารถหาผลรวมของกำลังงานเฉลี่ย ( $P_S$ ) ที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงได้ดังนี้

$$P_S = 2V_{DD}I_B \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.7) และ (3.8) สามารถหาประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1}{4} \frac{\hat{V}_o^2}{I_B R_L V_{DD}} \\ &= \frac{1}{4} \left( \frac{\hat{V}_o}{I_B R_L} \right) \left( \frac{\hat{V}_o}{V_{DD}} \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

โดยวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ

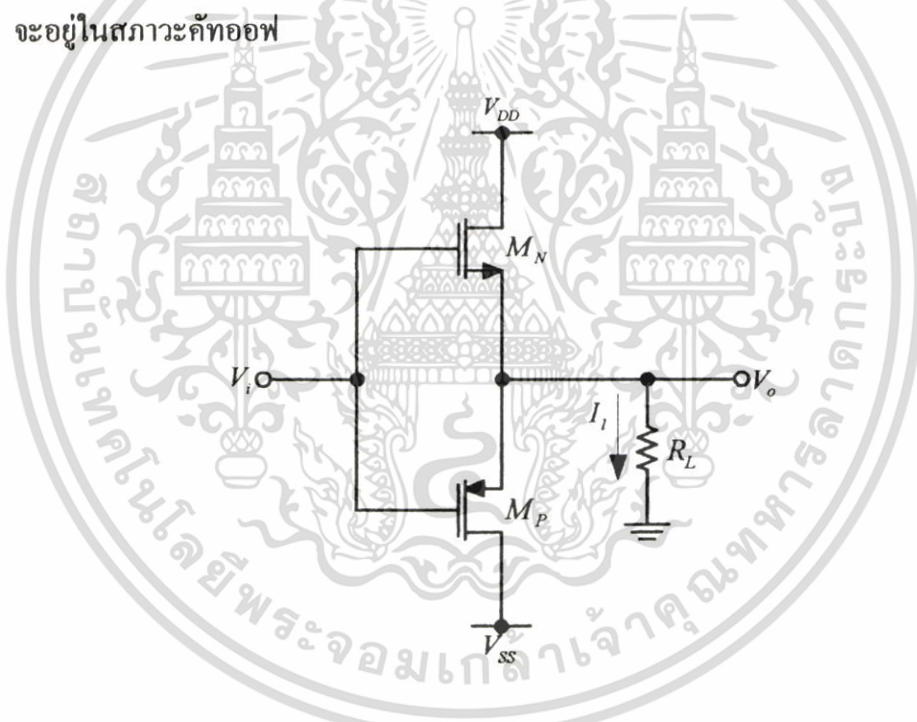
$$\hat{V}_o = V_{DD} = I_B R_L \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.9) และ (3.10) พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอมีค่าเท่ากับ 25% วงจรที่ต้องการกำลังงานสูงจึงไม่นิยมใช้วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ ในทางปฏิบัติช่วงความเป็นเชิงเส้นของแรงดันเอาพุทจะถูกจำกัดอยู่ที่แรงดันอิมิตัวของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอจึงมีค่าอยู่ในช่วง 10%-20% [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 วงจรตามแรงดันแบบคลาสบี

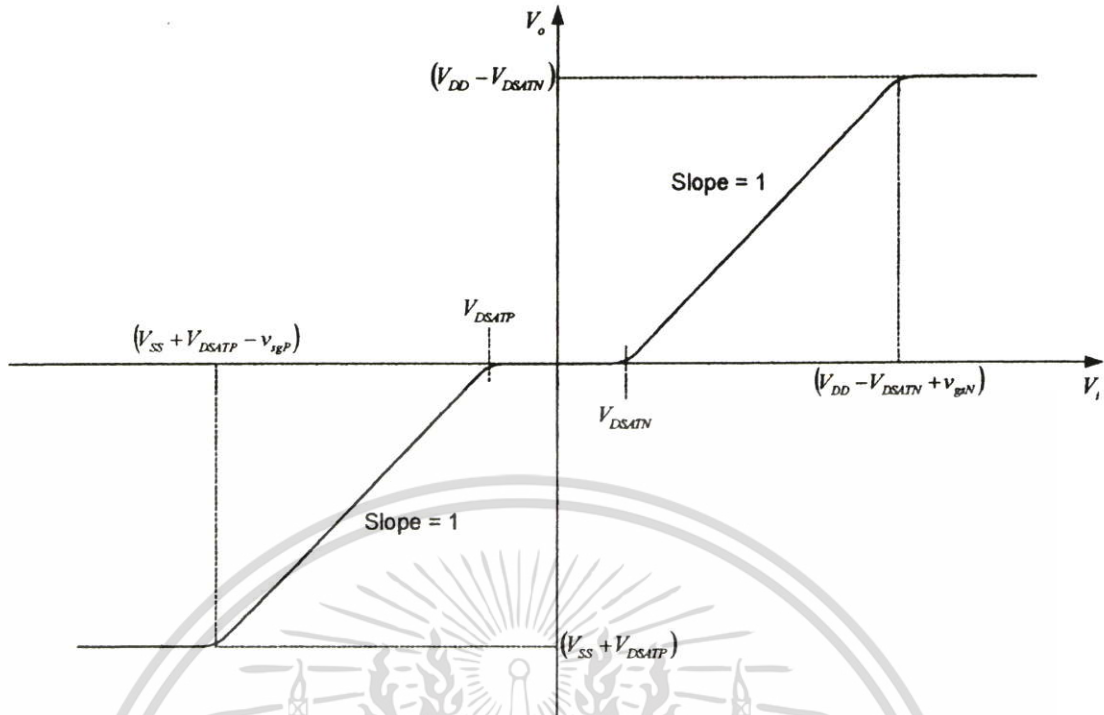
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี จากรูปวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีจะประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพีทำงานร่วมกัน มอสทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะสลับกันทำงาน เมื่อแรงดันอินพุต  $V_i$  มีค่าเท่ากับศูนย์ มอสทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะอยู่ในสภาวะคัทออฟ แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าสูงกว่าแรงดันซิกเริ่ม ( $V_T$ ) ของมอสทรานซิสเตอร์  $M_N$  มอสทรานซิสเตอร์  $M_N$  จะเริ่มทำงาน แรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันอินพุต ( $V_o = V_i - v_{gsN}$ ) มอสทรานซิสเตอร์  $M_N$  จะเป็นตัวจ่ายกระแสให้กับโหลด ขณะที่มอสทรานซิสเตอร์  $M_P$  จะอยู่ในสภาวะคัทออฟทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน ในทางตรงกันข้ามเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าลดลงต่ำกว่าแรงดันซิกเริ่ม ( $V_T$ ) ของมอสทรานซิสเตอร์  $M_P$  มอสทรานซิสเตอร์  $M_P$  จะเริ่มทำงาน แรงดันเอาต์พุตจะลดลงตามแรงดันอินพุตที่ลดลง ( $V_o = V_i + v_{gsP}$ ) มอสทรานซิสเตอร์  $M_P$  จะเป็นตัวจ่ายกระแสไหลกลับ ขณะที่มอสทรานซิสเตอร์  $M_N$  จะอยู่ในสภาวะคัทออฟ



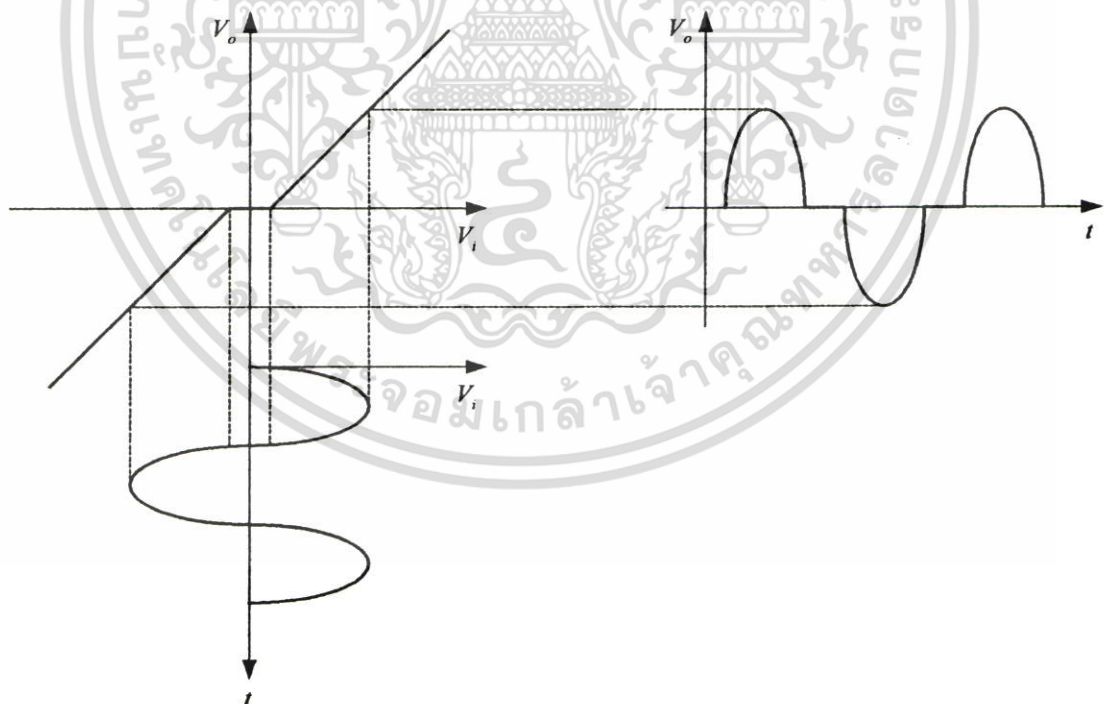
รูปที่ 3.4 วงจรตามแรงดันแบบคลาสบี

จากรูปวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี พบว่ากระแสไบอัสของวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์ และวงจรจะทำงานเฉพาะเมื่อแรงดันอินพุตป้อนเข้ามามีขนาดสูงกว่าแรงดันซิกเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์  $M_N$  และ  $M_P$  เท่านั้น การทำงานจะทำงานในลักษณะการผลัก และดึง (Push-Pull) กระแสเอาต์พุต มอสทรานซิสเตอร์  $M_N$  จะทำหน้าที่ผลัก (จ่าย) กระแสสู่โหลดเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเป็นบวก และมอสทรานซิสเตอร์  $M_P$  จะทำหน้าที่ดึงกระแสจากโหลดเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 คุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี



รูปที่ 3.6 ความผิดเพี้ยนของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 แสดงคุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี จากรูปพบว่าในช่วงที่แรงดันอินพุต  $V_i$  มีขนาดเล็ก ๆ โวลต์เคียงศูนย์ มอสมทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพี จะทำงานในช่วงคัทออฟ แรงดันเอาต์พุตของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีในช่วงนี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เรียกสภาวะที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับศูนย์นี้ว่าสภาวะ Dead Band รูปที่ 3.6 แสดงความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โดยความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะปรากฏอย่างเห็นได้ชัดเมื่อสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามามีขนาดเล็ก ๆ

ในการพิจารณาประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีจะพิจารณาในช่วงสัญญาณเอาต์พุตสูงสุด  $\hat{V}_o$  โดยไม่พิจารณาผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ดังนั้นสามารถหาค่าพลังงานเฉลี่ยที่โหลดได้ดังนี้

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_o^2}{R_L} \quad (3.11)$$

การพิจารณากระแสที่ไหลจากแหล่งจ่ายแรงดันจะพิจารณาเพียงครึ่งคลื่นของแอมป์ริจูดสูงสุด ( $\hat{V}_o/R_L$ ) จะได้กระแสเฉลี่ยที่ไหลจากแหล่งจ่ายแรงดันทั้งสองเท่ากับ  $\hat{V}_o/\pi R_L$  โดยสามารถหาค่าพลังงานเฉลี่ยที่แหล่งจ่ายแรงดันทั้งสองมีค่าเท่ากันได้ดังนี้

$$P_{S+} = P_{S-} = \frac{1}{\pi} \frac{\hat{V}_o}{R_L} V_{DD} \quad (3.12)$$

และผลรวมของกำลังงานที่แหล่งจ่ายแรงดันทั้งสองสามารถหาได้ดังนี้

$$P_S = \frac{2}{\pi} \frac{\hat{V}_o}{R_L} V_{DD} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.11) และ (3.12) สามารถหาประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี ( $\eta$ ) ได้ดังนี้

$$\eta = \frac{\pi}{4} \frac{\hat{V}_o}{V_{DD}} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) พบว่าวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีจะมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ต่อเมื่อ  $\hat{V}_o$  มีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงลบด้วยแรงดันอิ่มตัวของมอสมทรานซิสเตอร์  $M_N$  และ  $M_P$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(V_{DD} - V_{DSAT} \cong V_{DD})$  จากค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุต สามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีได้ดังนี้

$$\eta_{MAX} = \frac{\pi}{4} = 78.5\% \quad (3.15)$$

จากประสิทธิภาพดังกล่าวพบว่าวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีมีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอ เมื่อพิจารณาค่ากำลังงานเฉลี่ยสูงสุดของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี โดยแทน  $\hat{V}_o = V_{DD}$  ในสมการที่ (3.11) จะได้

$$P_{L(MAX)} = \frac{1}{2} \frac{V_{DD}^2}{R_L} \quad (3.16)$$

### 3.2.3 วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบี

หัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี พบว่าวงจรมีปัญหาในเรื่องของความผิดเพี้ยนของสัญญาณในช่วงของการสลับกันทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี รูปที่ 3.7 แสดงวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบีซึ่งสามารถแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนของวงจรตามแรงดันแบบคลาสบีได้ จากรูปแรงดันไบอัส  $V_{BB}$  จะต่อคร่อมระหว่างขาเกตของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพี เพื่อให้เกิดกระแสบ่งไหลผ่านเอาต์พุตมอสทรานซิสเตอร์  $M_N$  และ  $M_P$  เมื่อแรงดันอินพุตบวกถูกป้อนเข้าสู่วงจร แรงดันที่ขาเกตของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้นดังนี้

$$V_o = V_i + \frac{V_{BB}}{2} - v_{gsN} \quad (3.17)$$

เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกจะทำให้เกิดกระแส  $I_I$  ไหลผ่านความต้านทาน  $R_L$  ซึ่งได้แก่การเพิ่มขึ้นของกระแส  $I_n$  ผ่านมอสทรานซิสเตอร์  $M_N$  ดังนี้

$$I_n = I_p + I_I \quad (3.18)$$

เมื่อกระแส  $I_n$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเกต และซอสของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (จากเดิมมีค่าเท่ากับ  $V_{BB}/2$ ) อย่างไรก็ตามแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเกตของทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะยังคงมีค่าคงที่เท่ากับ  $V_{BB}$  เมื่อแรงดัน  $v_{gsN}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

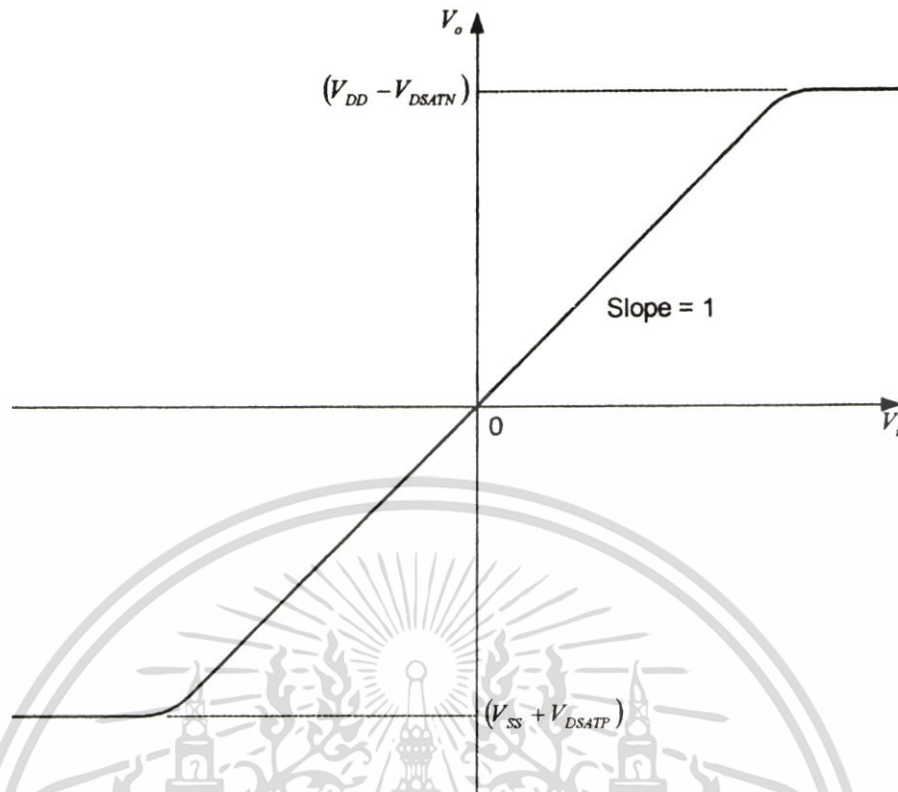
แรงดัน  $v_{gsP}$  และกระแส  $I_p$  ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีลดลง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวพบว่า เมื่อแรงดันเอาต์พุตเป็นบวกมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นจะทำหน้าที่เป็นวงจรตามแรงดัน และเป็นตัวจ่ายกระแสคู่ไหลค ในขณะที่ยมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีจะมีกระแสไหลผ่านลดลง เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีขนาดใหญ่มาก ๆ กระแสที่ไหลผ่านมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีจะมีค่าน้อยมาก

สำหรับกรณีของแรงดันอินพุตมีค่าเป็นลบมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีจะทำหน้าที่เป็นวงจรตามแรงดัน และเป็นตัวจ่ายกระแสคู่ไหลค ในขณะที่ยมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นจะมีกระแสไหลผ่านลดลง เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีขนาดใหญ่มาก ๆ กระแสที่ไหลผ่านมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นจะมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 3.7 วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบี

จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบีมีลักษณะการทำงานเหมือนกับวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี โดยมีข้อดีที่ช่วยแก้ไขข้อบกพร่องในเรื่องของความผิดเพี้ยนของสัญญาณของวงจรตามสัปดาห์แบบคลาสบี เมื่อแรงดันอินพุตมีขนาดเล็กมอสทรานซิสเตอร์จะสามารถทำงานทำได้ และเมื่อแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงเอาต์พุตมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นและชนิดพีจะสลับกันทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยปราศจากความผิดเพี้ยนระหว่างการสลับช่วงการทำงานของเอาต์พุตมอสทรานซิสเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.8 คุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบี



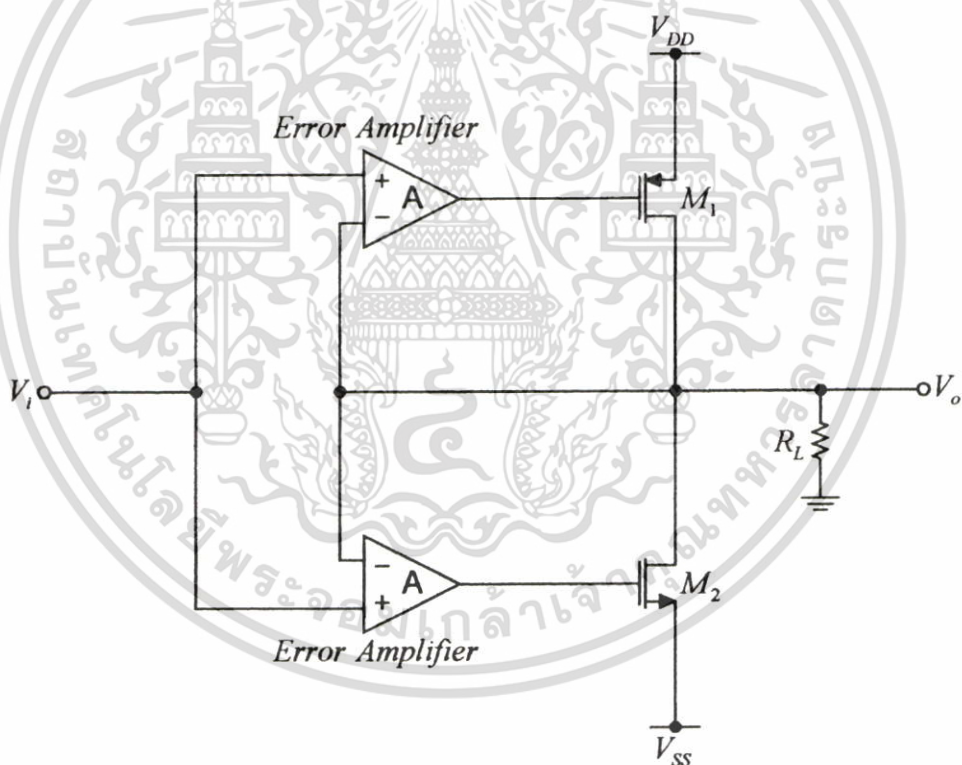
รูปที่ 3.8 คุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบี

สำหรับความล้มพันธ์ในเรื่องของกำลังงานนั้นจะมีลักษณะเหมือนกับวงจรตามแรงดันแบบคลาสบี โดยจะแตกต่างเฉพาะในช่วงสภาวะสงบนิ่ง วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบีจะมีกำลังงานสูญเสียเท่ากับ  $V_{DD}I_Q$  ต่อทรานซิสเตอร์ โดยปกติแล้วกระแส  $I_Q$  จะมีค่าต่ำกว่ากระแสไหลตกมาก ดังนั้นในสภาวะสงบนิ่งจึงมีกำลังสูญเสียที่น้อยมาก

### 3.3 วงจรตามแรงดันที่ได้มีการนำเสนอมาก่อน

วงจรตามแรงดันคือ องค์ประกอบหลักชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญ และประยุกต์ใช้งานอย่างมาก สำหรับการออกแบบวงจรรวมแบบอนาล็อก คุณสมบัติที่ทำให้วงจรตามแรงดันมีความสำคัญอย่างมากต่อระบบต่าง ๆ คือ การใช้วงจรตามแรงดันเป็นวงจรเสริมเพื่อให้วงจรหลักสามารถขับโหลดที่มีความต้านทานต่ำได้ การออกแบบวงจรตามแรงดันที่มีคุณภาพพวงจรจะต้องมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ เพื่อให้สามารถขับ โหลดความต้านทานต่ำได้ ความถี่เพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยที่สุด ช่วงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุตกว้าง โดยจะต้องมีช่วงการสวิงไม่น้อยไปกว่าสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามา นอกจากนั้นแล้ววงจรตามแรงดันที่มีคุณภาพที่ดีจะต้องมีกำลังงานสูญเสียน้อย หลายนบทความได้มีการนำเสนอวงจรตามแรงดันซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญดังกล่าว [5 - 13] วงจรตามแรงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะหนึ่งที่มีการใช้งาน และนำเสนออย่างแพร่หลายได้แก่ วงจรตามแรงดันแบบเสมือน (Pseudo Source Follower) [5 - 10] วงจรดังกล่าวประกอบด้วย คู่ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และ ชนิดพีต่อในลักษณะของวงจรคอมมอนซอร์ส (Common-Source) และวงจรรขยาย (Error Amplifier) [2] ดังแสดงในรูปที่ 3.9 วงจรตามแรงดันแบบเสมือน (Pseudo Source Follower) มีจุดเด่นในเรื่องของการมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ นอกจากนั้นแล้วยังมีการสวิงของแรงดันเอาต์พุตที่กว้าง การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ การทำงานร่วมกันของวงจรรขยาย และวงจรคอมมอนซอร์ส จะทำให้วงจรมีลักษณะเสมือนวงจรตามแรงดันที่มีค่าทรานคอนดักซ์แดนซ์สูง วงจรรขยายจะเป็นตัวส่งผ่านแรงดันที่แตกต่างระหว่างแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุตซึ่งมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยป้อนให้กับขาเกตของเอาต์พุตทรานซิสเตอร์ ในลักษณะของการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) ด้วยหลักการของการป้อนกลับแบบลบทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 3.9 วงจรตามแรงดันแบบเสมือน (Pseudo Source Follower)

รูปที่ 3.10 แสดงแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรตามแรงดันแบบเสมือน (Pseudo Source Follower) การหาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรสามารถพิจารณาได้โดยการป้อนแรงดัน  $v_i$  เพื่อหาค่ากระแส  $i_i$  โดยกระแส  $i_i$  สามารถหาได้ดังนี้

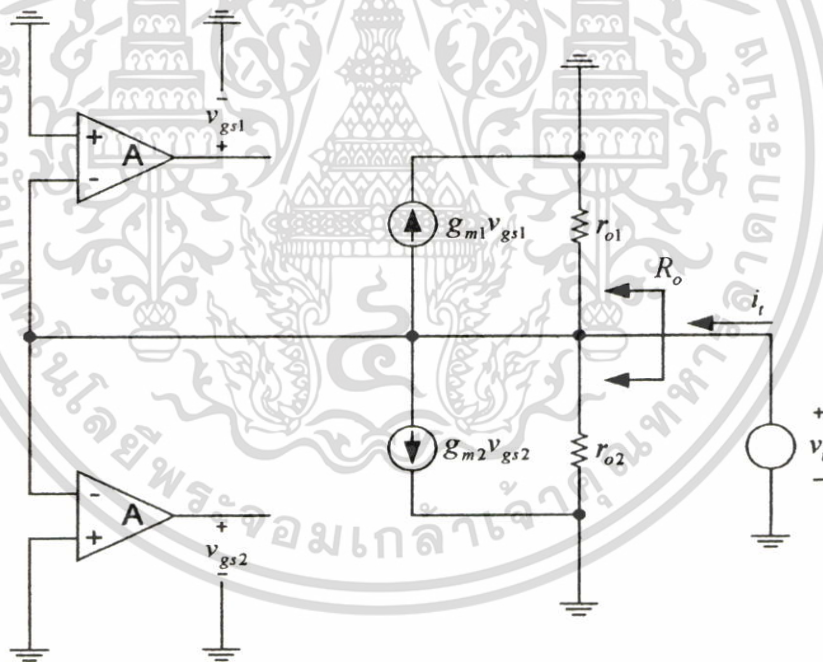
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_t = \frac{v_t}{r_{o1}} + \frac{v_t}{r_{o2}} + g_{m1}Av_t + g_{m2}Av_t \quad (3.19)$$

ทำการจัดรูปสมการเพื่อหา  $v_t/i_t$  จะได้

$$R_o = \left. \frac{v_t}{i_t} \right|_{v_t=0} = \frac{1}{(g_{m1} + g_{m2})A} \parallel r_{o1} \parallel r_{o2} \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.20) พบว่าถ้าอัตราขยาย  $A$  ของวงจรถ่ายย (Error Amplifier) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ( $R_o$ ) ของวงจรมีค่าลดลงน้อยกว่าความต้านทานระหว่างแตรน ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  และ  $M_2$  การลดลงของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ( $R_o$ ) นี้เป็นผลมาจากการป้อนกลับแบบลบ



รูปที่ 3.10 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรถ่ายยตามแรงดันแบบเสมือน

รูปที่ 3.11 แสดงแบบจำลองทางคิซีของวงจรถ่ายยตามแรงดันแบบเสมือน จากรูปจะรวมผลของแรงดันอินพุตออฟเซตที่เกิดจากวงจรถ่ายย (Error Amplifier) ไว้ด้วย กำหนดให้  $k'_p(W/L)_1 = k'_n(W/L)_2 = k'(W/L)$  และ  $-V_{T1} = V_{T2} = V_T$  ดังนั้นจะได้  $-I_{d1} = I_{d2} = I_Q$  เมื่อ  $V_i = 0, V_{OSP} = 0$  และ  $V_{OSN} = 0$  ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวจะได้  $V_o = 0$  และ

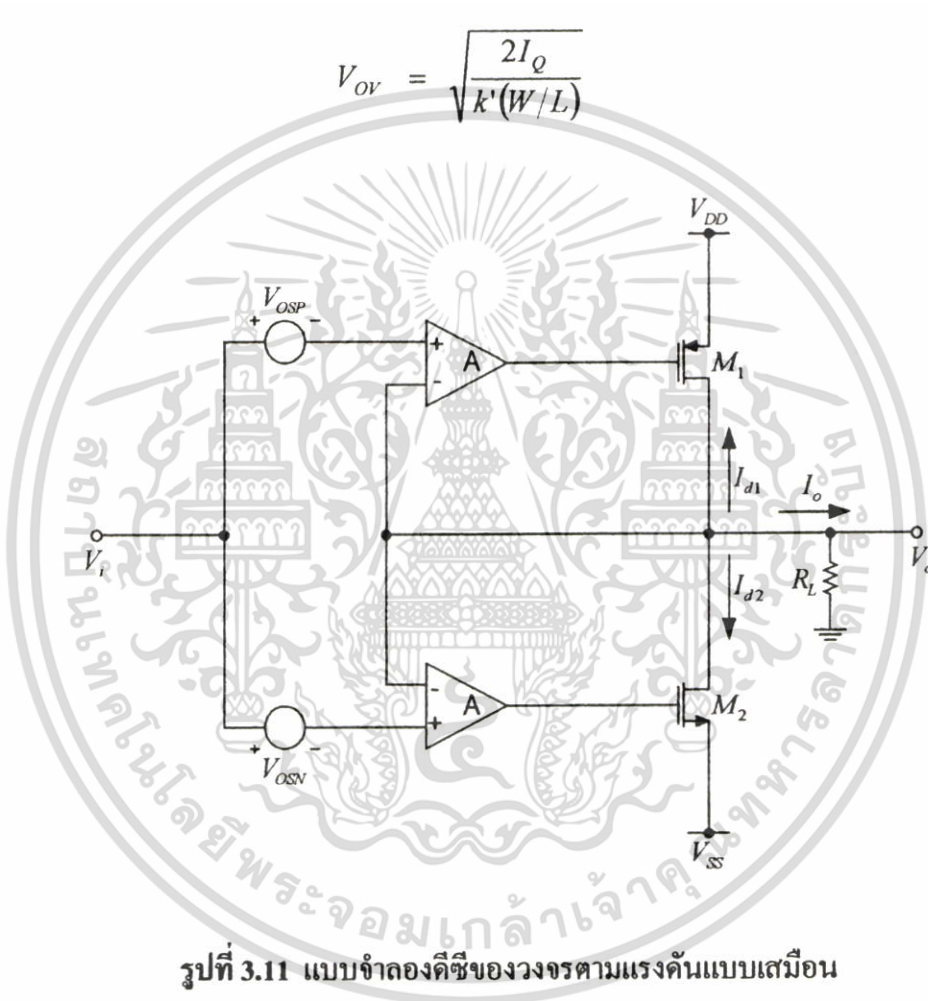
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{gs1} = -V_T - V_{OV} \quad (3.21)$$

$$v_{gs2} = V_T + V_{OV} \quad (3.22)$$

โดย

$$V_{OV} = \sqrt{\frac{2I_Q}{k'(W/L)}} \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.11 แบบจำลองคิซึของวงจรตามแรงดันแบบเสมือน

เมื่ออินพุตมีแรงดันออฟเซตที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ อาจส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ได้ ซึ่งเป็นผลมาจากวงจรขยาย (Error Amplifier) จุดบนมีค่าความแตกต่างของแรงดันเปลี่ยนไปจากศูนย์เป็น  $V_o - (V_i - V_{OSP})$  ในทำนองเดียวกันวงจรขยาย (Error Amplifier) จุดล่างมีค่าความแตกต่างของแรงดันเปลี่ยนไปจากศูนย์เป็น  $V_o - (V_i - V_{OSN})$  และเอาต์พุตของวงจรขยาย (Error Amplifier) จะเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราขยาย  $q$  ดังนั้นจะได้

$$v_{gs1} = -V_T - V_{OV} + A[V_o - (V_i - V_{OSP})] \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{gs2} = V_T + V_{OV} + A[V_o - (V_i - V_{OSN})] \quad (3.25)$$

$$I_{d1} = -\frac{k'_p}{2} \left( \frac{W}{L} \right)_1 (v_{gs1} - V_{T1})^2 = -\frac{k'_p W}{2L} (v_{gs1} - V_T)^2 \quad (3.26)$$

$$I_{d2} = -\frac{k'_n}{2} \left( \frac{W}{L} \right)_2 (v_{gs2} - V_{T2})^2 = -\frac{k'_n W}{2L} (v_{gs2} - V_T)^2 \quad (3.27)$$

จาก

$$I_o = \frac{V_o}{R_L} \quad (3.28)$$

KVL ที่เอาท์พุทจะได้

$$I_o + I_{d1} + I_{d2} = 0 \quad (3.29)$$

แทนสมการที่ (3.24) – (3.28) ลงในสมการที่(3.29) และทำการจัดรูปสมการจะได้

$$V_o = \frac{V_i - \frac{V_{OSP} + V_{OSN}}{2}}{1 + \frac{k'_n W}{L} A [2V_{OV} - A(V_{OSP} - V_{OSN})] R_L} \quad (3.30)$$

จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าวงจรตามแรงดันแบบเสมือน (Pseudo Source Follower) สามารถช่วยแก้ปัญหาในเรื่องการสวิงของสัญญาณเอาท์พุท และช่วยลดเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจร แต่วงจรดังกล่าวมีข้อเสีย 2 ประการ ได้แก่ ประการแรกวงจรขยาย (Error Amplifier) จะต้องมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่กว้างเพื่อป้องกันการผิดเพี้ยนของสัญญาณในช่วงความถี่สูง การที่วงจรมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่กว้างจะทำให้มีปัญหาในเรื่องเสถียรภาพของวงจร เนื่องจากเป็นเรื่องยากในการชดเชยความถี่ ประการที่สองจากผลของการมีแรงดันออฟเซตที่เกิดจากวงจรขยาย (Error Amplifier) จะทำให้กระแสสแตงบนิ่ง  $I_Q$  ที่เอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลง การออกแบบกระแสสแตงบนิ่ง  $I_Q$  จะต้องมากพอเพื่อป้องกันไม่ให้วงจรเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ อย่างไรก็ตามการเพิ่มกระแสสแตงบนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_0$  เพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะทำให้กำลังงานสูญเสียของวงจรเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการสวิงของสัญญาณจะลดลงด้วย ดังนั้นการควบคุมกระแสคงบ่งในสภาวะที่แรงดันออฟเซตมีค่าไม่เท่ากับศูนย์จึงเป็นเรื่องที่ยากมาก

ในส่วนของ Kadanka [11] ได้นำเสนอบทความวงจรตามแรงดันที่มีการสวิงของแรงดันเอาต์พุทกว้างโดยปราศจากการป้อนกลับของสัญญาณ วงจรที่นำเสนอเป็นการทำงานร่วมกันของไบโพล่าทรานซิสเตอร์ และมอสทรานซิสเตอร์ ไบโพล่าทรานซิสเตอร์จะทำงานในลักษณะของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบี (Emitter Follower) วงจรดังกล่าวอาศัยหลักการของวงจรดับเบิลบัฟเฟอร์ (Double Buffer) จากการที่วงจรที่นำเสนอใช้ไบโพล่าทรานซิสเตอร์เป็นองค์ประกอบหลักของวงจรตามแรงดันดังนั้นวงจรจึงมีจุดเด่น 2 ประการเมื่อเทียบกับวงจรตามแรงดันที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์เป็นองค์ประกอบหลักคือ ประการแรก ไบโพล่าทรานซิสเตอร์มีค่าทรานคอนดักซ์แดนซ์สูงกว่ามอสทรานซิสเตอร์ วงจรจึงมีเอ๊าท์พุทอิมพีแดนซ์ที่ต่ำกว่าวงจรที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ จุดเด่นประการที่สองได้แก่ ความไม่เท่ากันของแรงดันเบสอีมิเตอร์ ( $\Delta v_{be}$ ) ระหว่างไบโพล่าทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น และชนิดพีเอ็นพี มีค่าต่ำกว่าความไม่เท่ากันของแรงดันเกจซอส ( $\Delta v_{gs}$ ) ระหว่างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพี ดังนั้นวงจรจึงมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ต่ำ วงจรที่นำเสนอมีช่วงการทำงานและมีเสถียรภาพของวงจรที่สูง นอกจากนั้นแล้ววงจรยังมีกำลังงานสูญเสียที่ต่ำ อย่างไรก็ตามวงจรที่นำเสนอใช้เทคโนโลยี BiCMOS คือการทำงานร่วมกันระหว่างไบโพล่าทรานซิสเตอร์ และมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีระดับสูงในการสร้างวงจรรวม วงจรดังกล่าวจึงใช้ต้นทุนสูงในการสร้าง และนอกจากนั้นแล้วเทคโนโลยี BiCMOS ยังมีกำลังงานสูญเสียสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เทคโนโลยีแบบซีมอสธรรมดา

### 3.4 วงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

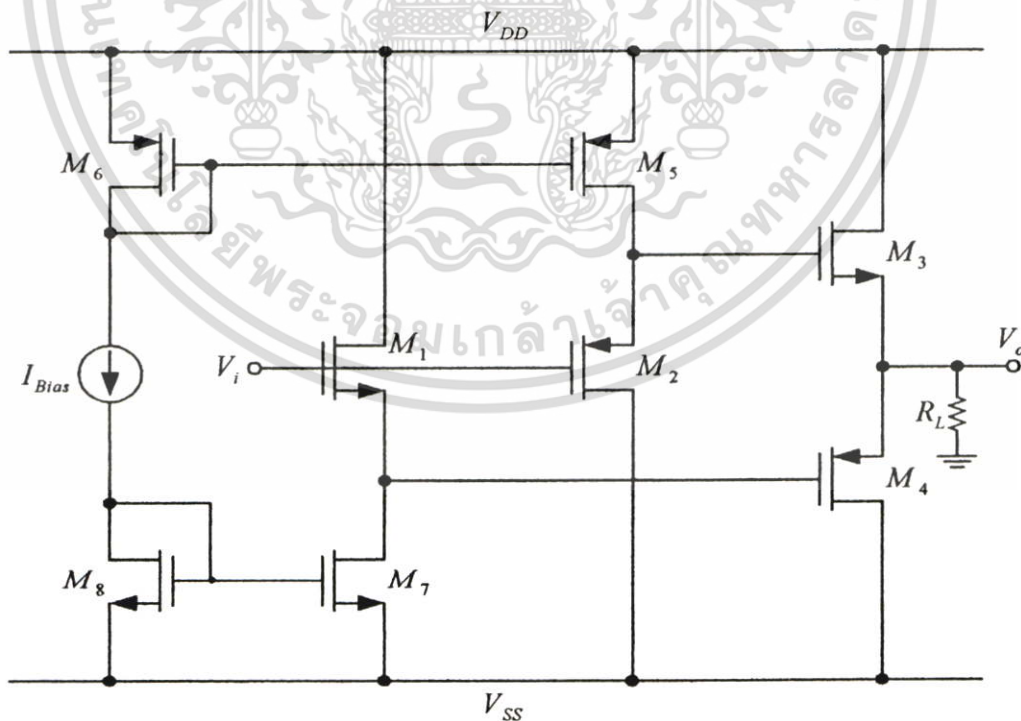
#### 3.4.1 วงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบีพื้นฐาน

รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบีพื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์จำนวน 4 ตัว ( $M_1 - M_4$ ) ต่อในลักษณะของวงจรคลาสเอบีแบบคอมมอนเดรน (Common-Drain) 2 ภาค มอสทรานซิสเตอร์  $M_{5,6}$  และ  $M_{7,8}$  ทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror) เพื่อสร้างแหล่งจ่ายกระแสให้กับวงจรตามแรงดัน สามารถใช้สมการ KVL เพื่อหาคุณสมบัติของวงจรได้ดังนี้

$$v_{gs1} + v_{sg2} = v_{gs3} + v_{sg4} \quad (3.31)$$

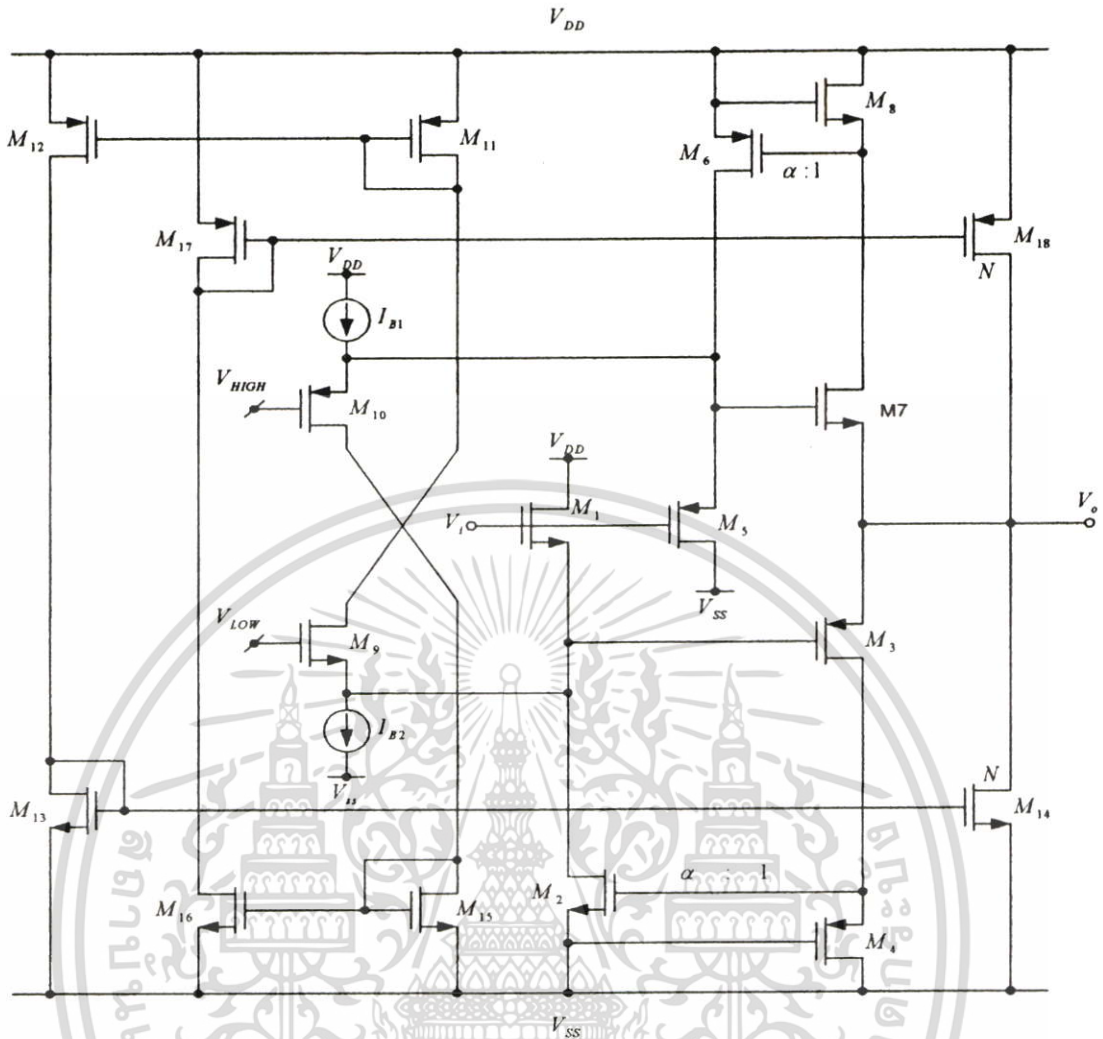
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไม่พิจารณาผลของฐานรอง (Body Effect) และแหล่งจ่ายกระแส  $I_{Bias}$  มีค่าคงที่  $v_{gs1} + v_{gs2}$  จะมีค่าคงที่ เมื่อแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_3$  มีค่าสูงขึ้นจะทำให้แรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_4$  มีค่าลดลงซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของวงจรมตามแรงดันแบบคลาสเอบี เมื่อสัญญาณอินพุทบวกถูกป้อนเข้าสู่วงจร แรงดันซอส เกตของมอสทรานซิสเตอร์  $M_2$  จะมีค่าสูงขึ้น และแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_3$  เพิ่มขึ้นตาม กระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์  $M_3$  จะไหลสู่ไหลค ในขณะเดียวกันเนื่องจากสัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้ามาเป็นบวก แรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  จึงมีค่าลดลง และแรงดันซอส เกตของมอสทรานซิสเตอร์  $M_4$  จะมีค่าลดลงตามด้วยอัตราที่เท่ากับการเพิ่มขึ้นของแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_3$  กระแสที่ไหลผ่านมอสทรานซิสเตอร์  $M_4$  จึงมีค่าเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามเมื่อสัญญาณอินพุทลบถูกป้อนเข้าสู่วงจร แรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  จะมีค่าสูงขึ้น และแรงดันซอส เกตของมอสทรานซิสเตอร์  $M_4$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ทำให้เกิดกระแสจากไหลคไหลสู่มอสทรานซิสเตอร์  $M_4$  ในขณะเดียวกันเนื่องจากสัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้ามาเป็นลบ แรงดันซอส เกตของมอสทรานซิสเตอร์  $M_2$  จึงมีค่าลดลง และแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_3$  มีค่าลดลงตามด้วยอัตราที่เท่ากับการเพิ่มขึ้นของแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_4$  กระแสที่ไหลผ่านมอสทรานซิสเตอร์  $M_3$  จึงมีค่าเพียงเล็กน้อย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้  $M_3$  และ  $M_4$  สลับกันทำงานในลักษณะของวงจรมตามแรงดันแบบคลาสเอบี



รูปที่ 3.12 โครงสร้างแบบพื้นฐานของวงจรมตามแรงดันแบบคลาสเอบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

รูปที่ 3.13 แสดงวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ การทำงานของวงจรที่นำเสนออาศัยหลักการเบื้องต้นของวงจรตามแรงดันแบบคลาสิกเอบีพื้นฐานในรูปที่ 3.12 มอสทรานซิสเตอร์  $M_1, M_3, M_5$  และ  $M_7$  ทำงานในลักษณะของวงจรตามแรงดันแบบคอมมอนเดรน (Common Drain) 2 ภาค โดยไบอัสวงจรด้วยวงจรสะท้อนกระแสที่มีมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพีเป็นองค์ประกอบ ( $M_2, M_4$  และ  $M_6, M_8$ ) ด้วยอัตราส่วนกระแสเท่ากับ  $\alpha$  การทำงานของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอในรูปที่ 3.13 สามารถแก้ปัญหาของวงจรตามแรงดันแบบคลาสิกเอบีพื้นฐานได้ดังนี้

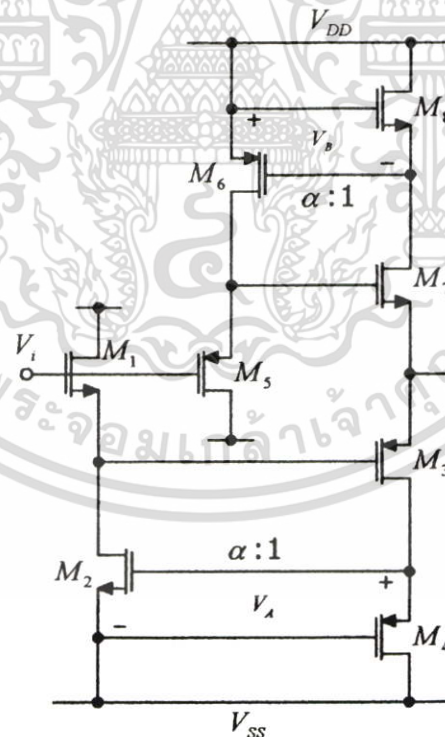
จากรูปที่ 3.14 แสดงการแก้ปัญหาในเรื่องความไม่เท่ากันของแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และพี และการลดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรที่นำเสนอ [12] มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น  $M_1$  และ  $M_2$  มีขนาด และกระแสเดรนที่เท่ากัน และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี  $M_3$  และ  $M_4$  มีขนาด และกระแสเดรนที่เท่ากัน จากการใช้วงจรสะท้อนกระแส  $M_2, M_4$  จะทำให้แรงดันเกตซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_2$  และ  $M_4$  มีค่าเท่ากับ  $|V_{G1}|$  ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  และ  $M_3$  มีขนาดที่เท่ากันด้วย สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตในขณะที่แรงดันอินพุตเป็นลบได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{o-} &= V_{i-} - v_{gs1} + v_{gs3} \\ &= V_{i-} \end{aligned} \quad (3.34)$$

ในทำนองเดียวกันมอสทรานซิสเตอร์ชนิดที่  $M_5$  และ  $M_6$  มีขนาด และกระแสเดรนที่เท่ากัน มอสทรานซิสเตอร์ชนิดอื่น  $M_7$  และ  $M_8$  มีขนาด และกระแสเดรนที่เท่ากัน จากการใช้วงจรสะท้อนกระแส  $M_6, M_8$  จะทำให้แรงดันเกตซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_6$  และ  $M_8$  มีค่าเท่ากับ  $|V_B|$  ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_5$  และ  $M_7$  มีขนาดที่เท่ากันด้วย สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตในขณะที่แรงดันอินพุตเป็นบวกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{o+} &= V_{i+} + v_{sg5} - v_{sg7} \\ &= V_{i+} \end{aligned} \quad (3.35)$$



**รูปที่ 3.14** การแก้ปัญหาในเรื่องความไม่เท่ากันของแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และพี และการลดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลดังกล่าวทำให้วงจรตามแรงดันที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหาในเรื่องความไม่เท่ากันระหว่างแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพีได้ วงจรตามแรงดันที่นำเสนอจึงมีค่าแรงดันออฟเซตที่ต่ำ ช่วยลดความผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุตได้ การแก้ปัญหาดังกล่าวจะได้ผลดีสำหรับเทคโนโลยีซีมอสที่มีบ่อฐานรองชนิดพี และชนิดเอ็น (Twin Well) สำหรับเทคโนโลยีซีมอสแบบบ่อฐานรองชนิดเอ็น (N-Well) หรือบ่อฐานรองชนิดพี (P-Well) นั้นจะต้องพิจารณาในเรื่องผลของฐานรองด้วย เนื่องจากขาซอส และขาฐานรอง (Bulk) ไม่ได้ต่อเชื่อมถึงกัน ดังนั้นจึงอาจเกิดแรงดันออฟเซตจากกรณีนี้ได้

นอกจากนั้นแล้ววงจรตามแรงดันที่นำเสนอยังมีกลไกเพื่อช่วยลดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์โดยการเพิ่มค่าทรานคอนดักซ์แดนซ์ของวงจร กลไกดังกล่าวประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์  $M_1 - M_4$  สำหรับวงจรตามแรงดันชุดล่าง และมอสทรานซิสเตอร์  $M_5 - M_8$  สำหรับวงจรตามแรงดันชุดบน เมื่อพิจารณาวงจรตามแรงดันชุดล่างจะพบว่า

$$g_{m(LOWER)} = \frac{i_o}{v_o} = \frac{g_{m3} \cdot v_{gs3}}{v_{gs3} - v_{gs1}} \quad (3.36)$$

โดยแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  มีค่าเท่ากับ  $v_{gs1} = i_1/g_{m1}$  และกระแส  $i_1 = \alpha i_o$  ดังนั้นจะได้

$$g_{m(LOWER)} = \frac{g_{m3} \cdot v_{gs3}}{v_{gs3} - \frac{\alpha(g_{m3} \cdot v_{gs3})}{g_{m1}}} = \frac{g_{m1} \cdot g_{m3}}{g_{m1} - \alpha \cdot g_{m3}} \quad (3.37)$$

จากสมการที่ (3.37) พบว่าวงจรตามแรงดันชุดล่างจะมีค่าทรานคอนดักซ์แดนซ์สูงสุดเมื่อ  $\alpha = g_{m1}/g_{m3}$  ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาวงจรตามแรงดันชุดบนจะพบว่าวงจรมีค่าทรานคอนดักซ์แดนซ์ดังนี้

$$g_{m(UPPER)} = \frac{g_{m5} \cdot g_{m7}}{g_{m5} - \alpha \cdot g_{m7}} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.38) พบว่าวงจรมตามแรงดันขุดบนจะมีค่าทรานคอนดักซ์แดนซ์สูงสุดเมื่อ  $\alpha = g_{m5}/g_{m7}$  ดังนั้นสำหรับในช่วงที่สัญญาณอินพุตมีการสวิงอยู่ในช่วงของแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  และ  $V_{LOW}$  วงจรมตามแรงดันที่นำเสนอจะมีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ลดลงเมื่อเทียบกับวงจรมตามแรงดันแบบคลาสิกเอบีพื้นฐานดังนี้

$$R_o = \left( \frac{1}{g_{m3}} - \frac{\alpha}{g_{m1}} \right) \parallel \left( \frac{1}{g_{m7}} - \frac{\alpha}{g_{m5}} \right) \quad (3.39)$$

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.13 สำหรับกรณีทีสัญญาณอินพุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง  $V_{LOW}$  กระแสทั้งหมดจากแหล่งจ่ายกระแส  $I_{B2}$  ที่จ่ายให้กับมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  และ  $M_9$  ซึ่งต่อในลักษณะของวงจรมขยายความแตกต่าง จะไหลไปทางมอสทรานซิสเตอร์  $M_9$  กระแสจะถูกสะท้อนด้วยวงจรมสะท้อนกระแส 2 ชุด ได้แก่  $M_{11} - M_{12}$  และ  $M_{13} - M_{14}$  ขณะนี้มอสทรานซิสเตอร์  $M_{14}$  จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสให้กับวงจรมตามแรงดันขุดบน ( $M_5 - M_8$ ) ทำให้วงจรมตามแรงดันที่นำเสนอมีขีดจำกัดในการสวิงช่วงลบเท่ากับ

$$V_{\alpha(MIN)} = V_{SS} + V_{DSAT14} \quad (3.40)$$

และสามารถหาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ขณะทีอินพุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง  $V_{LOW}$  ได้ดังนี้

$$R_{\alpha(LOW)} = \left( \frac{1}{g_{m7}} - \frac{\alpha}{g_{m5}} \right) \parallel r_{o14} \quad (3.41)$$

$$\approx \frac{1}{g_{m7}} - \frac{\alpha}{g_{m5}}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกรณีทีสัญญาณอินพุตมีค่าสูงกว่าแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  กระแสทั้งหมดจากแหล่งจ่ายกระแส  $I_{B1}$  ที่จ่ายให้กับมอสทรานซิสเตอร์  $M_5$  และ  $M_{10}$  ซึ่งต่อในลักษณะของวงจรมขยายความแตกต่าง จะไหลไปทางมอสทรานซิสเตอร์  $M_{10}$  กระแสจะถูกสะท้อนด้วยวงจรมสะท้อนกระแส 2 ชุด ได้แก่  $M_{15} - M_{16}$  และ  $M_{17} - M_{18}$  ขณะนี้มอสทรานซิสเตอร์  $M_{18}$  จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสให้กับวงจรมตามแรงดันขุดล่าง ( $M_1 - M_4$ ) ทำให้วงจรมตามแรงดันที่นำเสนอมีขีดจำกัดในการสวิงช่วงบวกเท่ากับ

$$\text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ } V_{\alpha(MAX)} \text{ กรณีที่ } V_{DD} \text{ เท่า } V_{DSAT18} \text{ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาได้โดยไม่ต้องแจ้งความ } V_{\alpha(MAX)} = V_{DD} - V_{DSAT18} \text{ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาได้โดยไม่ต้องแจ้งความ } \quad (3.42)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถหาเอาท์พุทเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ขณะที่อินพุทมีค่าสูงกว่าแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  ได้ดังนี้

$$R_{o(HIGH)} = \left( \frac{1}{g_{m3}} - \frac{\alpha}{g_{m1}} \right) \parallel r_{o18} \approx \frac{1}{g_{m3}} - \frac{\alpha}{g_{m1}} \quad (3.43)$$

สำหรับการพิจารณากำลังงานสูญเสียของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ นั้นจะพิจารณาจากวงจรในสถานะสงบนิ่ง จากรูปที่ 3.13 พบว่าในสถานะสงบนิ่งมอสทรานซิสเตอร์  $M_9 - M_{18}$  จะไม่มีกระแสไหลผ่านเนื่องจากแรงดันอินพุทมีค่าอยู่ในช่วงของแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  และ  $V_{LOW}$  ซึ่งมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในสถานะสงบนิ่งได้แก่ มอสทรานซิสเตอร์  $M_1 - M_8$  โดยสามารถหากำลังงานสูญเสียของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ ได้ดังนี้

$$P_D = 2V_{DD} (I_B + I_Q (1 + \alpha)) \quad (3.44)$$

การกำหนดค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  และ  $V_{LOW}$  จะพิจารณาจากขีดจำกัดในการสวิงของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรตามแรงดันในรูปที่ 3.14 โดยในการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  จะต้องมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการสวิงซิกบวกล็กน้อยเพื่อแก้ปัญหาการผิดเพี้ยนของสัญญาณ โดยค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  ควรมีค่าดังนี้

$$V_{HIGH} \leq V_{DD} - V_{DSAT6} - V_{GS7} \quad (3.45)$$

ในส่วนของการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{LOW}$  จะต้องมีค่าสูงกว่าขีดจำกัดการสวิงซิกบวกล็กน้อยเพื่อแก้ปัญหาการผิดเพี้ยนของสัญญาณ โดยค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{LOW}$  ควรมีค่าดังนี้

$$V_{LOW} \geq V_{SS} + V_{DSAT2} + V_{GS3} \quad (3.46)$$

จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าวงจรตามแรงดันที่นำเสนอในรูปที่ 3.13 สามารถแก้ปัญหาทั้งสามประการของวงจรตามแรงดันแบบคลาสสิกพื้นฐานในรูปที่ 3.12 ได้ ดังนั้นเมื่อนำวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ ไปใช้ร่วมกับวงจรขยายโดยทั่วไปจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขยายลดน้อยลง แต่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายในเรื่องของการขับโหลดที่มีขนาดต่ำได้ ทำให้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ผลการจำลองการทำงาน

การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ จะใช้โปรแกรม H-Spice ในการทดสอบประสิทธิภาพ การออกแบบจะใช้เทคโนโลยีแบบซิมอส 0.5 ไมโครเมตรภายใต้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง  $V_{DD}$  และ  $V_{SS}$  เท่ากับ  $\pm 1.5$  โวลต์ สัญญาณเอาต์พุตสามารถสวิงได้ในช่วง  $\pm 1.25$  โวลต์ สำหรับความต้านทานโหลด 250 โอห์ม ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมดที่ได้จากการออกแบบ การจำลองผลการทำงานจะแยกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การจำลองการทำงานที่ได้จากการออกแบบ และการจำลองการทำงานของวงจรจากการเลย์เอาต์ (Layout)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ

พารามิเตอร์	NMOS	PMOS
$\mu_0$	588.4312781 $cm^2/V-s$	148.6428164 $cm^2/V-s$
$V_{th0}$	0.6097457 V	-0.6103469 V
$t_{ox}$	1 X 10 <sup>-8</sup> m	1 X 10 <sup>-8</sup> m

ตารางที่ 3.2 ขนาดมอสทรานซิสเตอร์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

มอสทรานซิสเตอร์	อัตราส่วน (W/L)
$M_1, M_2, M_9$	35/1
$M_3, M_4$	530/0.5
$M_5, M_6, M_{10}$	120/1
$M_7, M_8$	320/0.5
$M_{11}$	4.3/1
$M_{12}, M_{17}$	43/1
$M_{13}, M_{16}$	11/1
$M_{14}$	390/0.5
$M_{15}$	1.1/1
$M_{18}$	1120/0.5

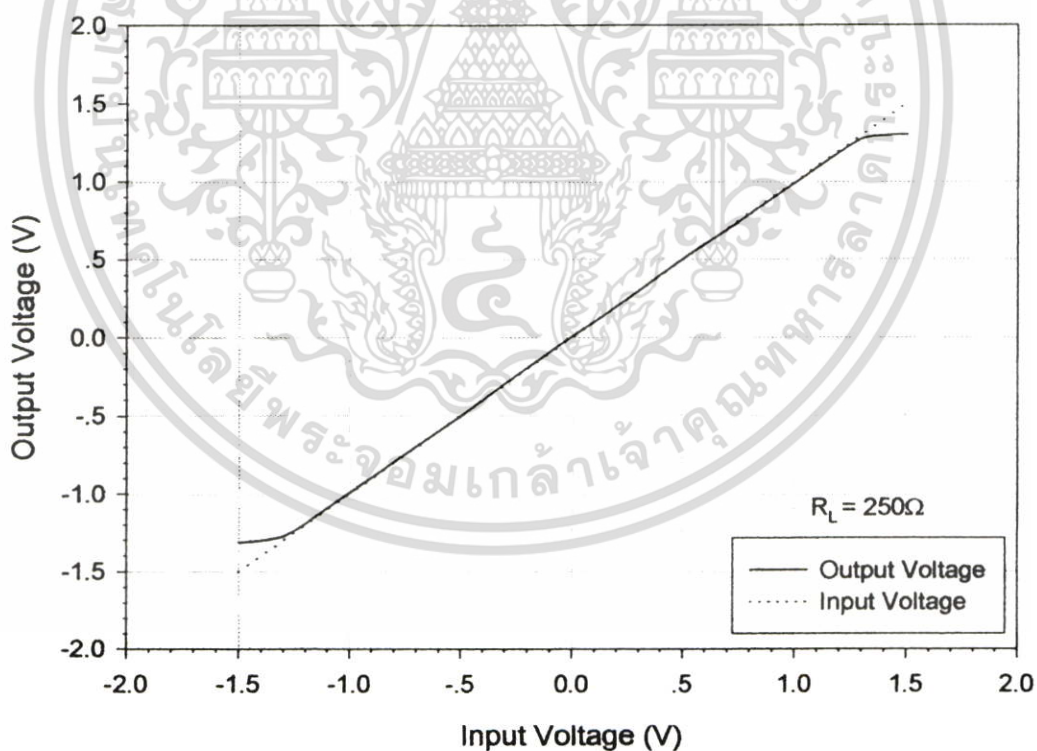
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

ตารางที่ 3.3 แสดงประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ โดยที่ความต้านทาน โหลด 250 โอห์ม วงจรตามแรงดันที่นำเสนอมีช่วงการสวิงที่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ  $\pm 1.25$  โวลต์ และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่น้อยกว่า 10 เมกกะเฮิรตซ์มีค่าน้อยกว่า  $15 \Omega$  dB โดยความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ ที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 3.15 แสดงคุณสมบัติทางคิซี (DC Characteristic) ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ จากรูปพบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีช่วงความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ  $\pm 1.25$  โวลต์ รูปที่ 3.16 แสดงการสวิงสัญญาณเอาต์พุตที่สัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.5$  โวลต์ (1 เมกกะเฮิรตซ์) โดยสัญญาณเอาต์พุตมีช่วงการสวิง  $\pm 1.25$  โวลต์ รูปที่ 3.17-3.20 แสดงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ (1 เมกกะเฮิรตซ์) ที่ความต้านทาน โหลด 50 โอห์ม 150 โอห์ม 250 โอห์ม และ 500 โอห์มตามลำดับ จากรูปพบว่าที่ขนาดความต้านทาน โหลด 50 โอห์ม และ 150 โอห์ม สัญญาณเอาต์พุตจะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากกระแสที่เอาต์พุตไม่เพียงพอในการขับเคลื่อนความต้านทาน โหลด ดังนั้นในการพัฒนางจรตามแรงดันที่นำเสนอให้สามารถขับเคลื่อนความต้านทาน โหลดขนาดต่ำกว่า 250 โอห์ม โดยไม่มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะต้องออกแบบมอสทรานซิสเตอร์  $M_{14}$  และมอสทรานซิสเตอร์  $M_{18}$  ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มขนาดกระแสเอาต์พุตให้เพียงพอแก่การขับเคลื่อนความต้านทาน โหลดที่ต้องการ รูปที่ 3.21 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ จากรูปพบว่าความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับ 327 เมกกะเฮิรตซ์ รูปที่ 3.22 แสดงเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ พบว่าที่ความถี่น้อยกว่า 10 เมกกะเฮิรตซ์วงจรตามแรงดันที่นำเสนอมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์น้อยกว่า  $15 \Omega$  dB โดยภายใต้สภาวะสงบนิ่งวงจรที่นำเสนอมีกำลังงานสูญเสียเท่ากับ 8.32 มิลลิวัตต์ ตารางที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ และวงจรตามแรงดันที่มีการนำเสนอมาก่อน จากตารางดังกล่าวพบว่าวงจรตามแรงดันที่นำเสนอสามารถทำงานภายใต้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่ต่ำ โดยมีช่วงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุตที่กว้าง และมีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรตามแรงดันที่มีการนำเสนอมาก่อน

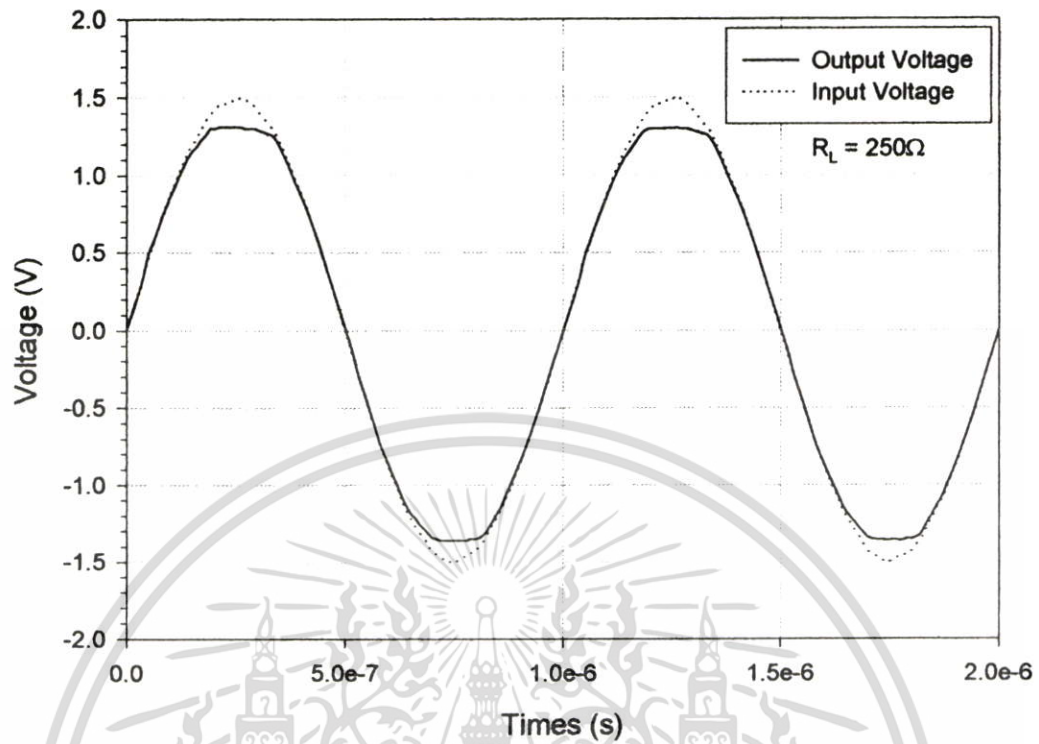
ตารางที่ 3.3 ประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง
แหล่งจ่ายแรงดัน	$\pm 1.5$ โวลต์
แหล่งจ่ายกระแส ( $I_p$ )	10 ไมโครแอมป์
แรงดันอ้างอิง ( $V_{HIGH}$ , $V_{LOW}$ )	$\pm 0.5$ โวลต์
ความต้านทานโหลด	250 โอห์ม
เอาต์พุตสวิง	$\pm 1.25$ โวลต์
ความถี่คัทออฟ	327 เมกกะเฮิรตซ์
เอาต์พุตอิมพีแดนซ์	12.2 $\Omega$ dB
กำลังงานสูญเสีย	8.32 มิลลิวัตต์
ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (% THD)	0.87 % @ 2.5 V <sub>pp</sub> , 1 MHz

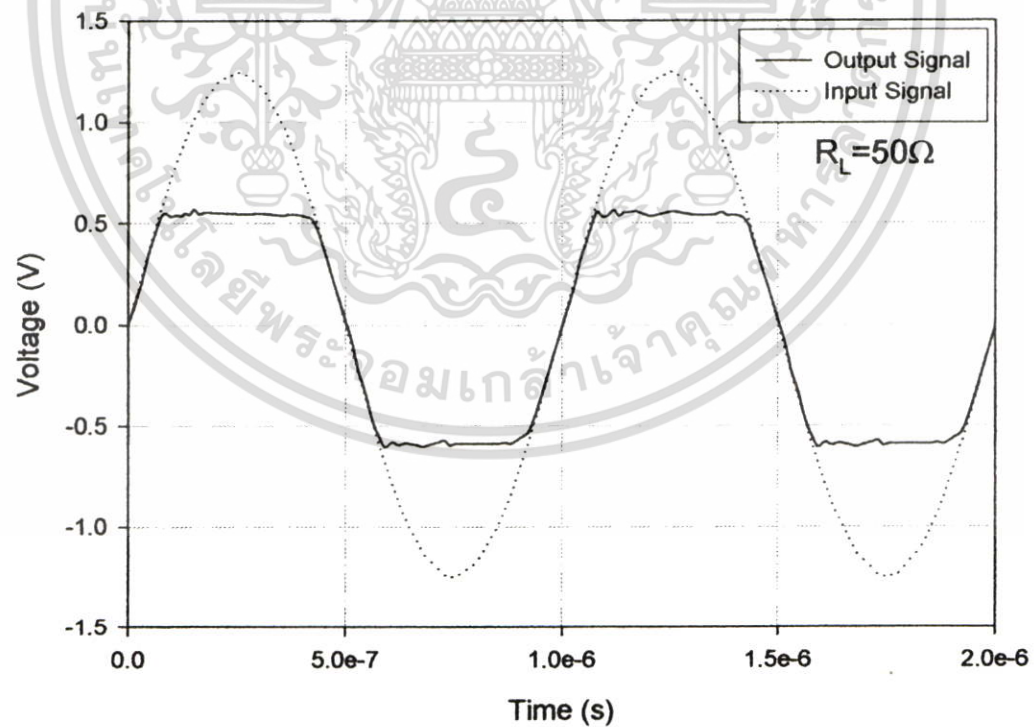


รูปที่ 3.15 คุณสมบัติทางคิซีของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

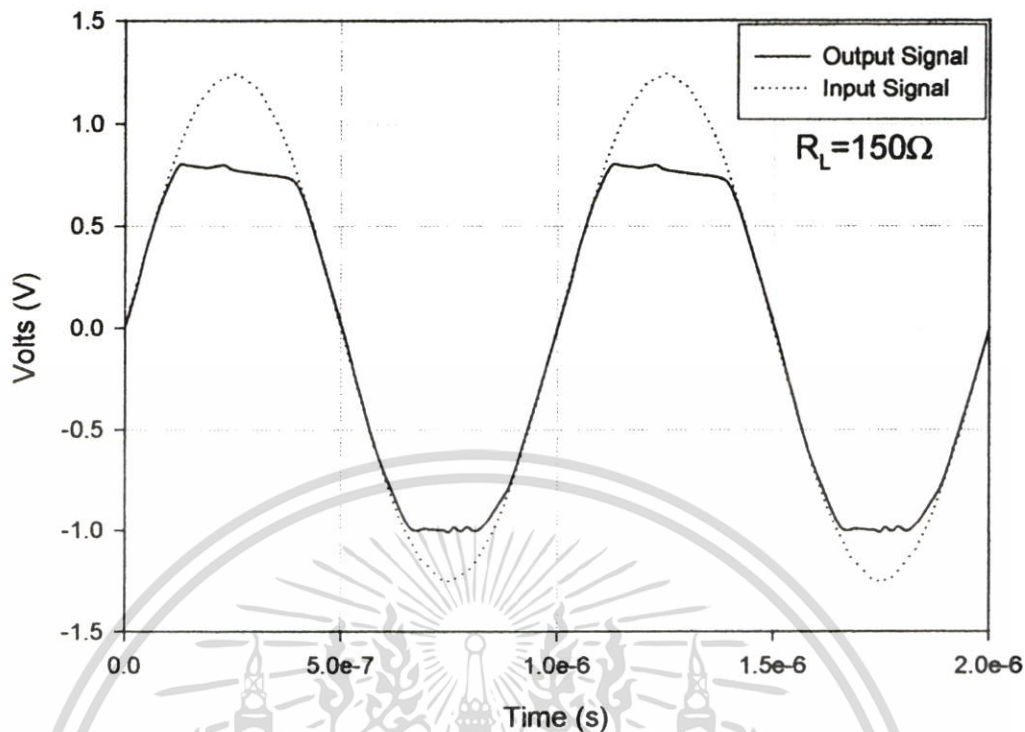


รูปที่ 3.16 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์

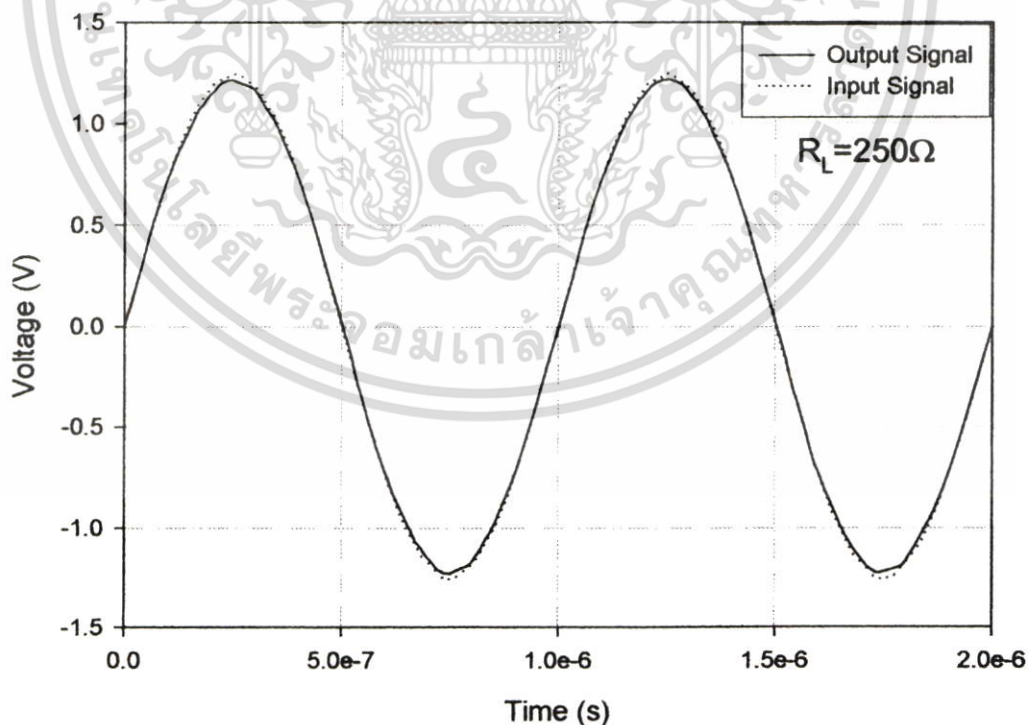


รูปที่ 3.17 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 50 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

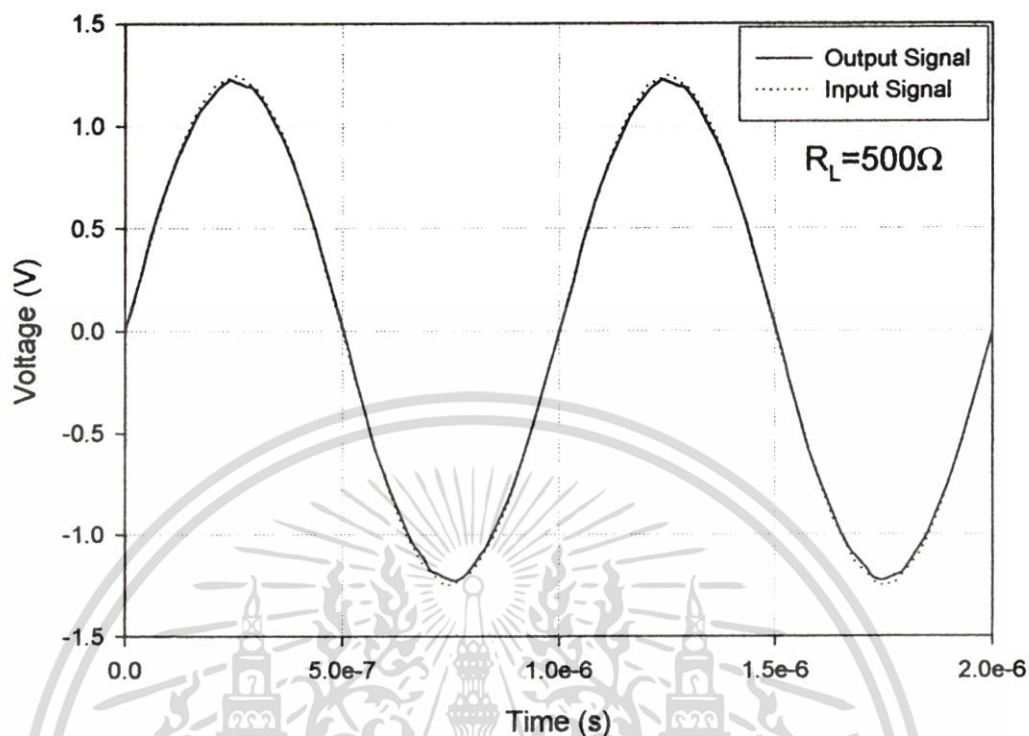


รูปที่ 3.18 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ความถี่ 1 เมกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 150 โอห์ม

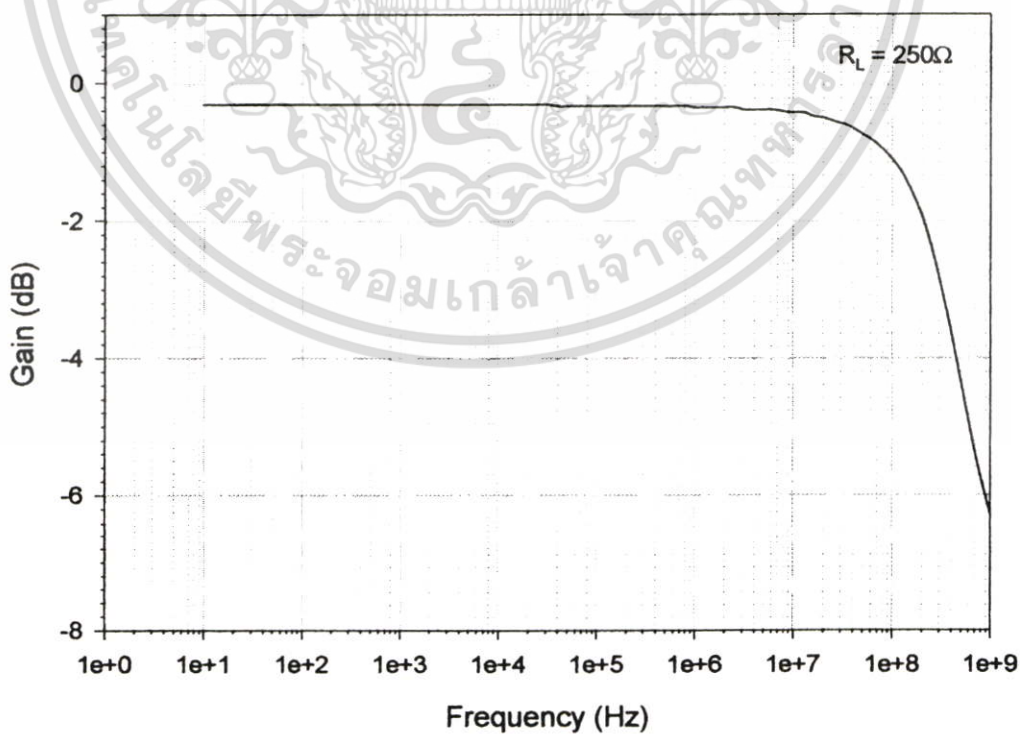


รูปที่ 3.19 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ความถี่ 1 เมกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 250 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

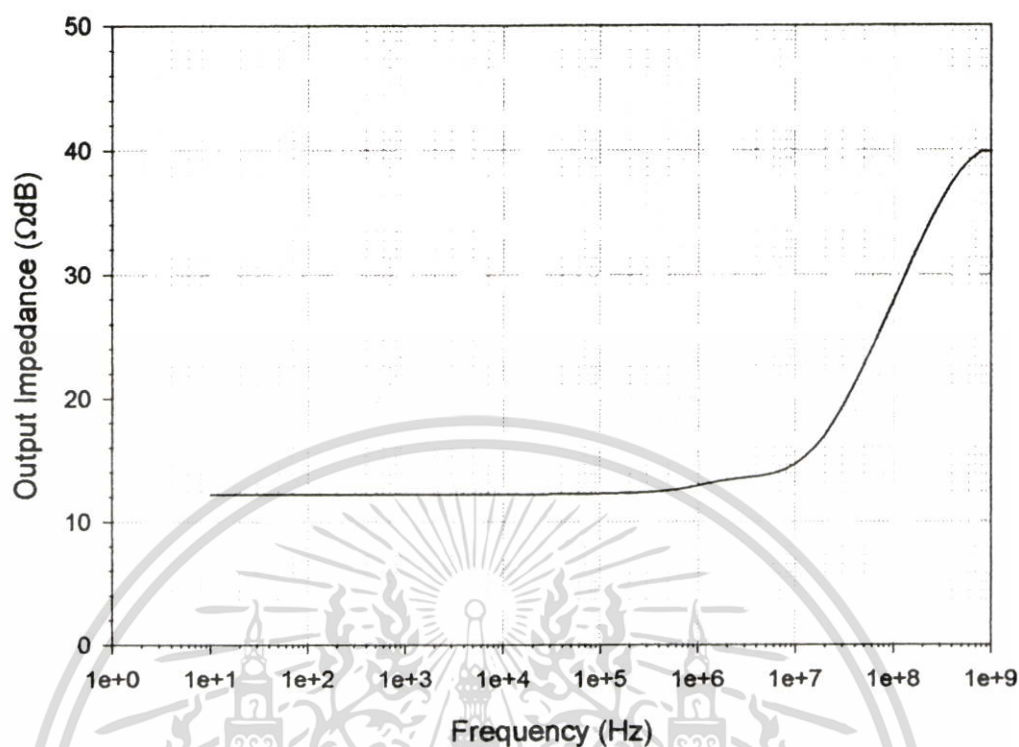


รูปที่ 3.20 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ความถี่ 1 เมกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 500 โอห์ม



รูปที่ 3.21 ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 เอ๊าท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ

ตารางที่ 3.4 ประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ และวงจรตามแรงดันที่นำเสนอมาก่อน

พารามิเตอร์	วงจรที่นำเสนอ	Sekerkiran, B. [10]	Manetakis, P. [12]	Joongsik, K. [13]
เทคโนโลยี	ซิมอส	ซิมอส	ซิมอส	ซิมอส
แหล่งจ่ายแรงดัน	$\pm 1.5$ โวลต์	$\pm 5$ โวลต์	-	5 โวลต์
ความต้านทานโหลด	250 โอห์ม	450 โอห์ม	50 โอห์ม	300 โอห์ม
เอ๊าท์พุทสวิง	$\pm 1.25$ โวลต์	$\pm 4.6$ โวลต์	-	4.25 โวลต์
ความถี่คัทออฟ	327 เมกกะเฮิรท์	-	700 เมกกะเฮิรท์	-
เอ๊าท์พุทอิมพีแดนซ์	4 โอห์ม	-	20 โอห์ม	-
กำลังงานสูญเสีย	8.32 มิลลิวัตต์	4.7 มิลลิวัตต์	440 มิลลิวัตต์	4.7 มิลลิวัตต์
ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (% THD)	0.87 % @ 2.5 V <sub>pp</sub> , 1 MHz	0.22 % @ 9 V <sub>pp</sub> , 10 KHz	3 % @ 1.0V, 100KHz	0.06 % @ 3.5 V <sub>pp</sub> , 5 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

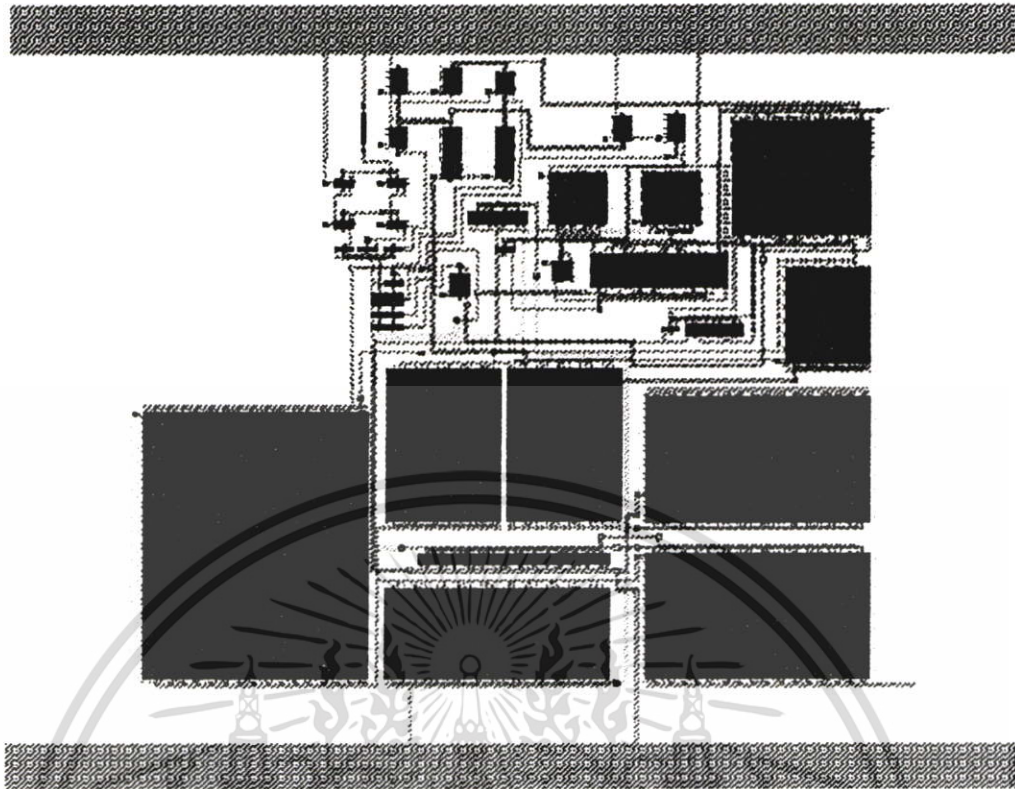
### 3.5.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) จะเป็นการทดสอบโดยรวมผลของตัวเก็บประจุแฝง รูปที่ 3.23 แสดงการเลย์เอาต์ (Layout) วงจรตามแรงดันที่นำเสนอด้วยโปรแกรม L-EDIT ตารางที่ 3.5 แสดงประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) โดยที่ความต้านทานโหลด 250 โอห์ม วงจรตามแรงดันที่นำเสนอมีช่วงการสวิงที่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ  $\pm 1.25$  โวลต์ และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่น้อยกว่า 10 เมกกะเฮิรตซ์มีค่าน้อยกว่า  $15 \Omega$  โดยความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ ที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 3.24 แสดงคุณสมบัติทางคิซี (DC Characteristic) ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ จากรูปพบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีช่วงความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ  $\pm 1.25$  โวลต์ รูปที่ 3.25 แสดงการสวิงสัญญาณเอาต์พุตที่สัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.5$  โวลต์ (1 เมกกะเฮิรตซ์) โดยสัญญาณเอาต์พุตมีช่วงการสวิง  $\pm 1.25$  โวลต์ รูปที่ 3.26-3.29 แสดงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ (1 เมกกะเฮิรตซ์) ที่ความต้านทานโหลด 50 โอห์ม 150 โอห์ม 250 โอห์ม และ 500 โอห์มตามลำดับ รูปที่ 3.30 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ จากรูปพบว่าความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับ 273 เมกกะเฮิรตซ์ รูปที่ 3.31 แสดงเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอ พบว่าที่ความถี่น้อยกว่า 10 เมกกะเฮิรตซ์วงจรตามแรงดันที่นำเสนอมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์น้อยกว่า  $15 \Omega$  โดยภายใต้สภาวะสงบนิ่งวงจรที่นำเสนอมีกำลังงานสูญเสียเท่ากับ 7.23 มิลลิวัตต์

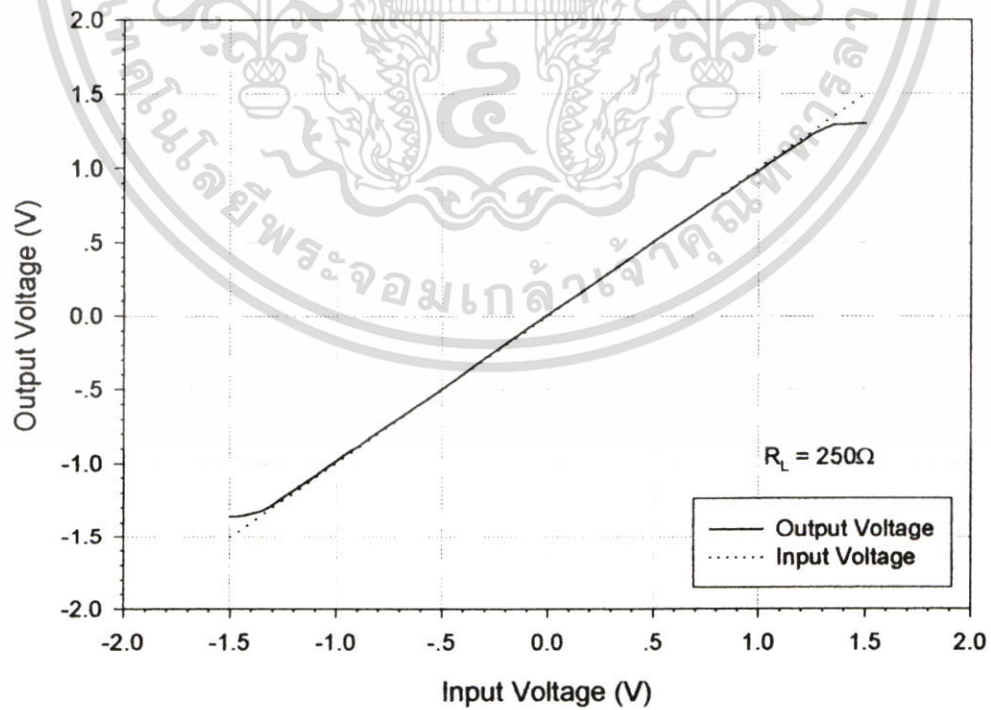
ตารางที่ 3.5 ประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง
แหล่งจ่ายแรงดัน	$\pm 1.5$ โวลต์
แหล่งจ่ายกระแส ( $I_B$ )	10 ไมโครแอมป์
แรงดันอ้างอิง ( $V_{HIGH}$ , $V_{LOW}$ )	$\pm 0.5$ โวลต์
ความต้านทาน โหลด	250 โอห์ม
เอาต์พุตสวิง	$\pm 1.25$ โวลต์
ความถี่คัทออฟ	273 เมกกะเฮิรตซ์
เอาต์พุตอิมพีแดนซ์	$12.9 \Omega$
กำลังงานสูญเสีย	7.23 มิลลิวัตต์
ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (% THD)	0.96 % @ $2.5 V_{pp}$ , 1 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

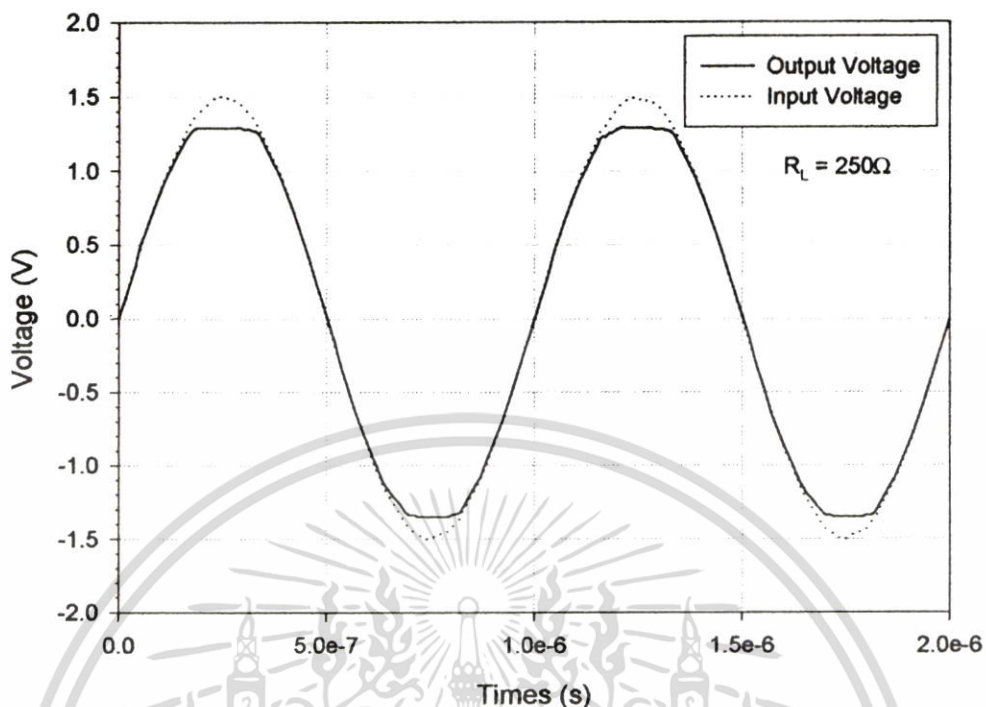


รูปที่ 3.23 วงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

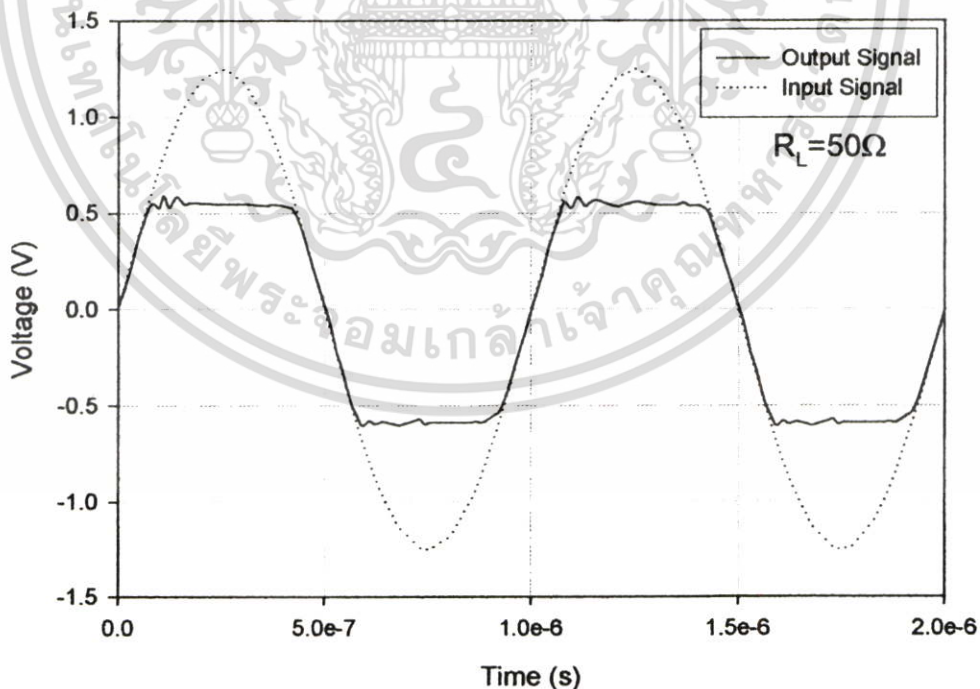


รูปที่ 3.24 คุณสมบัติทางคิซีของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

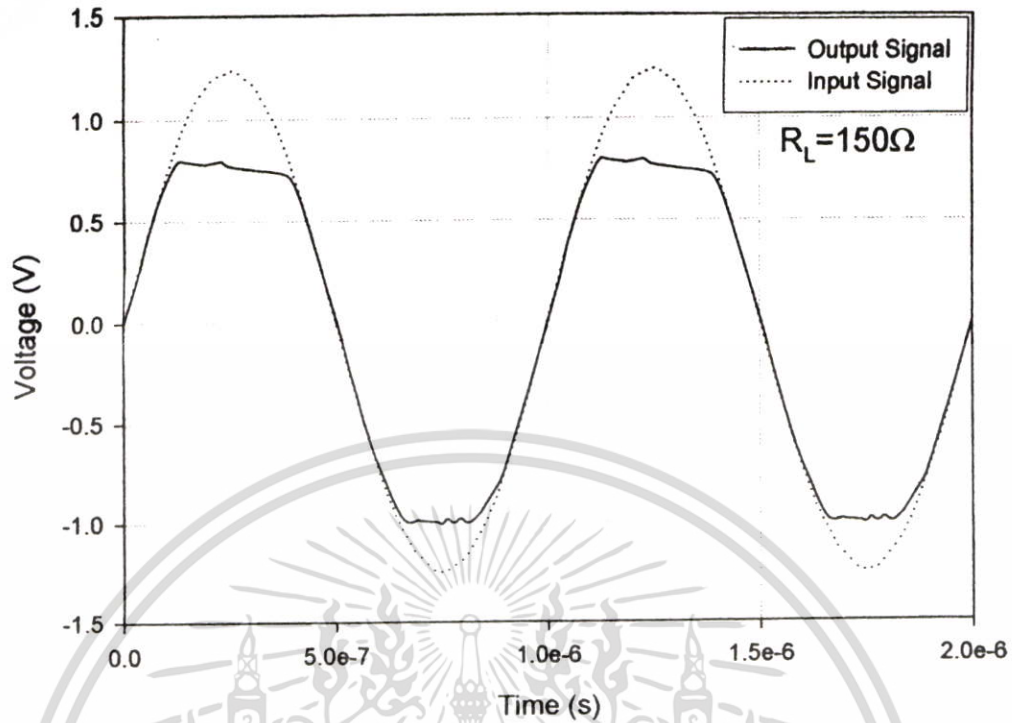


รูปที่ 3.25 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

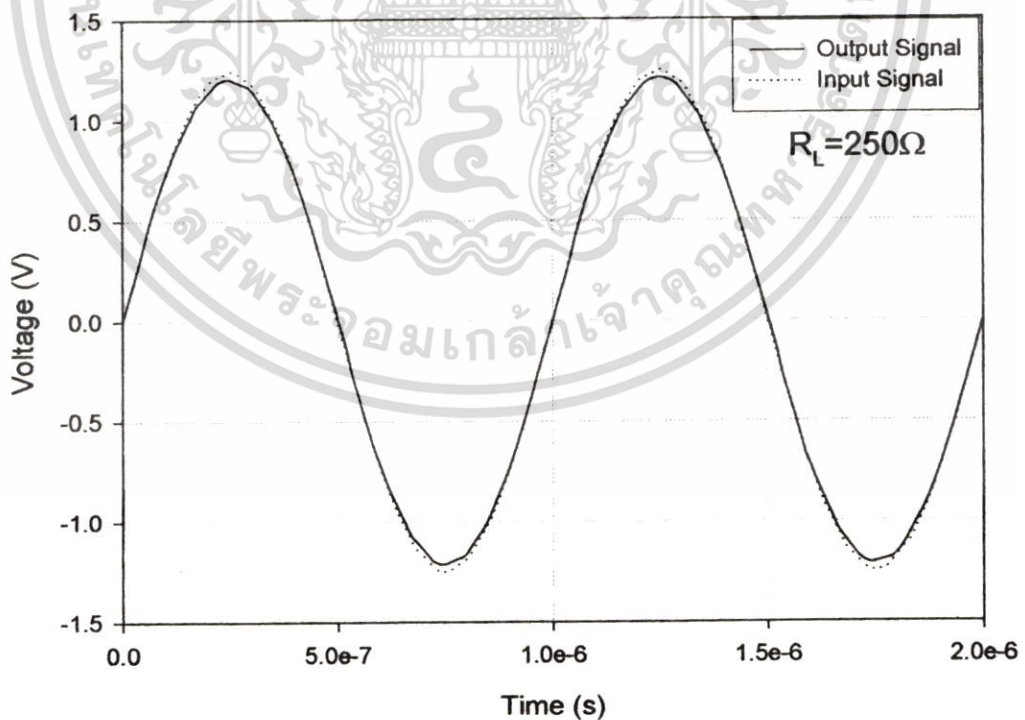


รูปที่ 3.26 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 50 โอห์มของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

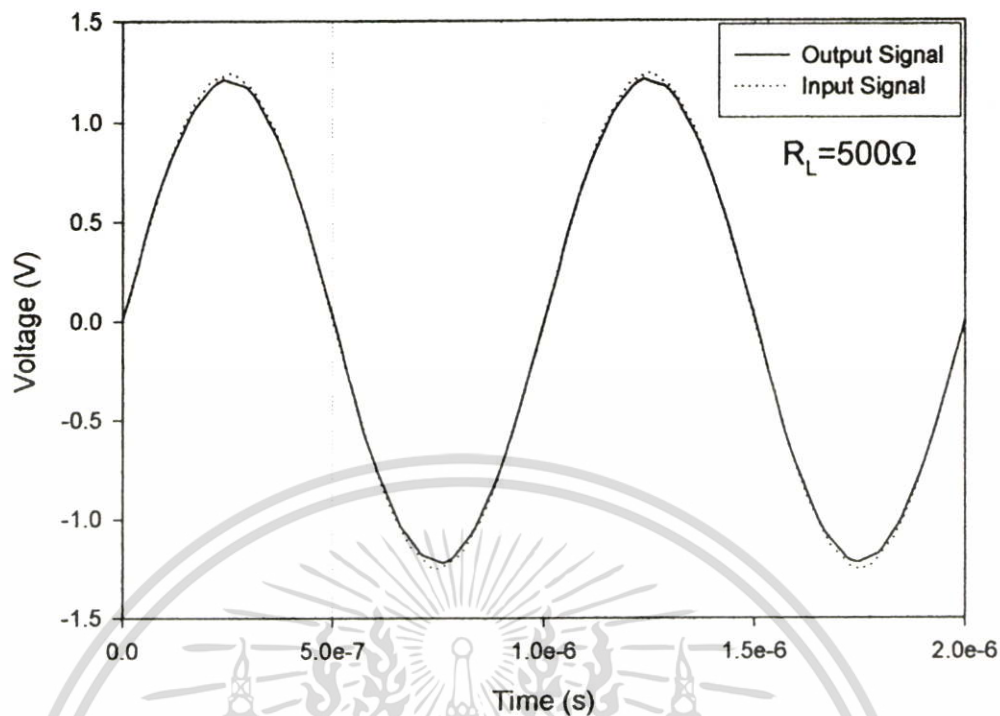


รูปที่ 3.27 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 150 โอห์มของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

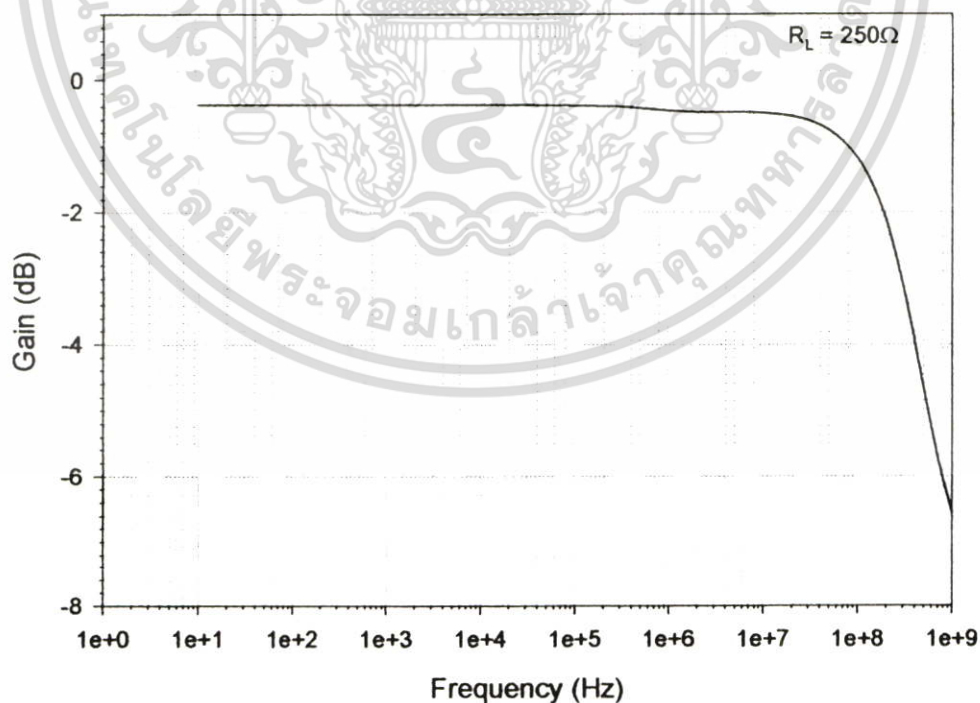


รูปที่ 3.28 การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรต์ ที่โหลดความต้านทาน 250 โอห์มของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

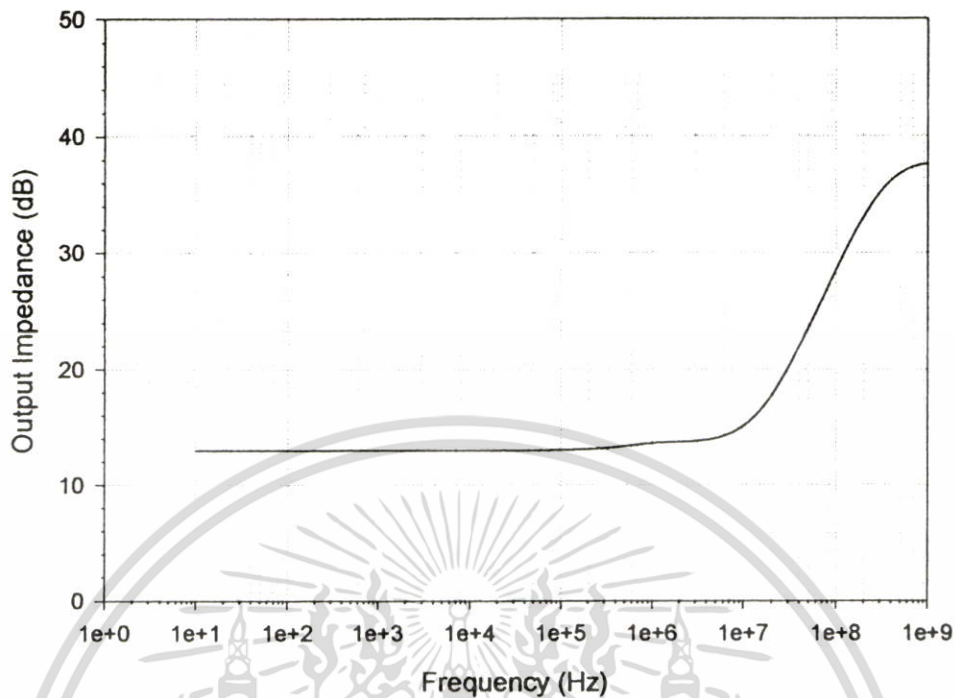


**รูปที่ 3.29** การสวิงของสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตขนาด  $\pm 1.25$  โวลต์ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่โหลดความต้านทาน 500 โอห์มของวงจรตามแรงดันที่นำเสนองจากการเลย์เอาต์ (Layout)



**รูปที่ 3.30** ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนองจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 เอ๊าท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

### 3.6 บทสรุป

วงจรตามแรงดันเป็นวงจรที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วงจรตามแรงดันที่ดีควรมีประสิทธิภาพดังนี้

- สามารถขับ โหลดที่มีความต้านทานต่ำได้
- การสวิงของสัญญาณเอ๊าท์พุทมีขนาดใหญ่
- อินพุทอิมพีแดนซ์สูง
- เอ๊าท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำ
- สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้
- ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ
- กำลังงานสูญเสียต่ำ

ในบทนี้ได้นำเสนอวงจรตามแรงดันที่อาศัยหลักการทำงานของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบี พื้นฐาน วงจรตามแรงดันที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหาทั้งสามประการของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบีพื้นฐาน คือ ประการที่หนึ่งลดปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเกิดจากความไม่เท่ากันของแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพี ประการที่สองเอ๊าท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการป้อนกลับแบบลบ ประการที่สาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์หรือเอกสารฉบับนี้ถูกนำออกไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรตามแรงดันที่นำเสนอมีช่วงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุทกว้าง โดยมีช่วงการสวิงของสัญญาณอยู่ในช่วง  $\pm 1.25$  โวลต์ วงจรตามแรงดันที่นำเสนอสามารถขับโหลดความต้านได้ต่ำสุด 250 โอห์ม และมีกำลังงานสูญเสียต่ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# วงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier)

### 4.1 บทนำ

วงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier : CFOA) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ข้อดีของวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส ที่เหนือกว่าวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับแรงดัน ได้แก่การมีอัตราสูงของวงจรรสูง และมีความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) การที่วงจรมีอัตราสูงที่สูง จะทำให้ช่วยลดปัญหาในเรื่องความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ความถี่สูงได้ ในเรื่องของความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ทำให้ในการใช้งานวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสสามารถกำหนดอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ทั้งสองอย่างได้ในเวลาเดียวกัน จากข้อดีดังกล่าวจึงทำให้วงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสมีความโดดเด่น และเป็นที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับวงจรรนอก

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงาน และคุณสมบัติทั่วไปของวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส การนำวงจรรความแรงดันที่นำเสนอในบทที่แล้วมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับ และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

### 4.2 คุณสมบัติทั่วไปของวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส

วงจรรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier) นับว่าเป็นวงจรรที่มีความจำเป็น และเป็นที่ยอมรับอย่างมากสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การใช้งานโดยทั่วไปของวงจรรขยายนั้นเป็นการใช้งานในลักษณะของการขยายสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเล็ก โดยมีทั้งวงจรรขยายสัญญาณแรงดัน และสัญญาณกระแส วงจรรขยายสัญญาณที่นิยมอย่างแพร่หลายได้แก่วงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับแรงดัน (Voltage Feedback Operational Amplifier) วงจรรขยายในลักษณะนี้จะมีปัญหาอย่างมากในเรื่องความไม่เป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรร กล่าวคือถ้าต้องการให้วงจรมีอัตราขยายสูง แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรรก็จะแคบ ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการให้แบนด์วิดท์ (Bandwidth) กว้าง อัตราขยายของวงจรรก็จะต่ำ ทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการทั้งสองอย่างได้ในเวลาเดียวกัน ปัญหาอีกประการหนึ่งของวงจรรขยายสัญญาณแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

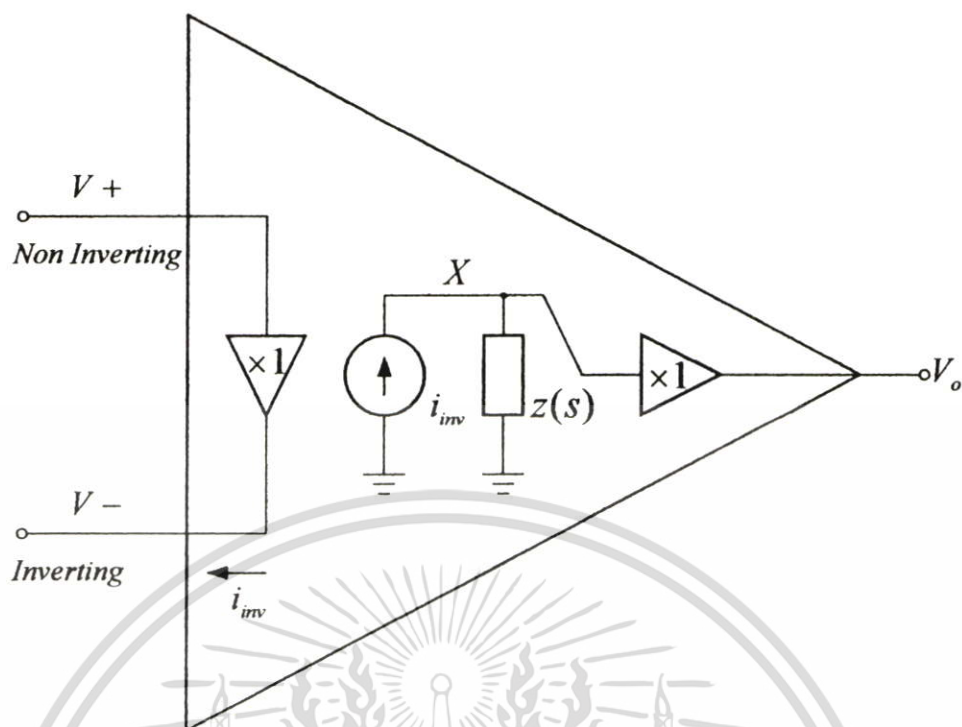
ป้อนกลับแรงดันคือ วงจรมีอัตราสลับที่ต่ำทำให้มีปัญหาอย่างมากในการนำวงจรไปใช้งานในช่วงความถี่สูง เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตจะตามสัญญาณอินพุตไม่ทัน ทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดความผิดเพี้ยน จากปัญหาทั้งสองประการพบว่าวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับแรงดันมีขีดจำกัดในการใช้งานอย่างมาก ปัญหาดังกล่าวของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับแรงดัน สามารถแก้ไขได้โดยวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier) ซึ่งมีข้อดีในเรื่องของความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ทำให้สามารถตอบสนองความต้องการทั้งสองอย่างได้ในเวลาเดียวกัน และข้อดีอีกประการหนึ่งวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสคือ มีอัตราสลับที่สูงทำให้วงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสสามารถใช้งานที่ความถี่สูงได้โดยไม่มีผิดเพี้ยนของสัญญาณ [2, 16-21]

#### 4.2.1 การทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส

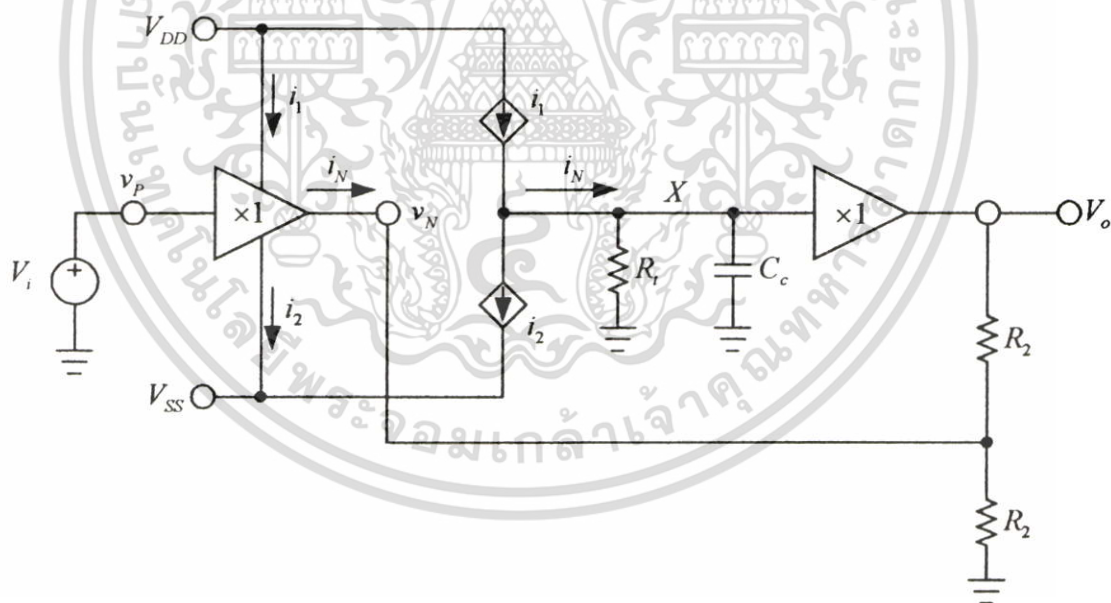
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier : CFOA) จากรูปพบว่าวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต ส่วนที่สองวงจรสะท้อนกระแส และส่วนที่สามวงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุต วงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตจะต่ออยู่ระหว่างขั้วอินพุตทั้งสองของวงจรถ่าย ขั้วบวกของวงจรถ่ายคือขั้วอินพุตของวงจรตามแรงดัน และขั้วลบของวงจรถ่ายคือขั้วเอาต์พุตของวงจรตามแรงดัน ทำให้ขั้วบวกของวงจรถ่ายมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูง และขั้วลบของวงจรถ่ายมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับศูนย์ วงจรสะท้อนกระแสซึ่งต่ออยู่ในภาคที่สองของวงจรจะคัดลอกกระแสจากขั้วลบของวงจรถ่ายและสะท้อนสู่โหนด  $X$  ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์สูงเพื่อแปลงกระแสเป็นแรงดัน ค่าอิมพีแดนซ์ที่โหนด  $X$  จะเป็นตัวกำหนดอัตราขยายเปิดลูปของวงจร วงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุตซึ่งต่ออยู่ในส่วนสุดท้ายของวงจรจะทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันจากโหนด  $X$  ไปสู่เอาต์พุตของวงจร และทำหน้าที่ในการขับโหลด ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$V_o = z(s) \cdot i_{in} \quad (4.1)$$

โดย  $z(s)$  คือค่าทรานอิมพีแดนซ์ของวงจรที่โหนด  $X$  ในหน่วยของโอห์ม และ  $i_{in}$  คือกระแสที่ไหลออกจากขั้วลบของวงจรถ่าย



รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ จากรูปพบว่าค่าทรานสดันด์แดนซ์  $z(s)$  จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ความต้านทาน  $R_f$  และ ตัวเก็บประจุ  $C_c$  ซึ่งสามารถหาค่าของ  $z(s)$  ได้ดังนี้

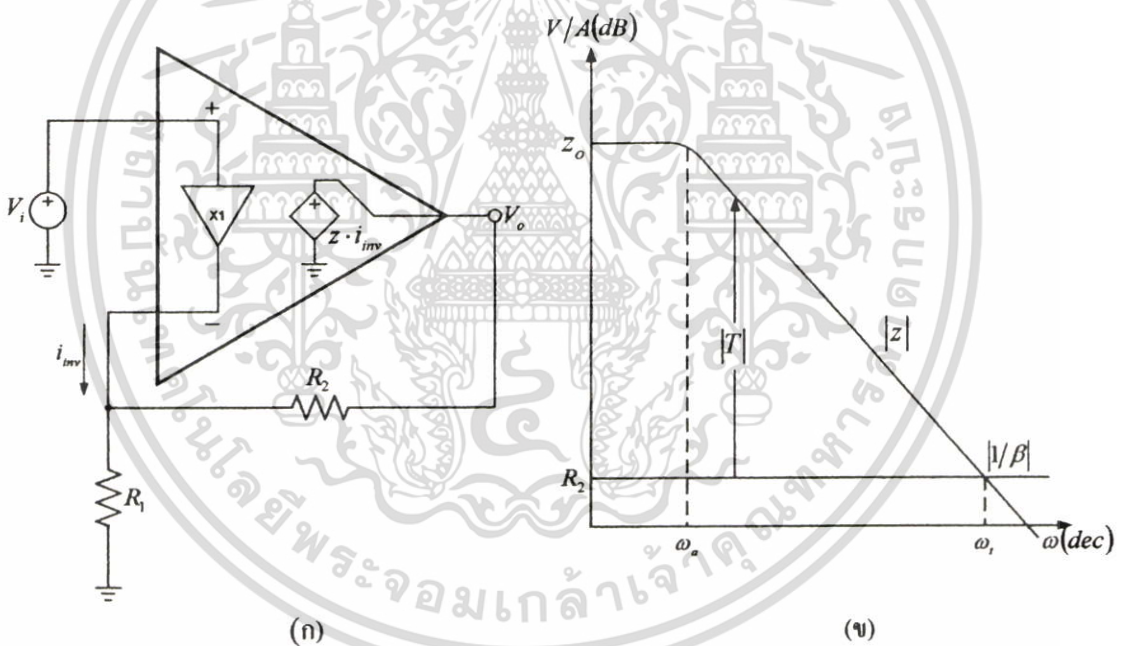
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$z(s) = R_1 \left\| \left( \frac{1}{j\omega C_c} \right) \right.$$

$$= \frac{z_0}{1 + s/\omega_a} \quad (4.2)$$

โดย  $\omega_a = \frac{1}{2\pi R_1 C_c}$  และ  $z_0$  คือค่าของความต้านทาน  $R_1$  ในช่วงความถี่ต่ำ

ในช่วงความถี่ต่ำอัตราขยายทรานคอนดักซ์เตนซ์  $z(s)$  จะมีค่าคงที่เท่ากับ  $z_0$  เมื่อความถี่มีค่าสูงกว่า  $\omega_a$  จะทำให้อัตราขยายทรานคอนดักซ์เตนซ์  $z(s)$  ของวงจรมีค่าลดลงตามความถี่ด้วยอัตรา  $-20\text{dB/dec}$  โดยทั่วไปค่าความต้านทาน  $R_1$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^6$  โอห์ม และค่าตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-12}$  ฟารัด ดังนั้นความถี่  $\omega_a$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^7$  เฮิรตซ์



รูปที่ 4.3 การใช้งานวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะป้อนกลับแบบลบ

รูปที่ 4.3 (ก) แสดงแบบจำลองวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะป้อนกลับแบบลบ เมื่อสัญญาณอินพุต  $V_i$  จากภายนอกถูกป้อนเข้าสู่วงจร วงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตจะเริ่มจ่าย หรือดึงกระแส  $i_{inv}$  จากสมการที่ (4.1) พบว่าเมื่อเกิดกระแส  $i_{inv}$  จะทำให้เกิดการสวิตช์ของสัญญาณเอาต์พุต โดยสามารถหากระแส  $i_{inv}$  ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{bv} = \frac{V_i}{R_1 \parallel R_2} - \frac{V_o}{R_2} \quad (4.3)$$

โดย  $V_o/R_2$  คือสัญญาณการป้อนกลับในรูปของกระแส และแฟคเตอร์การป้อนกลับ (Feedback Factor :  $\beta$ ) มีค่าเท่ากับ  $1/R_2$  ในหน่วยของแอมป์เปอร์ต่อโวลต์

จากรูปที่ 4.3 สามารถหาอัตราขยายของวงจรมหัพิดลูป (Closed Loop Gain) โดยการแทนสมการที่ (4.3) ในสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$A(s) = \frac{V_o}{V_i} = \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] \frac{1}{1 + 1/T(s)} \quad (4.4)$$

$$T(s) = \frac{z(s)}{R_2} \quad (4.5)$$

โดย  $T(s)$  คือลู่อัตราขยาย (Loop Gain) ของวงจร ซึ่งได้แก่สัญญาณกระแสที่ถูกป้อนกลับภายในลู่อัตราขยายด้วยค่าทรานอิมพีแดนซ์  $z(s)$  เพื่อแปลงให้เป็นแรงดัน และหารด้วยค่าความต้านทาน  $R_2$  เพื่อแปลงกลับมาเป็นกระแสอีกครั้งหนึ่ง รูปที่ 4.3 (ข) แสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรมหัพิดลูปสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ จากรูปสามารถหาค่าของลู่อัตราขยาย  $|T|$  ได้จากผลต่างระหว่างค่าทรานอิมพีแดนซ์  $|z|$  และส่วนกลับของแฟคเตอร์การป้อนกลับ  $|1/\beta|$  เพื่อให้เข้าใจมากขึ้นถ้ากำหนดให้ค่าทรานอิมพีแดนซ์  $|z|$  มีค่าเท่ากับ  $10^3 V/A$  และส่วนกลับของแฟคเตอร์การป้อนกลับ  $|1/\beta|$  มีค่าเท่ากับ  $10^3 V/A$  ดังนั้นจะได้ลู่อัตราขยาย  $|T|$  มีค่าเท่ากับ  $10^{5-3} = 10^2$

จากการแทนสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.5) และ (4.4) สำหรับ  $z_0/R_2 \gg 1$  สามารถหาอัตราขยายขณัฒปิดลูปได้ดังนี้

$$A(s) = A_0 \times \frac{1}{1 + s/\omega_c} \quad (4.6)$$

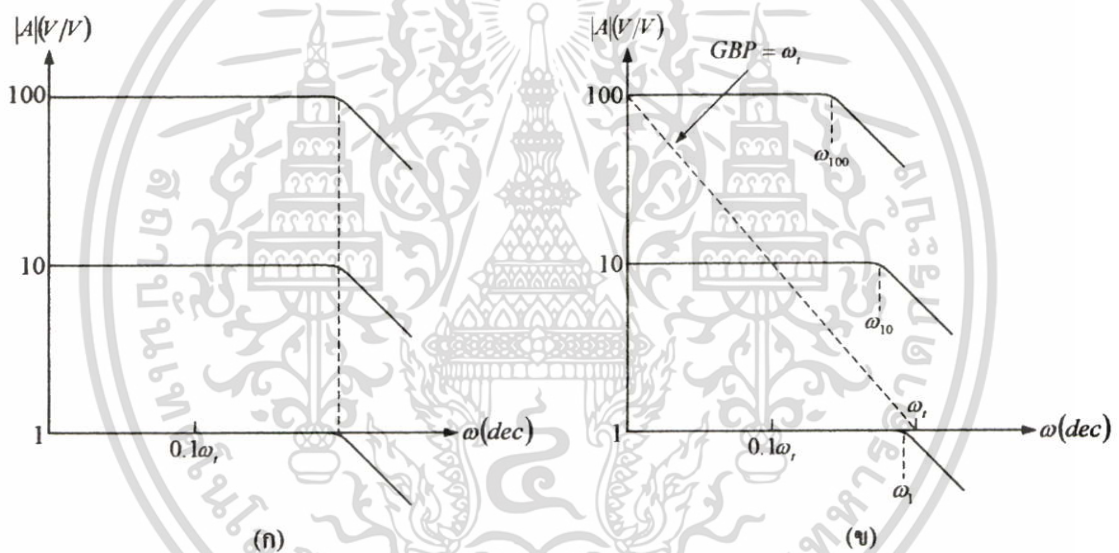
โดย  $A_0$  คืออัตราขยายขณัฒปิดลูปในช่วงความถี่ต่ำของวงจร ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$A_0 = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.7)$$

และ  $\omega_c$  คือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรถ่ายสัญญาณ ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\omega_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_c} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.7) และ (4.8) พบว่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ขณะปิดรูปของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน  $R_2$  ดังนั้นแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรถ่ายสัญญาณ  $\omega_c$  สามารถกำหนดด้วยความต้านทาน  $R_2$  และกำหนดค่าอัตราขยาย  $A_0$  ของวงจรถ่ายสัญญาณ  $R_1$  จากผลดังกล่าวพบว่าอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสจะเป็นอิสระต่อกันดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) ซึ่งเป็นข้อดีของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่มีเหนือวงจรถ่ายสัญญาณโดยทั่วไป



รูปที่ 4.4 แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ขณะปิดรูปของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (ก) ทางอุดมคติ (ข) ในทางปฏิบัติ

#### 4.2.2 วงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต และเอาต์พุตที่มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับศูนย์

จากการทำงานในลักษณะการป้อนกลับแบบลบของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส พบว่าความต้านทาน  $R_2$  เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส โดยไม่ขึ้นอัตราขยายขณะปิดรูป จากรูปที่ 4.4 (ข) พบว่าในทางปฏิบัติแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรถ่ายสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราขยาย  $A_0$  บ้างเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะไม่สูงเท่ากับกรณีของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับแรงดัน (Voltage Feedback Operational Amplifier) การที่แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสมีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราขยาย  $A_0$  เป็นผลมาจากเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรถ่ายสัญญาณแรงดันฝั่งอินพุต  $R_{o1}$  และวงจรถ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันฝั่งเอาต์พุต  $R_{o2}$  มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างของวงจรมัลติพลายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส โดยรวมผลของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต และฝั่งเอาต์พุต จากรูปสามารถหากระแส  $i_{mv}$  ได้ดังนี้

$$i_{mv} = \frac{V_i}{[R_{o1} + (R_1 \parallel (R_2 + R_{o2}))]} - \beta V_o \quad (4.9)$$

โดยแฟคเตอร์การป้อนกลับ  $\beta$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{R_1}{R_1 + R_{o1}} \times \frac{1}{(R_2 + R_{o2}) + (R_{o1} \parallel R_1)} \\ &= \frac{1}{(R_2 + R_{o2}) + R_{o1} \left(1 + \frac{R_2 + R_{o2}}{R_1}\right)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.10) พบว่าเมื่อเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต และเอาต์พุตมีค่าไม่เท่ากับศูนย์จะทำให้ส่วนกลับของแฟคเตอร์การป้อนกลับ  $|1/\beta|$  มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากค่าความต้านทาน  $R_2$  เป็น  $R'_2$  ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

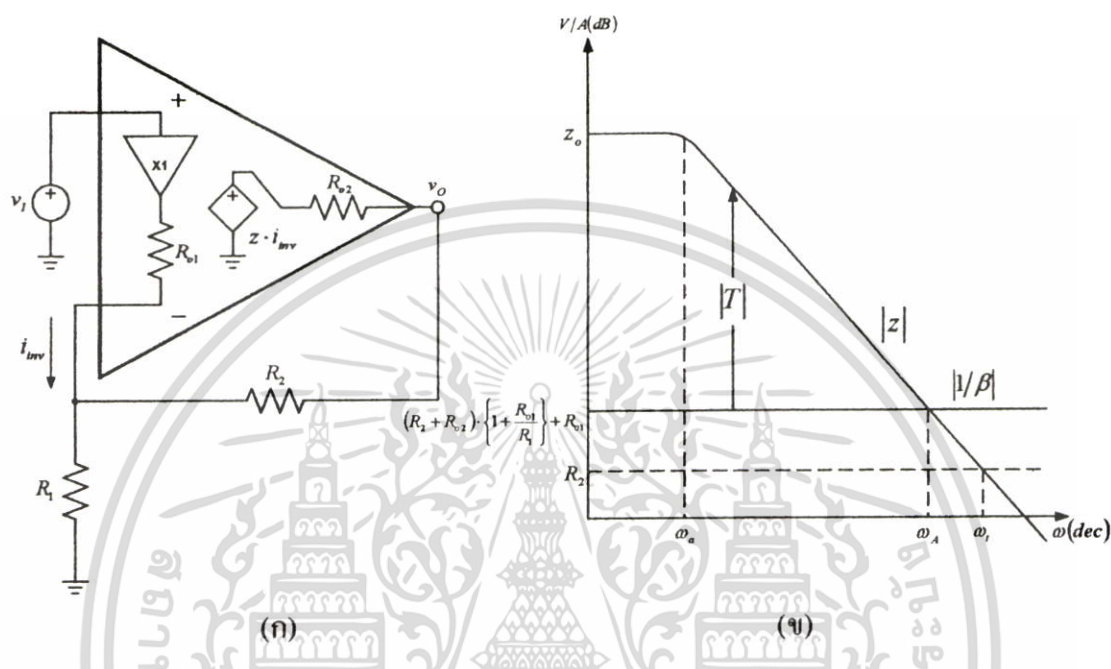
$$R'_2 = (R_2 + R_{o2}) \cdot \left\{1 + \frac{R_{o1}}{R_1}\right\} + R_{o1} \quad (4.11)$$

จากรูปที่ 4.5 (ข) พบว่าเมื่อส่วนกลับของแฟคเตอร์การป้อนกลับ  $|1/\beta|$  มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากค่าความต้านทาน  $R_2$  เป็น  $R'_2$  จะทำให้แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรมีค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับ  $\omega_A$  จากการแทนค่าความต้านทาน  $R_2$  เท่ากับ  $R'_2$  ในสมการที่ (4.11) ลงในสมการที่ (4.8) จะได้

$$\omega_A = \frac{\omega_i}{1 + \frac{R_{o1}}{(R_1 \parallel (R_2 + R_{o2}))}} \quad (4.12)$$

โดย  $\omega$ , คือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรมัลติพลายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสเมื่อพิจารณาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต และเอาต์พุต มีค่าเท่ากับศูนย์ จากผลดังกล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าการใช้ค่าความต้านทาน  $R_2$  และ  $R_1$  เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากช่วงแบนด์วิดท์ (Bandwidth) และอัตราขยายของวงจรจะมีสัมพันธ์กัน โดยสามารถกำหนดค่าความต้านทาน  $R_2$  เพื่อให้ได้ช่วงแบนด์วิดท์ (Bandwidth)  $\omega_A$  และช่วงอัตราขยาย  $A_0$  หลังจากนั้นกำหนดค่าความต้านทาน  $R_1$  เพื่อให้ได้อัตราขยาย  $A_0$  ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.5 แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสเมื่อเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุท และเอาท์พุท มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

#### 4.2.3 เสถียรภาพของวงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานวงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่มีความถี่สูงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานวงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าอัตราขยายและแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรเป็นอิสระต่อกัน โดยแบนด์วิดท์ (Bandwidth) จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราขยายบ้างเล็กน้อย รูปที่ 4.6 แสดงการตอบสนองทางความถี่ของวงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส จากรูปพบว่าค่าความต้านทานป้อนกลับ  $R_2$  จะมีผลต่อเสถียรภาพของวงจร โดยถ้าค่าความต้านทาน  $R_2$  มีค่าเล็กเกินไปจะทำให้วงจขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสไม่มีเสถียรภาพ จากปัญหาดังกล่าวในการออกแบบจะทำการกำหนดขนาดต่ำสุดของค่าความต้านทานป้อนกลับ  $R_2$  ที่ทำให้วงจรมีเสถียรภาพ การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเพื่อให้ได้ค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ทำให้วงจรมีเสถียรภาพสามารถพิจารณาได้จากพล็อตอัตราขยายเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานป้อนกลับ  $R_2$  และแบนด์วิดท์

(Bandwidth) จากรูปที่ 4.5 (ก) สามารถหาค่าทรานซิมพีแคนซ์  $z(s)$  ของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสในลักษณะการป้อนกลับแบบลบได้ดังนี้

$$z(s) = \frac{R_f}{(1+s\tau_1)(1+s\tau_2)} \quad (4.13)$$

และ

$$\tau_1 = R_f \cdot C_c \quad (4.14)$$

โดย  $1/\tau_1$  คือ โพลตัวแรกที่มีความถี่ต่ำของวงจรซึ่งเกิดจากค่าความต้านทาน  $R_f$  และ ค่าตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  และ  $1/\tau_2$  คือ โพลตัวที่สองที่มีความถี่สูงซึ่งเป็นผลมาจากวงจรสะท้อนกระแส โดยทั่วไปความถี่ของโพลตัวที่สองที่เกิดจากวงจรสะท้อนกระแสจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับโพลตัวแรกที่เกิดจากค่าทรานซิมพีแคนซ์ จากที่กล่าวมาแล้วว่าถ้าความต้านทานป้อนกลับ  $R_2$  มีขนาดเล็กมาก ทำให้ที่ความถี่สูงอัตราขยายของวงจรจะพุ่งสูงขึ้นทำให้วงจร ไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นเพื่อป้องกันความไม่เสถียรภาพของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสค่าความต้านทานป้อนกลับ  $R_2$  จึงควรมีค่าเท่ากับ  $2\tau_2/C_c$  [23] ซึ่งสามารถหาความถี่ที่  $-3$  dB ได้ดังนี้

$$\omega_u = \frac{0.707}{\tau_2} \quad (4.15)$$

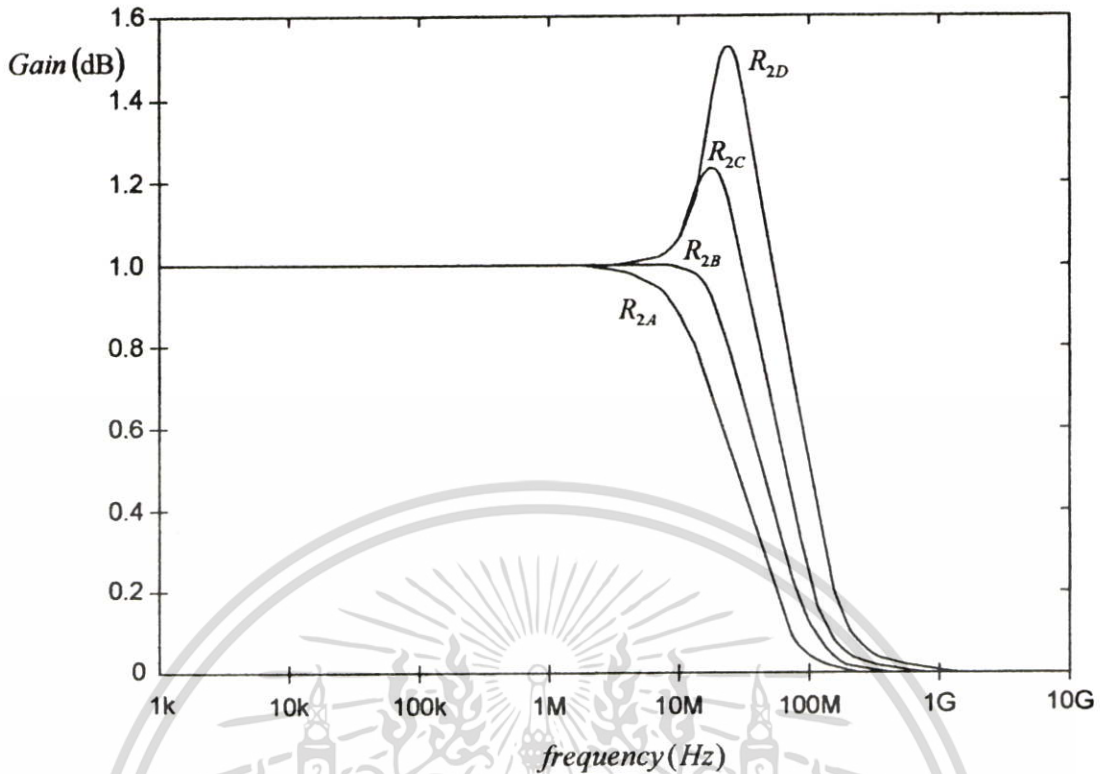
เมื่อพิจารณาผลของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต และฝั่งเอาต์พุตสามารถหาลู่อัตราขยายได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{z(s)}{(R_2 + R_{o2}) \cdot \left\{ 1 + \frac{R_{o1}}{R_1} \right\} + R_{o1}} \quad (4.16)$$

ทำการแทนสมการที่ (4.13) และ (4.14) ลงในสมการที่ (4.16) จะได้ลู่อัตราขยาย  $T(s)$  ดังนี้

$$T(s) = \frac{(R_f/R_2)}{(1+s\tau_1)(1+s\tau_2)} \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

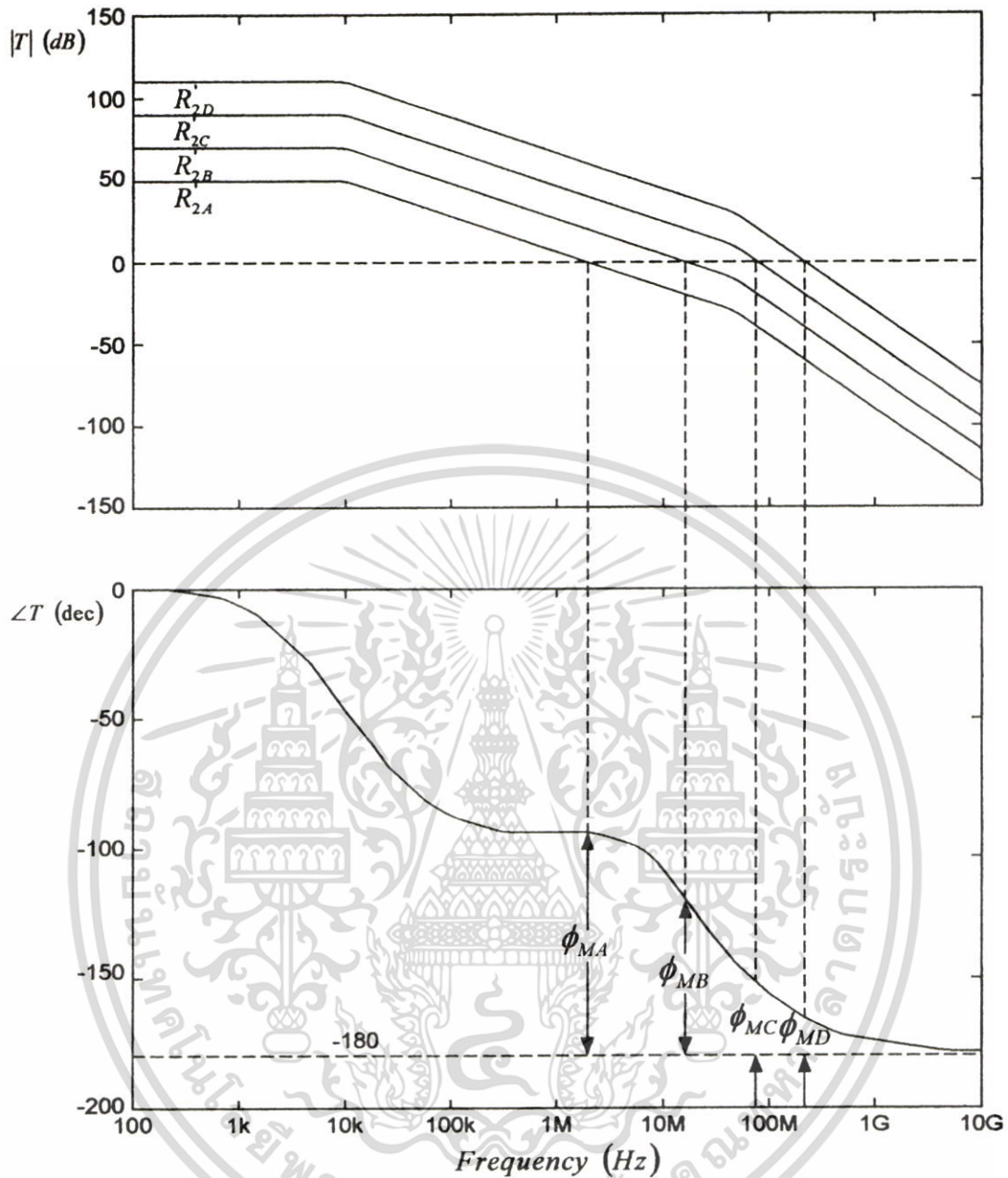


รูปที่ 4.6 การตอบสนองความถี่ของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส ( $R_{2A} = 4\tau_2/C_c$ ,  $R_{2B} = 2\tau_2/C_c$ ,  $R_{2C} = \tau_2/C_c$  และ  $R_{2D} = 0.5\tau_2/C_c$ )

รูปที่ 4.7 แสดงลูปอัตราขยาย (Loop Gain) ของวงจรที่ได้จากสมการที่ (4.17) โดยการแทนค่าความต้านทานป้อนกลับ  $R_2$  จากรูปพบว่าเฟสแมจิ้น (Phase Margin:  $\phi_M$ ) ของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานป้อนกลับ  $R_2$  โดยถ้าค่าความต้านทาน  $R_2$  มีค่าน้อยช่วงแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสจะกว้าง แต่เฟสแมจิ้น (Phase Margin) จะมีค่าน้อย ดังนั้นการเลือกใช้ค่าความต้านทานป้อนกลับ  $R_2$  จึงมีความสำคัญ และควรระมัดระวังอย่างมากในการเลือกใช้งาน เนื่องจากจะมีผลกระทบต่อแบนด์วิดท์ (Bandwidth) และเสถียรภาพของวงจร ค่าความต้านทานป้อนกลับที่สัมพันธ์กับเฟสแมจิ้น (Phase Margin) ของวงจรสามารถหาได้ดังนี้

$$R_2' = \frac{2\tau_2}{C_c \sqrt{\left(\frac{2}{\tan^2 \phi_M} + 1\right)^2 - 1}} \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ขนาดและการตอบสนองเฟสของลู่อัยครายขยาย (Loop Gain) ( $R'_{2A} = 10K\Omega$ ,  $R'_{2B} = 1K\Omega$ ,  $R'_{2C} = 100\Omega$  และ  $R'_{2D} = 10\Omega$ )

จากสมการที่ 4.18 พบว่าค่าความต้านทาน  $R'_2$  และตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  มีความสำคัญอย่างมากสำหรับประสิทธิภาพ และเสถียรภาพของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส การเลือกใช้งานค่าความต้านทาน  $R'_2$  และตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  จะต้องพิจารณาดังนี้ เริ่มแรกพิจารณาจากเสถียรภาพของวงจรจากเฟสมาจิ้น (Phase Margin) ก่อน โดยทั่วไปค่าเฟสมาจิ้น (Phase Margin) จะมีค่าเท่ากับ 60 องศา หลังจากนั้นพิจารณาประสิทธิภาพของวงจรในเรื่องของแบนด์วิดท์ และอัตราสูญเสียของวงจร ซึ่งขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ค่าความต้านทาน  $R'_2$  และตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  โดยถ้าต้องการให้วงจรสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ค่าความต้านทาน  $R'_2$  ควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นเว็บไซต์นี้โปรดอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าต่ำ ซึ่งจะทำให้ค่าตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  มีขนาดใหญ่ การที่ตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  มีขนาดใหญ่จะทำให้อัตราส่วนของวงจรมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ความถี่สูงได้ และขนาดของวงจรจากการเลย์เอาต์ (Layout) มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการให้อัตราส่วนของวงจรมีค่าสูง ตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  ควรจะมีขนาดเล็ก ทำให้ค่าความต้านทาน  $R_2'$  มีขนาดใหญ่ แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรจึงแคบ ดังนั้นการกำหนดค่าความต้านทาน  $R_2'$  และตัวเก็บประจุชดเชยความถี่  $C_c$  จึงต้องพิจารณาถึงการนำวงจรไปใช้งานว่าต้องการให้วงจรทำงานที่ความถี่สูง หรือต้องการให้วงจรมีอัตราสลับที่สูง

#### 4.3 วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

จากทฤษฎีการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่า วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสควรมีคุณสมบัติดังนี้ เอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุทควรมีค่าต่ำ เพื่อแก้ไขปัญหาในเรื่องการลดลงของรูปอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรมีค่าสูงตามที่ (4.10) และ (4.11) ค่าอิมพีแดนซ์ที่โหนด  $X$  ควรมีค่าสูงเนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราขยายขณะเปิดลูปของวงจรมีค่าสูงตามที่ (4.1) รูปที่ 4.8 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ วงจรที่นำเสนอทำงานภายใต้โครงสร้างของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสแบบพื้นฐาน จากรูปที่ 4.8 มอสทรานซิสเตอร์  $M_{11} - M_{118}$  ทำหน้าที่เป็นวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุทของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส มอสทรานซิสเตอร์  $M_{14,14,8,18}$  และมอสทรานซิสเตอร์  $M_{c1} - M_{c12}$  ทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสที่มีเอาท์พุทอิมพีแดนซ์สูง (Regulated Cascode Current Mirror) [4, 24] วงจรสะท้อนกระแสจะทำการคัดลอกกระแสจากขั้วอินพุทของวงจรไปยังโหนด  $X$  ซึ่งเป็นโหนดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง สัญญาณกระแสที่โหนด  $X$  จะถูกแปลงเป็นแรงดัน โดยวงจรสะท้อนกระแสจะมีเอาท์พุทอิมพีแดนซ์สูงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่โหนด  $X$  มีค่าสูง มอสทรานซิสเตอร์  $M_{o1} - M_{o18}$  ทำหน้าที่เป็นวงจรตามแรงดันฝั่งเอาท์พุทของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส โดยจะทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันจากโหนด  $X$  ไปสู่โหลด และทำหน้าที่ในการจับโหลด

วงจรตามแรงดันฝั่งอินพุทของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจะอาศัยหลักการทำงานของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอในบทที่แล้ว มอสทรานซิสเตอร์  $M_{11}, M_{13}, M_{15}$  และ  $M_{17}$  ทำงานในลักษณะของวงจรตามแรงดันแบบคอมมอนเดรน (Common Drain) 2 ภาค วงจรสะท้อนกระแสซึ่งประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพี ( $M_{12}, M_{14}$  และ  $M_{16}, M_{18}$ ) จะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กลับวงจรด้วยอัตราส่วนกระแสเท่ากับ  $\alpha_1$  จากการที่กระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์  $M_{11}$  และ  $M_{12}$  มีขนาดเท่ากัน และกระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์  $M_{13}$  และ  $M_{14}$  มีขนาดเท่ากัน เนื่องจากทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นมีขนาดที่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทรานซิสเตอร์ชนิดที่มีขนาดที่เท่ากันจึงส่งผลให้แรงดันเกตของขอสทรานซิสเตอร์  $M_{11}$  และ  $M_{13}$  มีขนาดใกล้เคียงกัน พิจารณาในลักษณะเดียวกันสำหรับวงจรตามแรงดันขุดบนแรงดันเกตของขอสทรานซิสเตอร์  $M_{15}$  และ  $M_{17}$  จึงมีขนาดใกล้เคียงกัน

สำหรับค่าทรานคอนดักซ์แดนซ์ (Transconductance) ที่เพิ่มขึ้นของตามแรงดันฝั่งอินพุตนั้น อาศัยหลักการทำงานร่วมกันของมอสทรานซิสเตอร์ซึ่งประกอบด้วย  $M_{11} - M_{14}$  และ  $M_{15} - M_{18}$  ทำให้ได้ค่า ทรานคอนดักซ์แดนซ์ของวงจรตามแรงดันขุดล่าง ( $M_{11} - M_{14}$ ) ดังนี้

$$g_{m(LOWER)} = \frac{g_{m1} \cdot g_{m3}}{g_{m1} - \alpha_1 \cdot g_{m3}} \quad (4.15)$$

และค่าทรานคอนดักซ์แดนซ์ของวงจรตามแรงดันขุดบน ( $M_{16} - M_{18}$ ) สามารถหาได้ดังนี้

$$g_{m(UPPER)} = \frac{g_{m5} \cdot g_{m7}}{g_{m5} - \alpha_1 \cdot g_{m7}} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ (4.15) และ (4.16) สามารถหาค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต สำหรับสัญญาณอินพุตที่มีการสวิงอยู่ในช่วงของแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  และ  $V_{LOW}$  ได้ดังนี้

$$R_o = \left( \frac{1}{g_{m3}} - \frac{\alpha_1}{g_{m1}} \right) \parallel \left( \frac{1}{g_{m7}} - \frac{\alpha_1}{g_{m5}} \right) \quad (4.17)$$

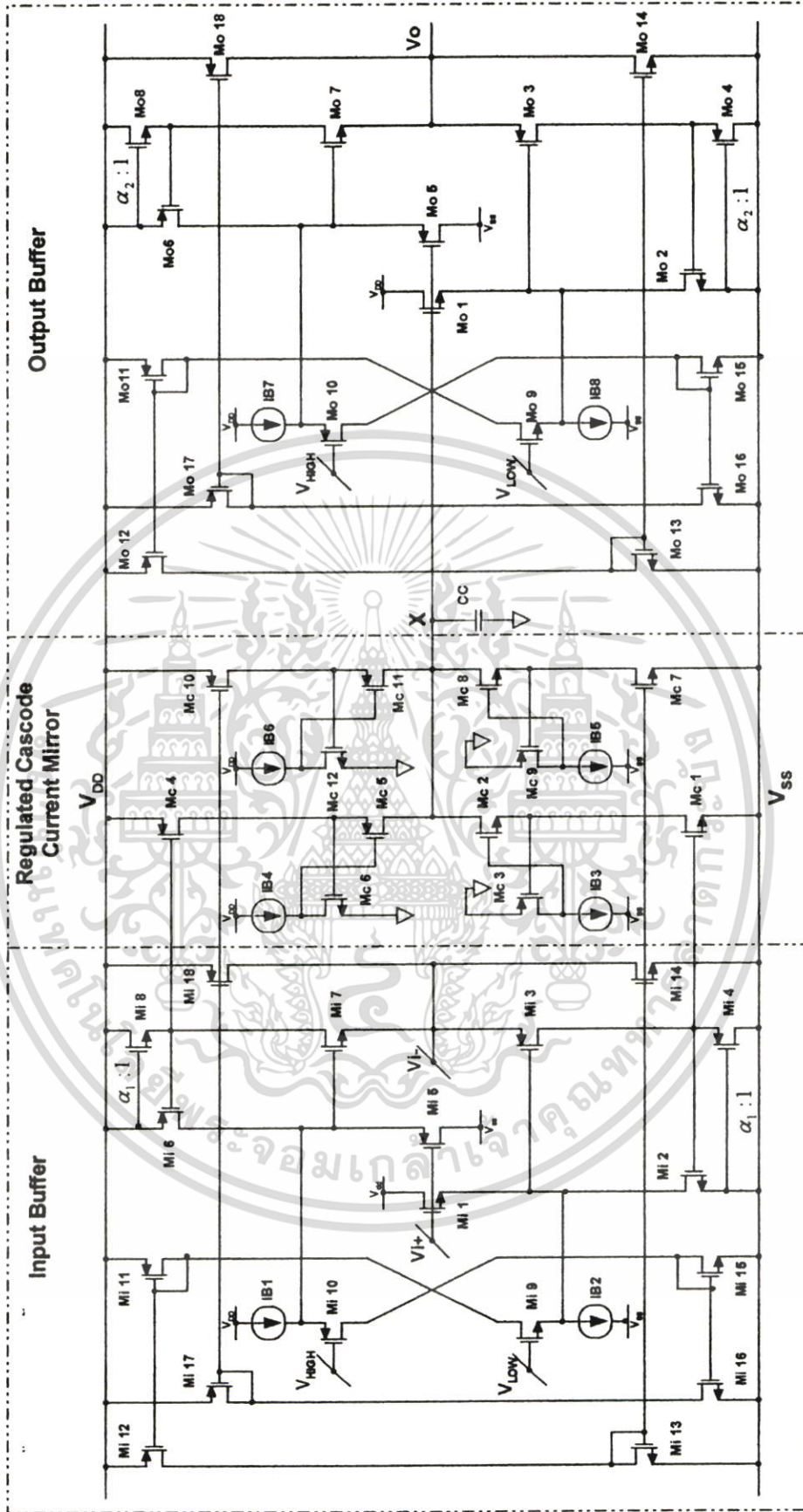
สำหรับกรณีที่สัญญาณอินพุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง  $V_{LOW}$  กระแสทั้งหมดจากแหล่งจ่ายกระแส  $I_{B2}$  ที่จ่ายให้กับมอสทรานซิสเตอร์  $M_{11}$  และ  $M_{19}$  ซึ่งต่อในลักษณะของวงจรขยายความแตกต่าง จะไหลไปทางมอสทรานซิสเตอร์  $M_{19}$  กระแสเดรนจากมอสทรานซิสเตอร์  $M_{19}$  จะถูกสะท้อนไปสู่มอสทรานซิสเตอร์  $M_{14}$  ด้วยวงจรสะท้อนกระแส 2 ชุด ได้แก่  $M_{11} - M_{12}$  และ  $M_{13} - M_{14}$  ขณะนี้มอสทรานซิสเตอร์  $M_{14}$  จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสให้กับวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตขุดบน ( $M_{15} - M_{18}$ ) ซึ่งทำให้วงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตมีขีดจำกัดในการสวิงช่วงลบเท่ากับ

$$V_{o(MIN)} = V_{SS} + V_{DSAT14} \quad (4.18)$$

และเอาท์พุทอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ

$$R_{o(LOW)} = \frac{1}{g_{m7}} - \frac{\alpha_1}{g_{m5}} \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกรณีที่สัญญาณอินพุตมีค่าสูงกว่าแรงดันอ้างอิง  $V_{HIGH}$  กระแสทั้งหมดจากแหล่งจ่ายกระแส  $I_{B1}$  ที่จ่ายให้กับมอสทรานซิสเตอร์  $M_{15}$  และ  $M_{110}$  ซึ่งต่อในลักษณะของวงจรขยายความแตกต่าง จะไหลไปมอสทรานซิสเตอร์  $M_{110}$  กระแสเดรนจากมอสทรานซิสเตอร์  $M_{110}$  จะถูกสะท้อนไปสู่มอสทรานซิสเตอร์  $M_{118}$  ด้วยวงจรสะท้อนกระแส 2 จุด ได้แก่  $M_{115} - M_{116}$  และ  $M_{117} - M_{118}$  ขณะนี้มอสทรานซิสเตอร์  $M_{118}$  จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสให้กับวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตชุดล่าง ( $M_{11} - M_{14}$ ) ซึ่งทำให้วงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตมีขีดจำกัดในการสวิงช่วงบวกเท่ากับ

$$V_{o(MAX)} = V_{DD} - V_{DSAT18} \quad (4.20)$$

และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ

$$R_{o(HIGH)} = \frac{1}{g_{m3}} - \frac{\alpha_1}{g_{m1}} \quad (4.21)$$

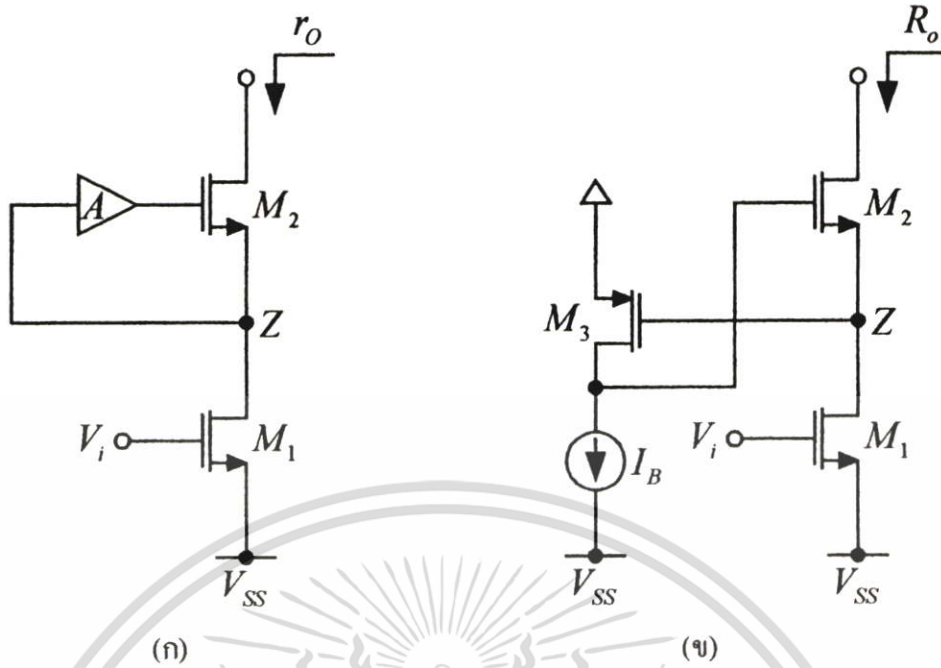
กระแสเอาต์พุตจากวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต หรือกระแสจากขั้วลบของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสจะถูกคัดลอกและสะท้อนไปยังโหนด  $X$  ซึ่งเป็นโหนดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงเพื่อสร้างอัตราขยายของวงจร และแปลงกระแสให้เป็นแรงดันส่งต่อให้กับวงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุต โดยในมอสทรานซิสเตอร์  $M_{14,14,8,18}$  และมอสทรานซิสเตอร์  $M_{c1} - M_{c12}$  จะทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสที่มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง (Regulated Cascode Current Mirror) [4, 24] เพื่อเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ที่โหนด  $X$  โดยสามารถอธิบายหลักการทำงานได้ดังรูปที่ 4.9

จากรูปที่ 4.9 (ก) วงจรขยายซึ่งทำงานในลักษณะการป้อนกลับแบบลบที่มีอัตราขยายเท่ากับ  $A$  จะทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนของทรานซิสเตอร์  $M_2$  ซึ่งจะทำให้แรงดัน  $V_Z$  ที่โหนด  $Z$  ถูกบังคับจากวงจรขยายให้มีค่าคงที่ กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์  $M_1$  และ  $M_2$  จึงมีค่าคงที่ ดังนั้นเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรในรูปที่ 4.9 (ก) จึงมีค่าสูง โดยสามารถหาได้ดังนี้

$$R_o = Ag_{m2}r_{o2}r_{o1} \quad (4.22)$$

จากรูปที่ 4.9 (ข) ทรานซิสเตอร์  $M_3$  จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยาย โดยมีอัตราขยาย  $A$  เท่ากับ  $g_{m3}r_{o3}$  ดังนั้นสามารถหาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรในรูปที่ 4.9 (ข) ได้ดังนี้

$$R_o = (g_{m3}r_{o3})(g_{m2}r_{o2}r_{o1}) \quad (4.23)$$



รูปที่ 4.9 วงจรสะท้อนกระแสที่มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง (Regulated Cascode Current Mirror)

จากหลักการดังกล่าวจึงทำให้ที่โหนด  $X$  ของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนออิมพีแดนซ์ที่สูง และมีช่วงการสวิงของสัญญาณซีกบวกเท่ากับ  $V_{DD} - 2V_{DSAT}$  และช่วงการสวิงของสัญญาณซีกลบมีค่าเท่ากับ  $V_{SS} + 2V_{DSAT}$

ในส่วนของวงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุตซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์  $M_{o1} - M_{o18}$  จะอาศัยหลักการทำงานเดียวกับวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต สำหรับแรงดันที่โหนด  $X$  ที่มีขนาดอยู่ในช่วง  $V_{LOW}$  และ  $V_{HIGH}$  มอสทรานซิสเตอร์  $M_{o1}, M_{o3}, M_{o5}$  และ  $M_{o7}$  ทำงานในลักษณะของวงจรตามแรงดันแบบคอมมอนเดรน (Common Drain) 2 ภาค โดยวงจรสะท้อนกระแสซึ่งประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพี ( $M_{o2}, M_{o4}$  และ  $M_{o6}, M_{o8}$ ) จะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กลับวงจรด้วยอัตราส่วนกระแสเท่ากับ  $\alpha_2$  โดยแรงดันเกตของมอสทรานซิสเตอร์  $M_{o1}$  และ  $M_{o3}$  จะมีขนาดใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับแรงดันเกตของมอสทรานซิสเตอร์  $M_{o5}$  และ  $M_{o7}$  จะมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อแรงดันที่โหนด  $X$  มีขนาดสูงกว่า  $V_{HIGH}$  และต่ำกว่า  $V_{LOW}$  วงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุตชุดบน และชุดล่างจะแยกกันทำงานในลักษณะเดียวกับวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต

ข้อแตกต่างระหว่างวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต และวงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุตคือ กระแสที่ออกจากวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุต จะมีขนาดที่ไม่ใหญ่มากนัก ในส่วนของวงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุตกระแสเอาต์พุตจะมีขนาดใหญ่เนื่องจากจะต้องมีปริมาณที่มากพอเพื่อใช้ในการขับโหลด ดังนั้นขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ในส่วนของวงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุตจึงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ในวงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตมาก

#### 4.4 ผลการจำลองการทำงาน

ในการออกแบบ และจำลองการทำงานของวงจรรายขายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ นั้น จะใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมโครเมตรในการออกแบบ และใช้โปรแกรม HSPICE โมเดล พารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์ระดับ 49 ในการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรถิ่นำเสนอ ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของทรานซิสเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองการทำงาน ในการจำลองการทำงานจะแยกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การจำลองการทำงานของวงจรถิ่นำเสนอที่ได้จากการออกแบบ และการจำลองการทำงานของวงจรถิ่นำเสนอที่ได้จากการเลย์เอาต์ (Layout)

ตารางที่ 4.1 ขนาดของทรานซิสเตอร์สำหรับวงจรรายขายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส

ทรานซิสเตอร์	อัตราส่วน (W/L)
$M_{i1}, M_{i2}, M_{i9}$	12/1
$M_{i3}, M_{i4}$	85/1
$M_{i5}, M_{i6}, M_{i10}$	40/1
$M_{i7}, M_{i8}, M_{c2}$	24/1
$M_{i11}, M_{o11}$	4.5/1
$M_{i12}, M_{i17}, M_{o12}, M_{o17}$	43/1
$M_{i13}, M_{i16}, M_{o13}, M_{o16}$	11/1
$M_{i14}$	30/1
$M_{i15}, M_{o15}$	1.2/1
$M_{i18}, M_{c10}$	100/1
$M_{c1}$	25/1
$M_{c3}$	7/1
$M_{c4}$	82/1
$M_{c5}, M_{c11}$	80/1
$M_{c6}$	3/1
$M_{c7}, M_{c8}, M_{o1}, M_{o2}, M_{o9}$	35/1
$M_{c9}$	2/1
$M_{c12}$	1.5/1
$M_{o3}, M_{o4}$	530/0.5
$M_{o5}, M_{o6}, M_{o10}$	120/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

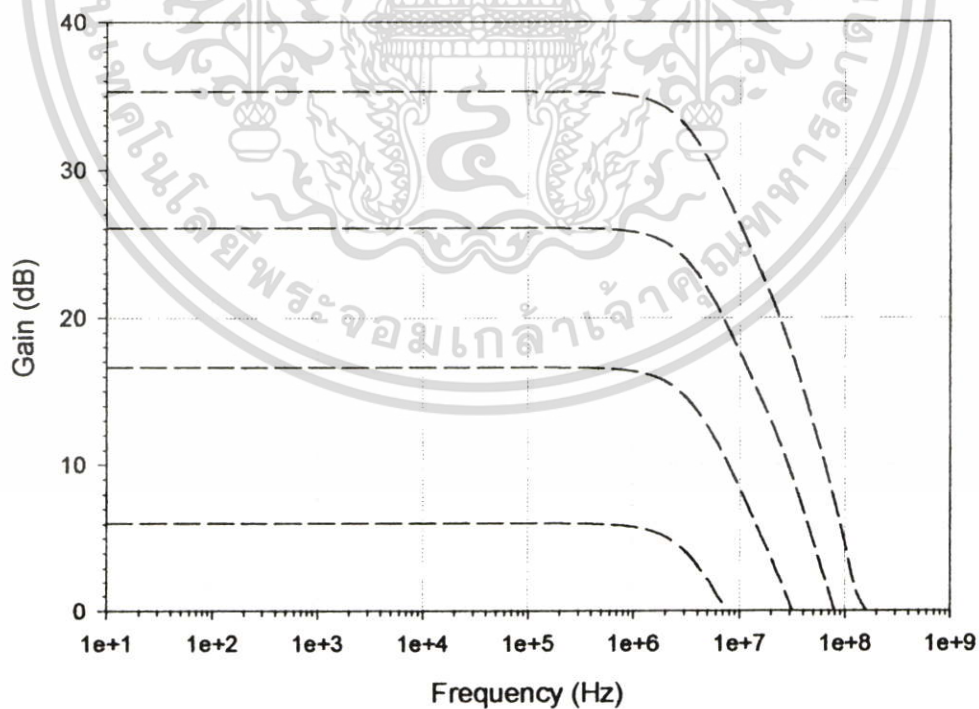
ทรานซิสเตอร์	อัตราส่วน ( $W/L$ )
$M_{o7}, M_{o8}$	320/0.5
$M_{o14}$	390/0.5
$M_{o18}$	1120/0.5

#### 4.4.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแส

จากผลการจำลองการทำงานของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ สามารถสรุปประสิทธิภาพของวงจรได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.10 แสดงความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยายและแบนด์วิธ (Bandwidth) ของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ โดยกำหนดค่าความต้านทานป้อนกลับ ( $R_2$ ) มีค่าคงที่เท่ากับ 10 กิโลโอห์ม จากรูปพบว่า อัตราขยายของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสมีความเป็นอิสระจากแบนด์วิธ (Bandwidth) รูปที่ 4.11 แสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ จากรูปพบว่าอัตราขยายขณะเปิดลูปมีค่าเท่ากับ 86.5  $\Omega$ dB รูปที่ 4.12 แสดงการตอบสนองทางเวลาของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ ในลักษณะการป้อนกลับแบบลบที่อัตราขยายเท่ากับ 20 dB ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ รูปที่ 4.13 แสดงการตอบสนองความถี่ของสัญญาณแบบขั้นบันได ที่โหลดความต้านทาน 250 โอห์ม ขนานกับตัวเก็บประจุ 10 พิโคฟาร์ด โดยมีอัตราขยายเท่ากับ 2 รูปที่ 4.14 แสดงอัตราสูญเสียของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ จากรูปพบว่าอัตราสูญเสียของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 395 โวลต์ต่อไมโครวินาที รูปที่ 4.15 แสดงอัตราสูญเสียของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ จากรูปพบว่าอัตราสูญเสียของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 378 โวลต์ต่อไมโครวินาที รูปที่ 4.16 แสดงอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้วอินพุตของวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับที่นำเสนอ จากรูปพบว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้วอินพุตมีค่าเท่ากับ 36.55  $\Omega$ dB ภายใต้สภาวะสงบนิ่งวงจรที่นำเสนอมีกำลังงานสูญเสียเท่ากับ 33.75 มิลลิวัตต์ ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ กับวงจรมัลติเพล็กซ์แบบป้อนกลับกระแสที่มีการนำเสนอมาก่อน

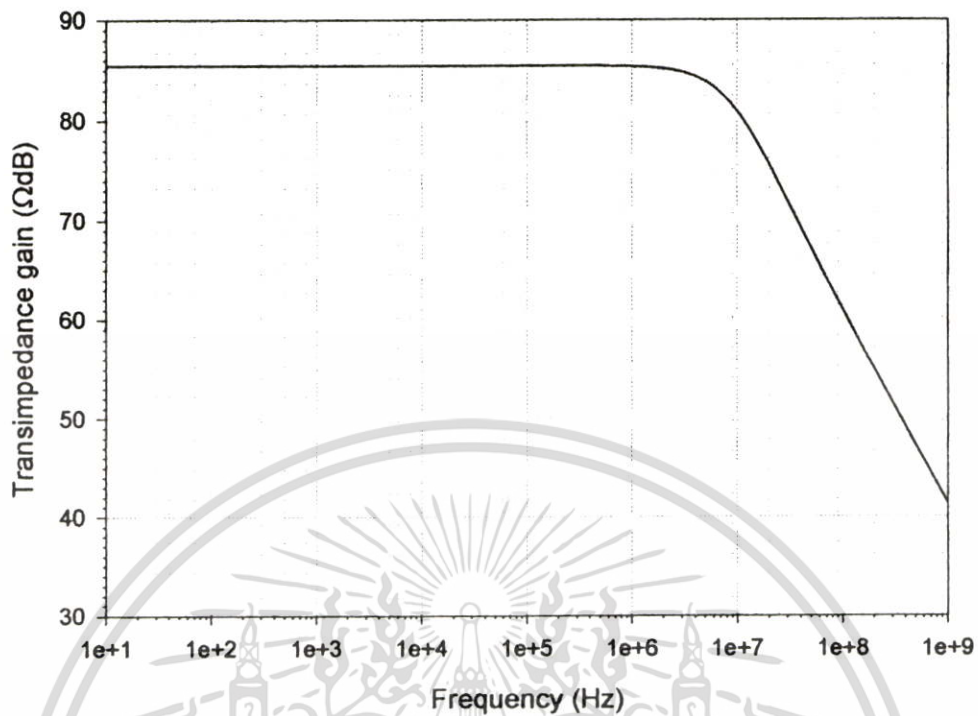
### ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง
แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง	$\pm 1.5$ โวลต์
แหล่งจ่ายกระแส ( $I_B$ )	10 ไมโครแอมป์
แรงดันอ้างอิง ( $V_{HIGH}, V_{LOW}$ )	$\pm 0.5$ โวลต์
ความต้านทานโหลด	250 โอห์ม
ตัวเก็บประจุโหลด	10 พิโคฟารัด
ตัวเก็บประจุชดเชยความถี่	1 พิโคฟารัด
แรงดันเอาต์พุตสวิง	$\pm 1.0$ โวลต์
อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้วลบของวงจร	36.55 $\Omega$ dB
อัตราสัญญาณขึ้น / ลง	395 / 378 โวลต์ต่อไมโครวินาที
อัตราขยายทรานซิมพีแดนซ์ขณะเปิดลูป	86.5 $\Omega$ dB
แบนด์วิดท์ (Bandwidth) @ $R_2 = 2K\Omega$	145.5 เมกกะเฮิรตซ์
กำลังงานสูญเสีย	33.75 มิลลิวัตต์

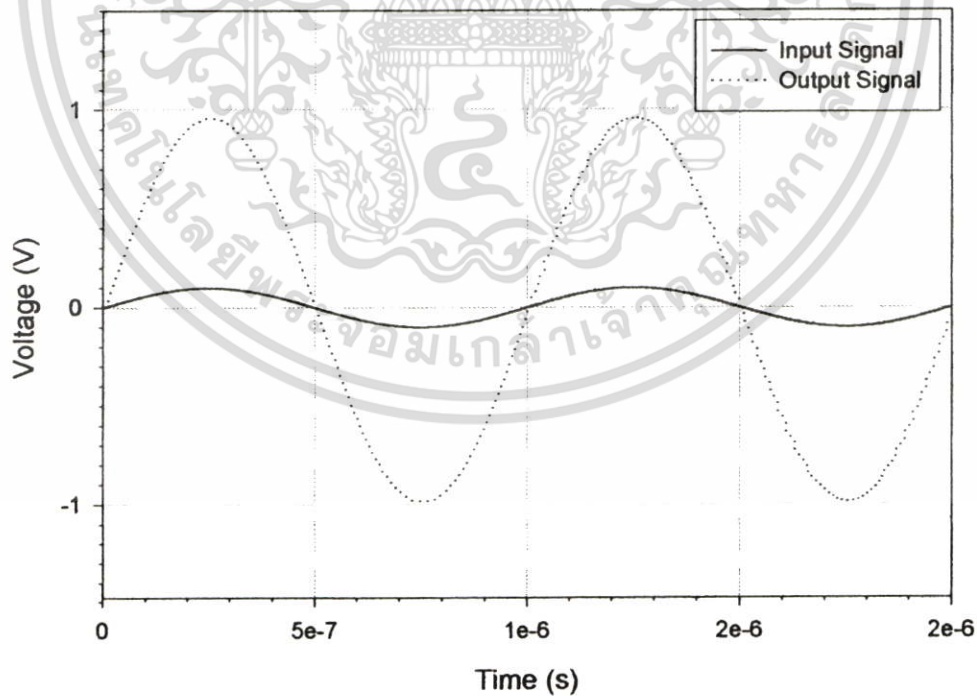


รูปที่ 4.10 ความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

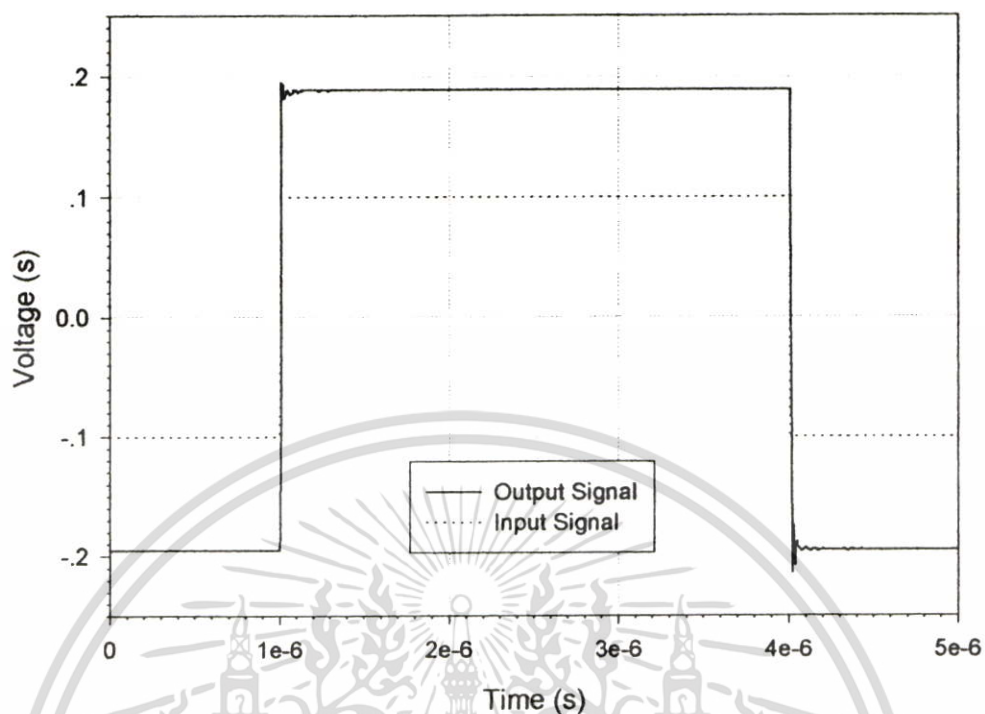


รูปที่ 4.11 อัตรายขยายทรานอิมพีแดนซ์ขณะเปิดคูล์ของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

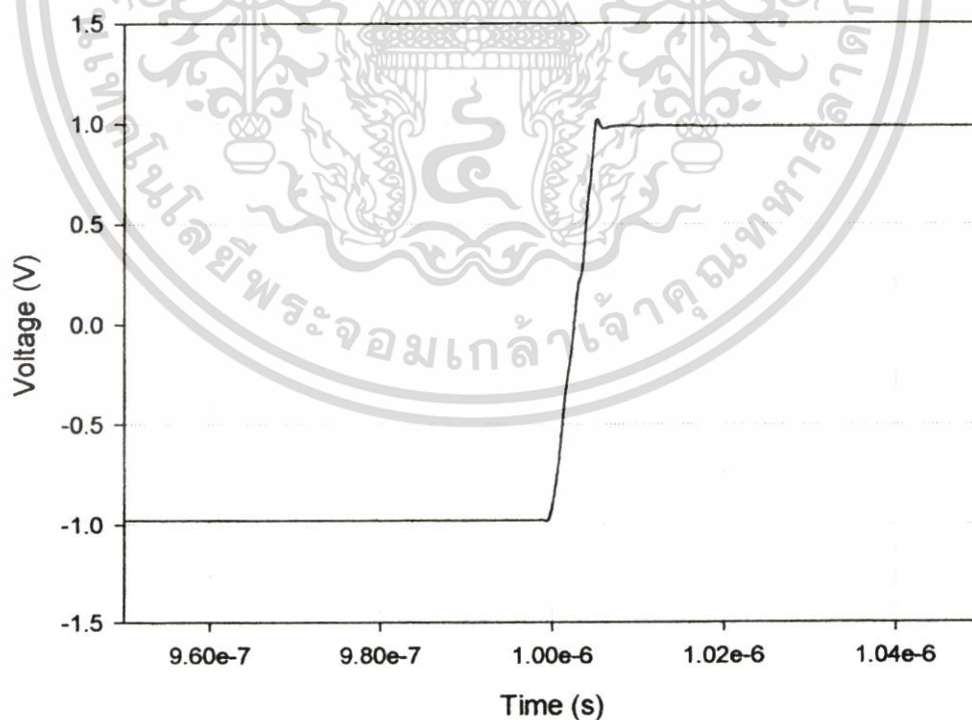


รูปที่ 4.12 การตอบสนองทางเวลาที่อัตรายขยายเท่ากับ 20 dB ของวงจรถ่ายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

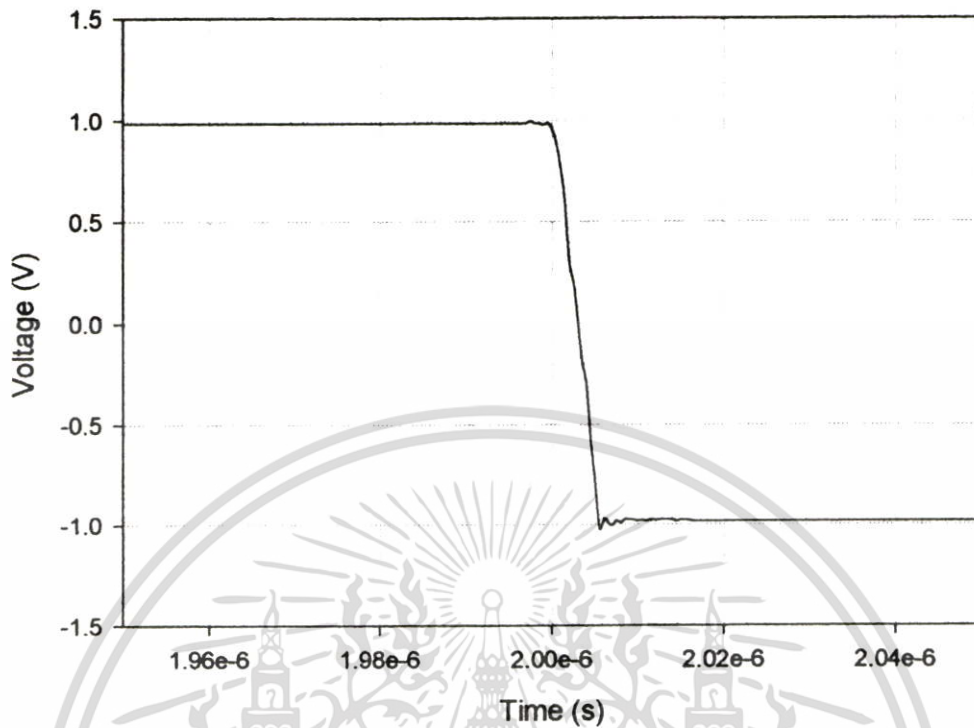


รูปที่ 4.13 การตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันไดอัตราขยายเท่ากับ 2 ของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

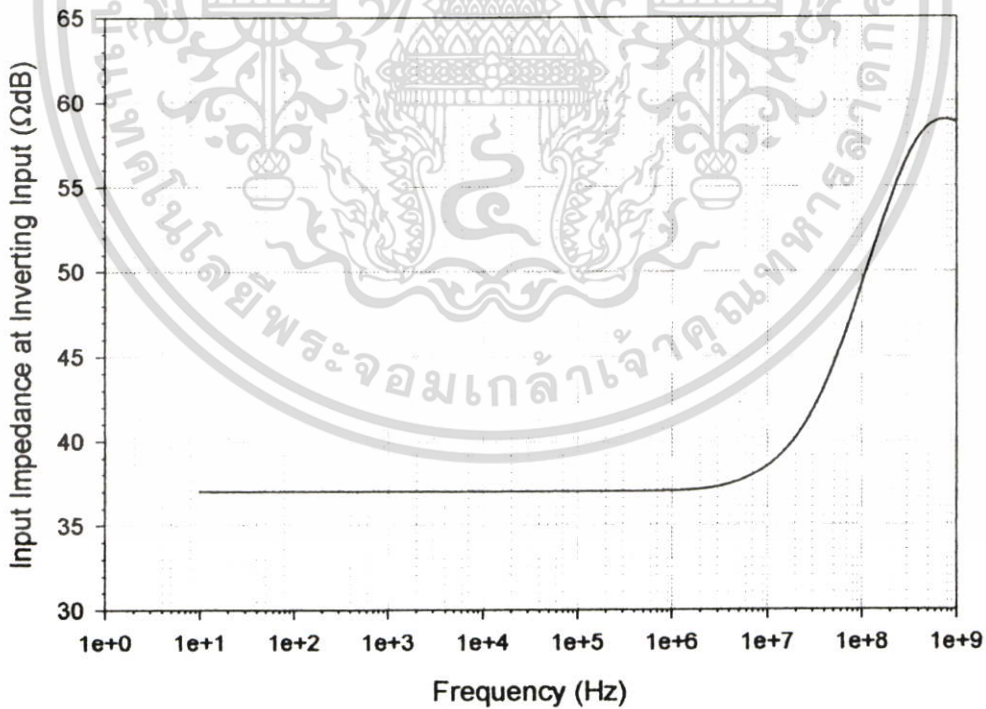


รูปที่ 4.14 อัตราสุงาขึ้นของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 อัตราสเกลของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ



รูปที่ 4.16 แสดงอินพุทอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสัญญาณอินพุทลบ ของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับ  
กระแสที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

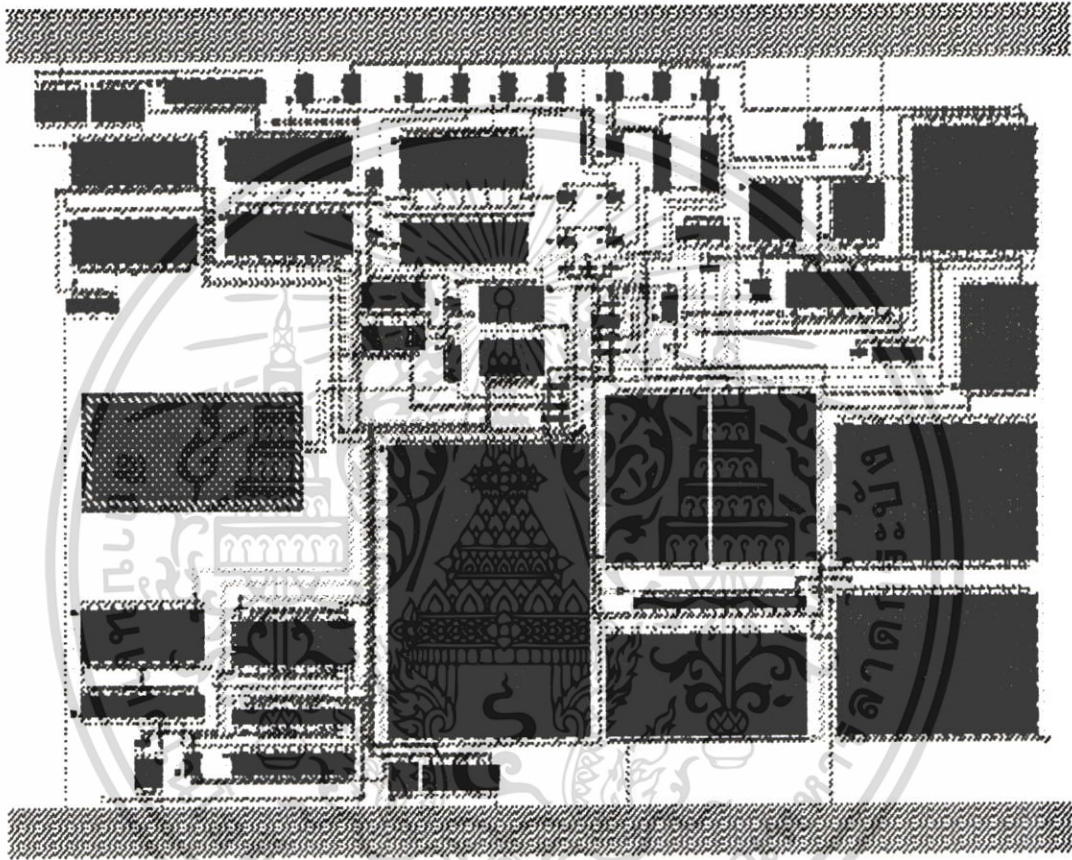
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ และวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอมาก่อน

พารามิเตอร์	วงจรถายนำเสนอ	Manetakis, K [18]	Glustollsi, G. [20]	Kim-Pui, H. [21]
เทคโนโลยี	ซีมอส	ซีมอส	ซีมอส	ซีมอส
แหล่งจ่ายแรงดัน	$\pm 1.5$ โวลต์	5 โวลต์	5 โวลต์	$\pm 2.5$ โวลต์
แรงดันเอาต์พุตสวิง	$\pm 1.0$ โวลต์	-	-	-
โหลด	$250 \Omega // 10 \text{ pF}$	$10 \text{ K}\Omega // 10 \text{ pF}$	$50 \Omega // 30 \text{ pF}$	$50 \Omega // 11 \text{ pF}$
อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้ว ลบของวงจรถาย	$36.55 \Omega_{\text{dB}}$ ( $67.2 \Omega$ )	$75 \Omega$	$2.2 \text{ K}\Omega$	$97.7 \Omega$
อัตราสัญญาณขึ้น / ลง	$395 / 378 \text{ V}/\mu\text{s}$	$130/72 \text{ V}/\mu\text{s}$	$4 \text{ V}/\mu\text{s}$	$55/ 45 \text{ V}/\mu\text{s}$
อัตราขยายทรานซิมพี แดนซ์ขณะเปิดลูป	$86.5 \Omega_{\text{dB}}$	$90 \Omega_{\text{dB}}$	$70 \Omega_{\text{dB}}$	$148 \Omega_{\text{dB}}$
กำลังงานสูญเสีย	33.75 มิลลิวัตต์	5 มิลลิวัตต์	13.5 มิลลิวัตต์	6.5 มิลลิวัตต์

#### 4.4.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสจากการเลย์เอาต์ (Layout)

รูปที่ 4.17 แสดงวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) โดยรวมผลของตัวเก็บประจุแฝง ตารางที่ 4.4 สรุปประสิทธิภาพการทำงานของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout) รูปที่ 4.18 แสดงความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ โดยกำหนดค่าความต้านทานป้อนกลับ ( $R_2$ ) มีค่าคงที่เท่ากับ 10 กิโลโอห์ม จากรูปพบว่าอัตราขยายของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสมีความเป็นอิสระจากแบนด์วิดท์ (Bandwidth) รูปที่ 4.19 แสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ จากรูปพบว่าอัตราขยายของวงจรถายขณะเปิดลูปมีค่าเท่ากับ  $86.5 \Omega_{\text{dB}}$  รูปที่ 4.20 แสดงการตอบสนองทางเวลาของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ ในลักษณะการป้อนกลับแบบลบที่อัตราขยายเท่ากับ 20 dB ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ รูปที่ 4.21 แสดงการตอบสนองความถี่ของสัญญาณแบบขับเคลื่อนได ที่โหลดความต้านทาน 250 โอห์ม ขนานกับตัวเก็บประจุ 10 พิโคฟารัด โดยมีอัตราขยายเท่ากับ 2 รูปที่ 4.22 แสดงอัตราสัญญาณขึ้นของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ จากรูปพบว่าอัตราสัญญาณขึ้นของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 362 โวลต์ต่อไมโครวินาที รูปที่ 4.23

แสดงอัตราสเกลของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ จากรูปพบว่าอัตราสเกลของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 357 โวลต์ต่อไมโครวินาที รูปที่ 4.24 แสดงอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้วอินพุตของวงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับที่นำเสนอ จากรูปพบว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้วอินพุตมีค่าเท่ากับ  $36.55 \Omega$  ภายใต้สภาวะสงบนิ่งวงจรมายที่นำเสนอมีกำลังงานสูญเสียเท่ากับ 33.6 มิลลิวัตต์

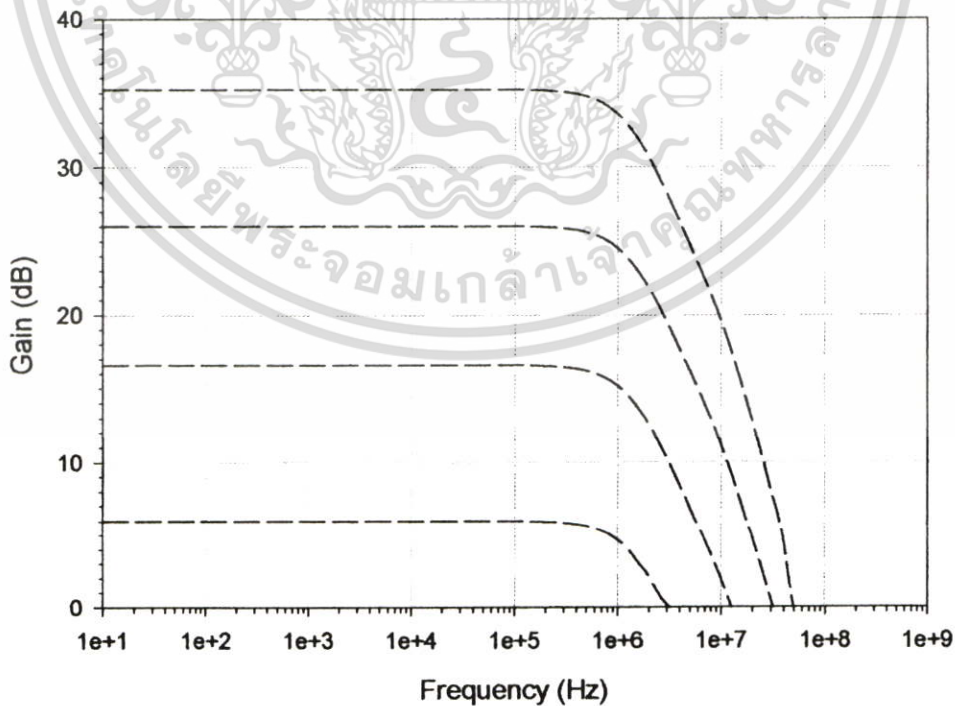


รูปที่ 4.17 วงจรมายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

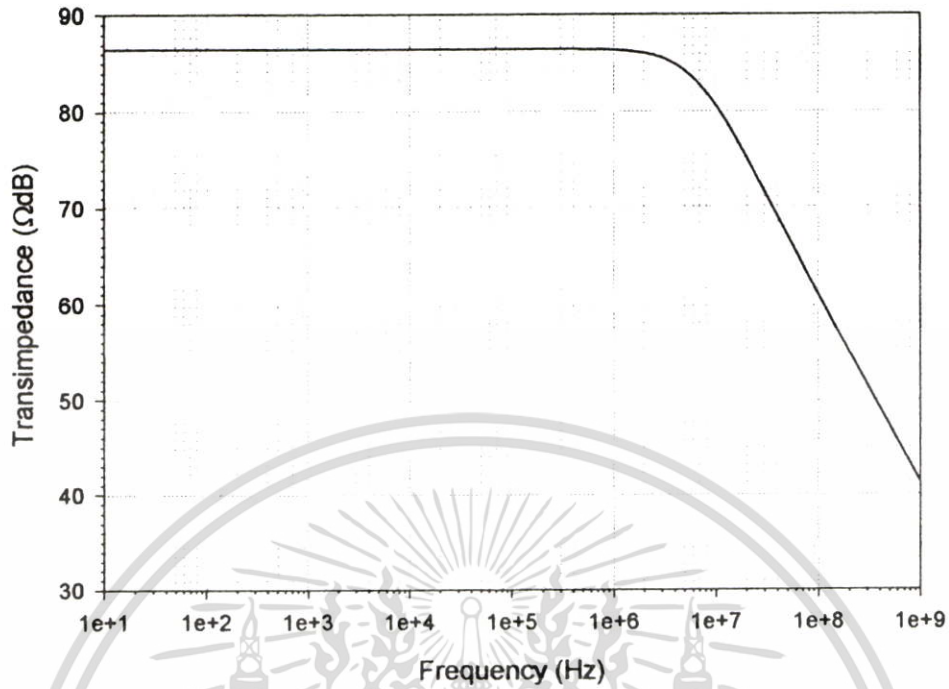
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง
แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง	$\pm 1.5$ โวลต์
แหล่งจ่ายกระแส	10 ไมโครแอมป์
แรงดันอ้างอิง	$\pm 0.5$ โวลต์
ความต้านทานโหลด	250 โอห์ม
ตัวเก็บประจุโหลด	10 พิโคฟาร์ด
ตัวเก็บประจุชดเชยความถี่	1 พิโคฟาร์ด
แรงดันเอาต์พุตสวิง	$\pm 1.0$ โวลต์
อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้วลบของวงจรถ่าย	$36.55 \Omega$
อัตราสัญญาณขึ้น / ลง	362 / 357 โวลต์ต่อไมโครวินาที
อัตราขยายทรานซิมพีแดนซ์ขณะเปิดลูป	$86.5 \Omega$
แบนด์วิดท์ (Bandwidth) @ $R_2 = 2K\Omega$	124.7 เมกะเฮิรต์
กำลังงานสูญเสีย	33.6 มิลลิวัตต์

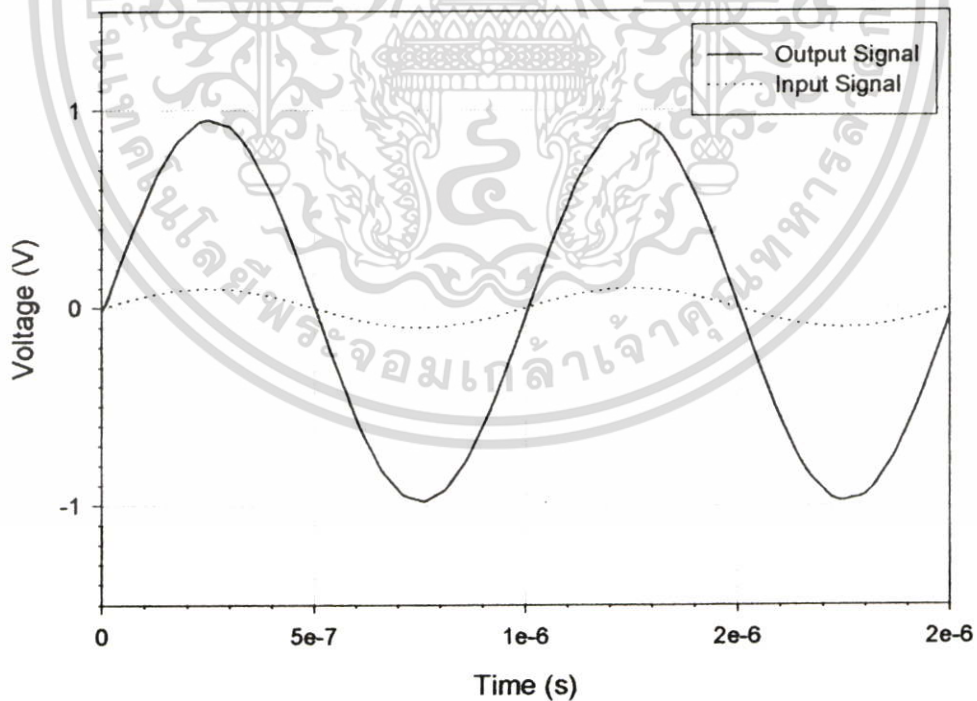


รูปที่ 4.18 ความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยายและแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

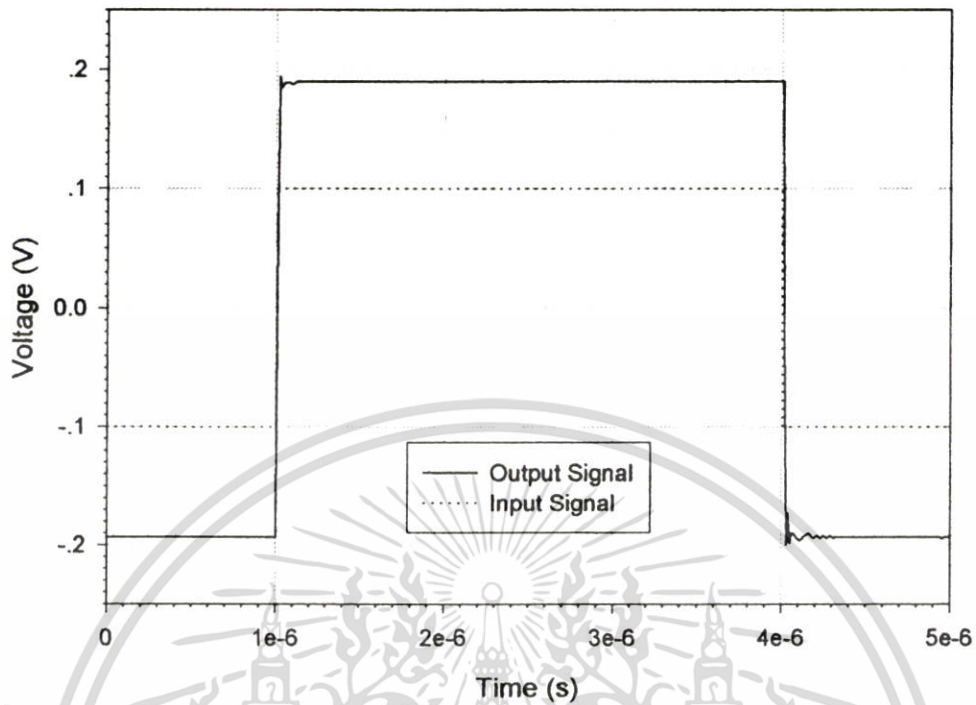


รูปที่ 4.19 อัตรายขยายทรานอิมพีแดนซ์ขณะเปิด-loop ของวงจรมัลติพลายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนองานจากการเลย์เอาต์ (Layout)

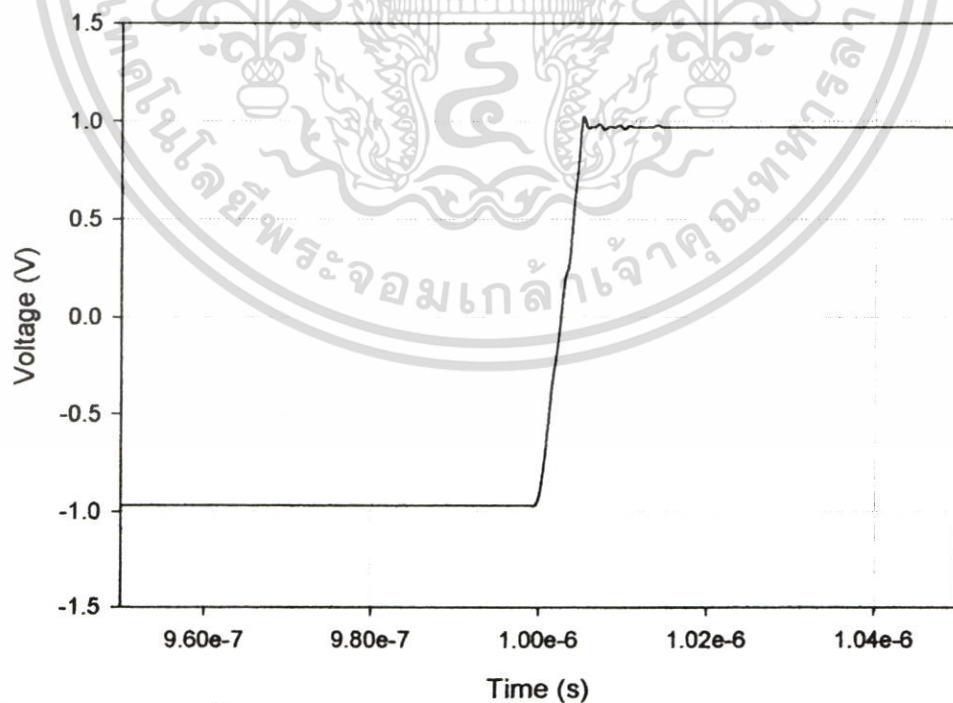


รูปที่ 4.20 การตอบสนองทางเวลาที่อัตรายขยายเท่ากับ 20 dB ของวงจรมัลติพลายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนองานจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

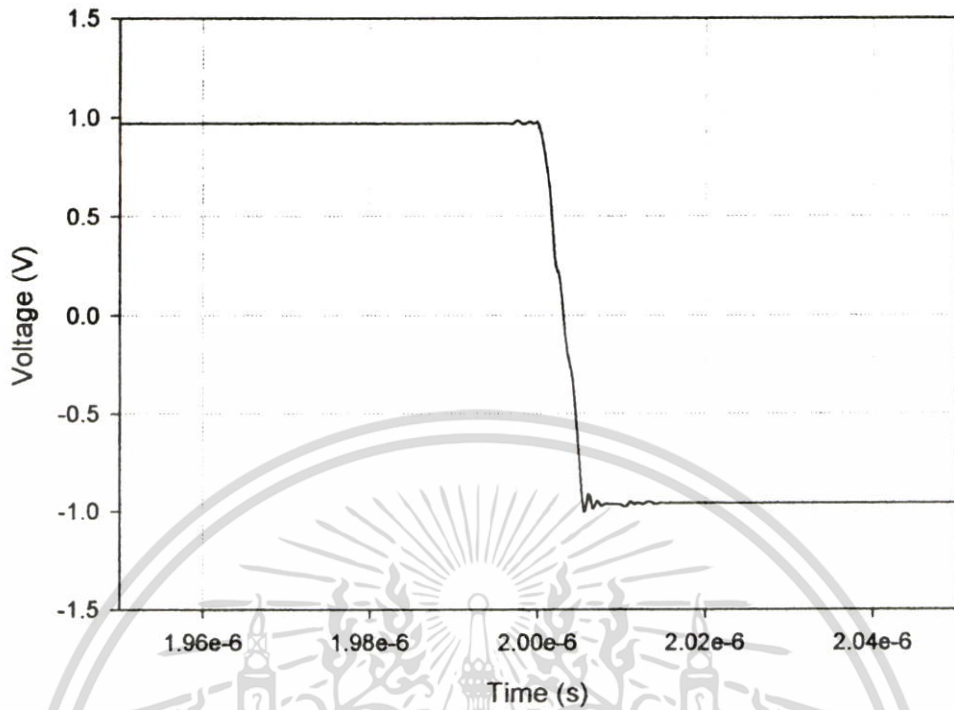


รูปที่ 4.21 การตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันไดอัตราขยายเท่ากับ 2 ของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนองานจากการเลย์เอาต์ (Layout)

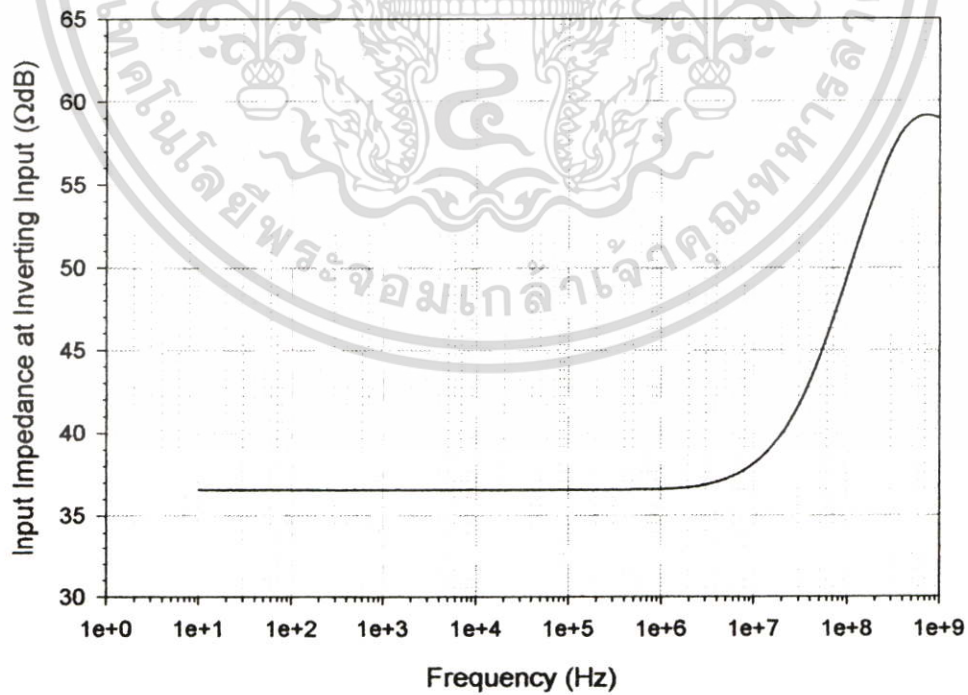


รูปที่ 4.22 อัตราสัญญาณขึ้นของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนองานจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 อัตราสวลงของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนองจากการเลย์เอาต์(Layout)



รูปที่ 4.24 อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสัญญาณอินพุทลบ ของวงจรถยายสัญญาณแบบป้อนกลับ

กระแสที่นำเสนองจากการเลย์เอาต์ (Layout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 บทสรุป

วงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier : CFOA) เป็นวงจรที่มีความสำคัญ และมีการประยุกต์ใช้งานมากวงจรมีหนึ่ง คุณสมบัติที่โดดเด่นของวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสได้แก่ ความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรทำให้สามารถตอบสนองความต้องการทั้งสองอย่างได้ในเวลาเดียวกัน ความโดดเด่นอีกข้อหนึ่งคือการมีอัตราสเถที่สูงทำให้สามารถใช้งานวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่ความถี่สูงได้โดยมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ

ในบทนี้ได้นำเสนอวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส วงจรที่นำเสนออาศัยโครงสร้างของวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสพื้นฐานซึ่งประกอบด้วยวงจรมตามแรงดันฝั่งอินพุต วงจรสะท้อนกระแส และวงจรมตามแรงดันฝั่งเอาต์พุต วงจรมตามแรงดันฝั่งอินพุต และฝั่งเอาต์พุตจะอาศัยหลักการทำงานของวงจรมตามแรงดันที่นำเสนอในบทที่แ่้วมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งทำให้วงจรมตามแรงดันทั้งสองมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเกิดจากความไม่เท่ากันของแรงดันเกต ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดที่ต่ำ เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมตามแรงดันทั้งสองมีค่าต่ำ และมีช่วงการสวิงของสัญญาณกว้าง วงจรสะท้อนกระแสที่ใช้ในวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอจะมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรที่สูง ทำให้อัตราขยายทรานอิมพีแดนซ์ของวงจรมมีค่าสูง จากการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสพบว่าวงจรมที่นำเสนอมีความเป็นอิสระระหว่างอัตราขยาย และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) อัตราสเถของวงจรมมีค่าสูง และมีช่วงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุตกว้าง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวงจรตามแรงดันแบบซิมอสที่มีช่วงปฏิบัติงานกว้าง และการประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส วงจรที่นำเสนอทั้งสองสามารถทำงานภายใต้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง  $\pm 1.5$  โวลต์ โดยมีกำลังงานสูญเสียต่ำ

การทำงานของวงจรตามแรงดันที่นำเสนออาศัยหลักการเบื้องต้นของวงจรตามแรงดันแบบคลาสเอบีพื้นฐาน วงจรตามแรงดันที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหาทั้งสามประการของวงจรตามแรงดันแบบพื้นฐาน ได้แก่ ความไม่เท่ากันของแรงดันระหว่างขาเกต และขาซอสของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิดเอ็น และชนิดพี ประการที่สองค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าไม่ต่ำมาก และประการที่สามขีดจำกัดในการสวิงของสัญญาณเอาต์พุต ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอพบว่า วงจรที่นำเสนอมีการสวิงของสัญญาณเอาต์พุตอยู่ในช่วง  $\pm 1.25$  โวลต์ ที่ความต้านทานโหลด 250 โอห์ม ช่วงแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการทำงานกว้าง เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณและกำลังงานสูญเสียมีค่าต่ำ จากประสิทธิภาพของวงจรตามแรงดันที่นำเสนอพบว่า วงจรตามแรงดันที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรอื่น ๆ ได้อีกมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้งานเป็นภาคเอาต์พุตของวงจรขยาย จากการที่มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่ต่ำจึงทำให้สามารถขับ โหลดที่มีขนาดเล็กได้โดยไม่มีผลผิดเพี้ยนของสัญญาณ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำวงจรตามแรงดันที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนออาศัยโครงสร้างพื้นฐานของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบสามส่วน ได้แก่ วงจรตามแรงดันฝั่งอินพุตซึ่งต่ออยู่ระหว่างขั้วอินพุตบวกและขั้วอินพุตลบของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแส ส่วนที่สองได้แก่วงจรสะท้อนกระแสทำหน้าที่คัดลอกกระแสจากขั้วอินพุตลบและสะท้อนไปสู่โหนด  $X$  ซึ่งเป็นโหนดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง วงจรสะท้อนกระแสที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นวงจรสะท้อนกระแสที่มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง ทำให้อัตราขยายทรานอิมพีแดนซ์ (Transimpedance) ของวงจรมีค่าสูง โดยมีค่าประมาณ  $85 \Omega dB$  ส่วนที่สามได้แก่วงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุตจะทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันจากโหนด  $X$  ไปสู่เอาต์พุต ของวงจร วงจรตามแรงดันฝั่งเอาต์พุตเป็นวงจรที่มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ และมีช่วงการสวิงของสัญญาณเอาต์พุตกว้าง ทำให้วงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอสามารถขับ โหลดที่มีขนาดเล็กได้โดยไม่มีผลผิดเพี้ยนของสัญญาณ จากการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอพบว่าอัตราส่วนของวงจรมีค่าสูง ดังนั้นวงจรจึงสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ และสามารถกำหนดอัตราขยายของวงจรได้อย่างอิสระ โดยไม่ขึ้นกับแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจร

จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าวงจรตามแรงดัน และวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอ มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงจึงสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวงจรอื่นได้อย่างมากมายโดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรที่ใช้ร่วมกันลดลง วงจรที่นำเสนอทั้งสองจึงเป็นวงจรที่น่าสนใจและนำศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Sedra, A.S. and Smith, K.C. 1991. **Microelectronic Circuit**. Third Edition. New York: Oxford.
- [2] Gray, P.R. and Meyer, R.G. **Analysis and Design of Analog Integrated Circuits**. Forth Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Johns, D. and Martin, K. 1997. **Analog Integrated Circuit Design**. John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Razavi, B. 2000. **Design of Analog CMOS Integrated Circuits**. International Edition. New York: McGraw-Hill.
- [5] Ahuja, B.K., Gray, P.R., Baxter, W.M., and Uehara, G.T. 1984. "A Programmable CMOS Dual Channel Interface Processor for Telecommunications Applications," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-19, pp. 892-899.
- [6] Brehmer, K.E. and Wieser J.B. 1983. "Large Swing CMOS Power Amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-18, pp. 624-629.
- [7] Fisher J.A. 1985. "A High Performance CMOS Power Amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.* Vol. SC-20, pp. 1200-1205.
- [8] Nagaraj, K. 1989. "Large-Swing CMOS Buffer Amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-24, pp.181-183.
- [9] Mistlberger, F. and Kock, R. 1992. "Class AB High swing CMOS power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-27, pp. 1089-1092.
- [10] Sekerkiran, B. 1999. "A Compact Rail-to-Rail Output Stage for CMOS Operation Amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-34, pp. 107-110.
- [11] Kadanka, P. and Rozsypal, A. 2000. "Rail-to Rail Voltage Follower Without Feedback," *Electronics Letters*, Vol. 36, pp. 104-105.
- [12] Manetakis, K. and Toumazou, C. 1996. "A New High-Frequency Very Low Output-Impedance CMOS Buffer," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems* , Vol. 1, pp. 485-488.
- [13] Joongsik, K., Byungsoo, C., Deog-Kyoon, J. and Wonchan, K. 1993. "Class-AB Large-Swing CMOS Buffer Amplifier with Controlled Bias Current," *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, Vol. 28, pp. 1350-1353.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Boonyaporn, P., Kasemsuwan, V. 2002. "A Compact Rail to Rail CMOS Voltage Follower," The 2002 International Technical Conference on Circuit/System, Computers and Communications, pp. 82-85.
- [15] Boonyaporn, P., Kasemsuwan, V. 2002. "A High Performance Class AB CMOS Rail to Rail Voltage Follower," 2002 IEEE Asia-Pacific Conference on ASIC Proceedings, pp. 161-163.
- [16] Palumbo, G., Pennisi, S. 2001. "Current Feedback Amplifiers Versus Voltage Operational Amplifiers," IEEE Trans. Circuit Syst. I, Vol. 48, pp. 617-623.
- [17] Lidgey, F.J., Hayatleh, K. 1997. "Current-Feedback Operational Amplifiers and Applications," Electronic & Communication Engineering Journal, pp. 176-182.
- [18] Manetakis, K., Toumazou, C., Papavassiliou, C. 1998. "A 120MHz, 12mW CMOS Current Feedback Op-Amp," IEEE 1998 Custom Integrated Circuits Conference, pp. 365-368.
- [19] Manetakis, K. and Toumazou, C. 1996. "Current-Feedback Op-Amp Suitable for CMOS VLSI Technology," Electronics Letters, Vol. 32, No. 12, pp. 1090-1092.
- [20] Giustolisi, G., Palmosano, G., Palumbo, G., Pennisi, S. 1997. "High-Drive CMOS Current-Feedback Op-Amp," IEEE, pp.229-232.
- [21] Kim-Pui, H., Cheong-Fat, C., Chiu-Sing, C., Kong-Pang, P. 2002. "A CMOS Current Feedback Operational Amplifier with Active Current Mode Compensation," IEEE, pp. I-709-712.
- [22] Boonyaporn, P., Nakhlo, W., Vicienchom, K., Kasemsuwan, V., Ahn, H. K. 2005. "A Rail to Rail CMOS Current Feedback Operational Amplifier," The Second ECTI Annual Conference 2005, pp. 161-163.
- [23] Mahattanakul J. and Toumazou, C. 1996. "A Theoretical Study of The Stability of High Frequency Current Feedback Op-Amp Integrators," IEEE Transactions on Circuit and Systems, Vol. 43, No.1, pp. 2-12.
- [24] Likittanapong, P., Worapishet, A., Toumazou, C. 1998. "Linear CMOS Triode Transconductor for Low-Voltage Applications," Electronics Letters, Vol. 34, No.12, pp.1224-1225.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ผลการจำลองการทำงานวงจรตามสัปดาห์ที่นำเสนอด้วยโปรแกรม HSPICE

```

1 ***** Star-HSPICE -- 2001.4 (20011215) 12:37:27 03/06/2005 pcnt
*****
***** buffer level 49 *****
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000
*****
***** operating point status is all simulation time is 0.
node =voltage node =voltage node =voltage
+0:3 =-602.9385m 0:4 = 692.4999m 0:5 = 943.8955m
+0:6 = -1.0308 0:7 = 1.0358 0:8 =-922.8843m
+0:ao =-897.5364m 0:bc2 =-921.3323m 0:bc3 = 289.3338m
+0:bc4 = 301.2566m 0:bc5 = 1.4934 0:co = 818.2779m
+0:cs1 =-463.6339m 0:cs10 = 1.2913 0:cs11 = -1.2866
+0:cs12 = 1.2857 0:cs13 = -1.2865 0:cs14 = 1.2849
+0:cs2 = 464.7673m 0:cs9 = -1.2957 0:csb1 =-289.0568m
+0:csb2 = 291.0641m 0:g10 = 493.6867m 0:g9 =-492.2235m
+0:vdd = 1.5000 0:vin = 0. 0:vo = 8.1302m
+0:vss = -1.5000

**** voltage sources

subckt
element 0:vdd 0:vss 0:vin
volts 1.5000 -1.5000 0.
current -2.7761m 2.7761m 0.
power 4.1642m 4.1642m 0.

total voltage source power dissipation= 8.3284m watts

**** resistors

subckt
element 0:rb
r value 650.0000
v drop 6.6338m
current 10.2058u
power 67.7029n

**** mosfets

subckt
element 0:m1 0:m2 0:m9 0:m3 0:m4 0:m5
model 0:nmos 0:nmos 0:nmos 0:pmos 0:pmos 0:pmos
region Saturati Saturati Cutoff Saturati Saturati Saturati
id 151.0076u 140.0038u 26.7976n -2.2447m -2.2447m -80.2675u
ibs 0. 0. 0. 0. 0. 0.
ibd 0. 0. 0. 0. 0. 0.
vgs 897.5364m 897.0615m 405.3129m -905.6667m -897.0615m -818.2779m
vds 2.3975 602.4636m 1.8414 -611.0687m -897.0615m -2.3183
vbs 0. 0. 0. 0. 0. 0.
vth 661.6556m 662.4205m 661.8925m -569.9892m -565.1562m -637.5766m
vdsat 204.0238m 203.1967m 37.7932m -300.6825m -297.7558m -172.8955m
beta 5.5518m 5.5515m 5.7712m 44.0896m 44.1909m 4.8349m
gam eff 636.6611m 636.6611m 636.6611m 684.9772m 684.9772m 684.9772m
gm 1.0691m 1.0127m 729.7681n 11.8642m 12.0186m 737.9765u
gds 4.9470u 9.7102u 2.9967n 375.4137u 347.8101u 1.9881u
gmb 344.0049u 326.3227u 256.1167n 3.2370m 3.2593m 261.4939u
cdtot 4.8313f 4.8313f 4.8447f 69.3231f 69.3231f 16.4977f
cgtot 104.7240f 104.7213f 43.2374f 840.8518f 840.8497f 355.0255f
cstot 67.5620f 67.5873f 4.8823f 517.3258f 516.5821f 233.9149f
cbtot 34.3617f 34.3648f 33.5149f 252.7891f 253.1162f 125.4166f
cgs 91.4936f 91.5333f 4.8950f 684.9227f 683.3505f 309.1602f
cgd 4.8172f 4.8172f 4.8447f 65.3474f 65.3534f 16.4097f

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:m6	0:m10	0:m7	0:m8	0:m11	0:m12
model	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Cutoff	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff
id	-68.9825u	-2.5963n	2.4254m	2.4254m	-26.8001n	-419.7817n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-807.5001m	-324.5912m	810.1477m	807.5001m	-556.1045m	-556.1045m
vds	-681.7221m	-1.8491	684.3697m	807.5001m	-556.1045m	-2.4229
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-638.9289m	-637.9643m	596.1539m	595.3165m	-658.7415m	-639.9198m
vdsat	-164.2840m	-37.8655m	187.6446m	186.5111m	-42.5347m	-45.0532m
beta	4.8422m	4.9900m	106.7631m	106.8237m	184.7544u	1.7887m
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m
gm	666.6333u	76.1317n	18.2124m	18.3023m	623.1586n	9.4580u
gds	2.7216u	118.0773p	410.4402u	377.6132u	1.3606n	16.0620n
gmb	236.6049u	29.4505n	4.2241m	4.2342m	227.6407n	3.4401u
cdtot	16.4979f	16.5856f	43.2285f	43.2286f	6.192e-16	5.9573f
cgtot	354.6145f	154.6605f	513.3415f	513.3122f	6.1100f	58.0415f
cstot	233.6000f	16.6041f	304.6140f	304.4538f	9.821e-16	11.8856f
cbtot	125.5361f	121.4710f	145.1796f	145.2142f	4.5606f	41.0024f
cgs	308.6182f	16.6129f	409.8352f	409.5394f	1.0969f	13.7666f
cgd	16.4100f	16.5856f	42.1998f	42.2003f	6.190e-16	5.9551f

subckt element	0:m13	0:m14	0:m15	0:m16	0:m17	0:m18
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	419.7853n	202.0057u	2.5991n	41.0401n	-41.0443n	-21.3432u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	577.1157m	577.1157m	469.1957m	469.1957m	-464.2110m	-464.2110m
vds	577.1157m	1.5081	469.1957m	2.5358	-464.2110m	-1.4919
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	669.3130m	590.4181m	681.6809m	668.4783m	-641.5382m	-554.9214m
vdsat	44.3927m	64.1602m	37.2498m	38.1246m	-38.6910m	-46.5755m
beta	1.8190m	134.3859m	205.5868u	1.8222m	1.7904m	99.1943m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m
gm	9.0817u	3.6103m	67.7048n	1.0497u	1.0749u	487.5460u
gds	52.0500n	56.4582u	366.8104p	4.2666n	2.2637n	9.2324u
gmb	3.0455u	864.2451u	23.4118n	361.1659n	398.9027n	138.6698u
cdtot	1.5329f	53.3787f	1.737e-16	1.5332f	5.9595f	154.1023f
cgtot	14.5877f	416.0681f	1.8574f	13.7360f	53.9914f	874.6183f
cstot	2.8310f	183.0852f	1.786e-16	1.5955f	6.3483f	212.2514f
cbtot	10.3303f	172.8503f	1.5056f	10.6147f	41.7493f	511.4961f
cgs	3.2864f	233.0258f	1.802e-16	1.6160f	6.4646f	231.5444f
cgd	1.5327f	52.8884f	1.737e-16	1.5332f	5.9593f	153.6199f

subckt element	0:mbc1	0:mbc2	0:mbc3	0:mbc4	0:mbc5	0:mbc6
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-9.9653u	-10.2058u	-9.9653u	-10.2058u	9.9653u	10.2058u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.2107	-1.2040	-1.2107	-1.2226	1.0364	1.0364
vds	-1.2107	-1.1921	-1.2107	-764.8905m	578.6677m	1.0364
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-665.6956m	-665.2771m	-665.6956m	-666.0639m	681.6342m	681.4392m
vdsat	-438.3809m	-433.9801m	-438.3809m	-446.9769m	277.2469m	277.3721m
beta	82.2185u	86.0603u	82.2185u	82.0570u	194.1547u	194.1607u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	33.1893u	34.3838u	33.1893u	33.1895u	49.0614u	50.3214u
gds	302.7684n	312.2922n	302.7684n	421.1577n	806.5087n	384.1910n
gmb	11.3923u	11.8092u	11.3923u	11.3652u	15.6499u	16.0292u
cdtot	3.007e-16	3.144e-16	3.007e-16	3.007e-16	1.733e-16	1.733e-16
cgtot	6.8318f	7.1270f	6.8318f	6.8318f	4.1005f	4.1005f
cstot	4.2816f	4.4766f	4.2816f	4.2821f	2.4269f	2.4266f
cbtot	2.5059f	2.6070f	2.5059f	2.5026f	1.5315f	1.5315f
cgs	5.7852f	6.0458f	5.7852f	5.7894f	3.3306f	3.3302f
cgd	2.990e-16	3.127e-16	2.990e-16	2.990e-16	1.727e-16	1.727e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:mbc7	0:mbc8	0:mbc9	0:mbc10	0:mbc11	0:mbc12
model	0:pmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-10.4948u	10.4948u	-11.2876u	-11.2876u	11.0306u	11.0306u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0352	1.0364	-1.0352	-1.0003	1.0066	1.0364
vds	-1.0352	1.9648	-208.6621m	-473.0600m	398.1544m	204.3092m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-658.3455m	681.0435m	-656.2993m	-656.0808m	680.7923m	680.8750m
vdsat	-315.7282m	277.6261m	-317.6854m	-291.8559m	259.0824m	278.3756m
beta	173.5258u	194.1728u	223.8472u	225.1515u	254.8277u	253.6363u
gam eff	684.9772m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	50.3942u	51.3320u	41.5154u	58.9281u	58.4243u	43.9547u
gds	337.5123n	274.6479n	27.6739u	692.9103n	1.9032u	24.4948u
gmb	17.5718u	16.3372u	15.2518u	20.5937u	18.7061u	14.5784u
cdtot	6.160e-16	1.733e-16	2.5968f	7.944e-16	2.263e-16	2.749e-16
cgtot	13.6298f	4.1005f	18.2369f	17.4746f	5.2506f	5.2710f
cstot	8.7724f	2.4261f	11.1819f	11.3139f	3.1700f	3.1669f
cbtot	4.8880f	1.5315f	6.3663f	6.2323f	1.9042f	1.9026f
cgs	11.7321f	3.3293f	14.7676f	15.1009f	4.3413f	4.3379f
cgd	6.127e-16	1.727e-16	2.1320f	7.901e-16	2.256e-16	2.608e-16

subckt element	0:mv1	0:mv2	0:mv3	0:mv4	0:mv5	0:mv6
model	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-11.2319u	-11.2319u	11.2319u	-11.2427u	11.2427u	11.2427u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0352	-994.6857m	1.0078	-1.0063	997.5470m	1.0364
vds	-214.2502m	-1.7780	1.0078	-1.0063	1.7803	213.3962m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-656.4794m	-655.1873m	680.6447m	-656.2058m	680.2034m	680.8711m
vdsat	-317.5246m	-288.3456m	259.8538m	-296.1722m	253.5320m	278.3780m
beta	219.9740u	221.5000u	247.2540u	213.2662u	255.2164u	253.6365u
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	41.8272u	59.7225u	59.9335u	57.9774u	61.3731u	45.6487u
gds	25.8366u	279.8512n	443.0384n	366.1118n	327.1073n	22.2224u
gmb	15.3241u	20.9001u	19.1312u	20.2644u	19.5961u	15.0816u
cdtot	1.7902f	7.807e-16	2.196e-16	7.532e-16	2.263e-16	2.263e-16
cgtot	17.6074f	17.1787f	5.1056f	16.5873f	5.2505f	5.2508f
cstot	11.0504f	11.1147f	3.0758f	10.7262f	3.1689f	3.1702f
cbtot	6.1943f	6.1348f	1.8575f	5.9226f	1.9059f	1.8986f
cgs	14.6738f	14.8298f	4.2128f	14.3209f	4.3378f	4.3473f
cgd	1.5213f	7.765e-16	2.190e-16	7.492e-16	2.256e-16	2.256e-16

subckt element	0:mv7	0:mv8	0:mv9	0:mv10	0:mv11	0:mv12
model	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-22.7608u	-22.7608u	22.7608u	-21.7194u	21.7194u	21.7194u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0352	-993.8345m	1.2109	-1.2089	997.4841m	1.0364
vds	-215.1014m	-1.5740	1.2109	-1.2089	1.5776	213.4591m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-649.8559m	-648.7331m	681.0610m	-657.8467m	677.3136m	677.8950m
vdsat	-323.2354m	-293.2140m	389.0364m	-445.7672m	256.8702m	281.9365m
beta	433.1442u	436.2019u	207.6406u	174.3453u	485.1452u	482.1418u
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	82.7441u	119.1071u	74.9652u	71.5128u	117.7670u	86.9409u
gds	53.1853u	602.7671n	676.3178n	661.2548n	658.4064n	43.8714u
gmb	30.3636u	41.6688u	23.4361u	24.5395u	37.5694u	28.7120u
cdtot	4.4122f	1.5355f	1.904e-16	6.366e-16	4.300e-16	4.300e-16
cgtot	34.6740f	33.4497f	4.4714f	14.0735f	9.6615f	9.6619f
cstot	21.6659f	21.8627f	2.6661f	9.0651f	6.0210f	6.0232f
cbtot	11.9381f	11.7438f	1.6219f	4.9389f	3.3231f	3.3093f
cgs	28.6620f	29.1537f	3.6857f	12.2241f	8.2254f	8.2429f
cgd	3.6662f	1.5273f	1.898e-16	6.332e-16	4.287e-16	4.287e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



subckt element	0:m13	0:m14	0:m15	0:m16	0:m17	0:m18
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-235.2880p	235.2880p	-235.2880p	235.2880p	3.5857n	-3.5857n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-302.6070m	1.5671	-302.6070m	1.5671	0.	-433.1707m
vds	-1.8697	1.8697	-1.8697	1.8697	433.1707m	-433.1707m
vbs	0.	1.8697	0.	1.8697	433.1707m	0.
vth	-642.9961m	-642.9961m	-642.9961m	-642.9961m	-649.8731m	-649.8731m
vdsat	-37.8190m	-37.8190m	-37.8190m	-37.8190m	-38.0591m	-38.0591m
beta	1.0024m	1.0024m	1.0024m	1.0024m	452.1371u	452.1371u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	6.9526n	6.9526n	6.9526n	6.9526n	98.6525n	98.6525n
gds	10.6914p	10.6914p	10.6914p	10.6914p	204.3986p	204.3986p
gmb	2.7145n	2.7145n	2.7145n	2.7145n	37.0165n	37.0165n
cdtot	3.3376f	3.3393f	3.3376f	3.3393f	1.5396f	1.5092f
cgtot	31.6484f	31.6484f	31.6484f	31.6484f	14.0057f	14.0057f
cbtot	3.3393f	3.3376f	3.3393f	3.3376f	1.5092f	1.5396f
cbtot	24.9710f	24.9710f	24.9710f	24.9710f	10.9622f	10.9622f
cgs	3.3405f	3.3376f	3.3405f	3.3376f	1.5092f	1.5487f
cgd	3.3376f	3.3405f	3.3376f	3.3405f	1.5487f	1.5092f

subckt element	0:m19	0:m20	0:m21	0:m22	0:m23	0:m24
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	3.5857n	-3.5857n	-10.9910u	-10.9910u	25.1369u	-25.1369u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	-433.1707m	-990.5571m	-1.0374	882.5100m	-1.5000
vds	433.1707m	-433.1707m	-1.7940	-202.2326m	2.3825	-2.3825
vbs	433.1707m	0.	0.	0.	0.	-2.3825
vth	-649.8731m	-649.8731m	-655.1740m	-656.4893m	671.7049m	671.7049m
vdsat	-38.0591m	-38.0591m	-285.2910m	-319.1461m	185.9943m	185.9943m
beta	452.1371u	452.1371u	221.6521u	219.8943u	1.1257m	1.1257m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	98.6525n	98.6525n	59.1276u	39.5926u	195.2800u	195.2800u
gds	204.3986p	204.3986p	272.9458n	29.0984u	886.1460n	886.1460n
gmb	37.0165n	37.0165n	20.6990u	14.5994u	62.9967u	62.9967u
cdtot	1.5396f	1.5092f	7.807e-16	3.4503f	9.789e-16	13.6775f
cgtot	14.0057f	14.0057f	17.1787f	18.3016f	21.5060f	21.5060f
cbtot	1.5092f	1.5396f	11.1146f	10.9030f	13.6775f	9.789e-16
cbtot	10.9622f	10.9622f	6.1377f	6.3412f	7.2366f	7.2366f
cgs	1.5092f	1.5487f	14.8267f	14.3046f	18.5494f	9.760e-16
cgd	1.5487f	1.5092f	7.765e-16	2.7858f	9.760e-16	18.5494f

subckt element	0:m25	0:m26	0:m27	0:m28	0:m29	0:m30
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	25.1369u	-25.1369u	25.1369u	-2.4174n	2.4174n	-2.4174n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	882.5100m	-1.5000	882.5100m	-1.4733	386.2767m	-1.4733
vds	2.3825	-2.3825	2.3825	-1.8596	1.8596	-1.8596
vbs	0.	-2.3825	0.	-1.8596	0.	-1.8596
vth	671.7049m	671.7049m	671.7049m	671.9278m	671.9278m	671.9278m
vdsat	185.9943m	185.9943m	185.9943m	37.4438m	37.4438m	37.4438m
beta	1.1257m	1.1257m	1.1257m	1.1654m	1.1654m	1.1654m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	195.2800u	195.2800u	195.2800u	67.1803n	67.1803n	67.1803n
gds	886.1460n	886.1460n	886.1460n	270.0912p	270.0912p	270.0912p
gmb	62.9967u	62.9967u	62.9967u	23.8531n	23.8531n	23.8531n
cdtot	9.789e-16	13.6775f	9.789e-16	9.849e-16	9.816e-16	9.849e-16
cgtot	21.5060f	21.5060f	21.5060f	9.1017f	9.1017f	9.1017f
cbtot	13.6775f	9.789e-16	13.6775f	9.816e-16	9.849e-16	9.816e-16
cbtot	7.2366f	7.2366f	7.2366f	7.1355f	7.1355f	7.1355f
cgs	18.5494f	9.760e-16	18.5494f	9.816e-16	9.861e-16	9.816e-16
cgd	9.760e-16	18.5494f	9.760e-16	9.861e-16	9.816e-16	9.861e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:m31	0:m33	0:m34	0:m35	0:m36	0:m37
model	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	2.4174n	40.2439n	-40.2439n	40.2439n	-40.2439n	-12.1046n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	386.2767m	1.9346	-522.9193m	1.9346	-522.9193m	-522.9193m
vds	1.8596	2.4575	-2.4575	2.4575	-2.4575	-522.9193m
vbs	0.	2.4575	0.	2.4575	0.	0.
vth	671.9278m	-648.2004m	-648.2004m	-648.2004m	-648.2004m	-658.7689m
vdsat	37.4438m	-40.7738m	-40.7738m	-40.7738m	-40.7738m	-39.9819m
beta	1.1654m	452.1097u	452.1097u	452.1097u	452.1097u	184.8653u
gam eff	636.6611m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	67.1803n	971.1791n	971.1791n	971.1791n	971.1791n	297.2625n
gds	270.0912p	1.6016n	1.6016n	1.6016n	1.6016n	634.6659p
gmb	23.8531n	355.6313n	355.6313n	355.6313n	355.6313n	109.2509n
cdtot	9.816e-16	1.9673f	1.5090f	1.9673f	1.5090f	6.193e-16
cgtot	9.1017f	14.0838f	14.0838f	14.0838f	14.0838f	5.9411f
cstot	9.849e-16	1.5090f	1.9673f	1.5090f	1.9673f	7.574e-16
cbtot	7.1355f	10.6771f	10.6771f	10.6771f	10.6771f	4.5857f
cgs	9.861e-16	1.5089f	2.1091f	1.5089f	2.1091f	8.001e-16
cgd	9.816e-16	2.1091f	1.5089f	2.1091f	1.5089f	6.192e-16

subckt element	0:m38	0:m39	0:m40	0:m41	0:m42	0:m43
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-22.2679u	-11.0361u	-10.6061u	-10.6395u	-20.5682u	-22.2678u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0374	-1.0374	-1.0374	-995.8388m	-1.1928	-989.5617m
vds	-203.2280m	-197.0573m	-1.0374	-995.8388m	-1.1928	-1.5965
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-649.8657m	-656.3088m	-658.3437m	-656.2144m	-657.8600m	-648.7144m
vdsat	-324.8615m	-319.3073m	-317.3562m	-288.3882m	-433.6715m	-290.0474m
beta	432.9872u	223.7662u	173.4633u	213.6360u	174.7974u	436.5127u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	78.3669u	39.3012u	50.6421u	56.4921u	69.7863u	117.9247u
gds	59.5745u	30.9204u	340.7899n	348.1319n	628.7948n	586.1419n
gmb	28.9415u	14.5296u	17.6549u	19.7632u	23.9837u	41.2699u
cdtot	7.4136f	4.0930f	6.160e-16	7.532e-16	6.366e-16	1.5355f
cgtot	35.9283f	18.8566f	13.6298f	16.5872f	14.0735f	33.4496f
cstot	21.3797f	11.0307f	8.7724f	10.7261f	9.0652f	21.8625f
cbtot	12.2040f	6.4998f	4.8867f	5.9298f	4.9483f	11.7498f
cgs	27.9642f	14.4075f	11.7333f	14.3136f	12.2148f	29.1473f
cgd	5.9806f	3.2914f	6.127e-16	7.492e-16	6.332e-16	1.5273f

subckt element	0:m44	0:m45	0:m46	0:m47	0:m48	0:m49
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-11.0361u	-10.3042u	-10.3042u	-10.0624u	-10.0624u	20.5682u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-995.7324m	-1.2069	-1.2254	-1.2136	-1.2136	1.0234
vds	-496.1745m	-1.1950	-774.8614m	-1.2136	-1.2136	212.7334m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-656.0617m	-665.2747m	-666.0557m	-665.6932m	-665.6932m	677.8953m
vdsat	-288.4979m	-436.0866m	-449.0901m	-440.5344m	-440.5344m	273.4975m
beta	225.3216u	86.0213u	82.0200u	82.1805u	82.1805u	483.1219u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m
gm	58.4045u	34.5323u	33.3403u	33.3340u	33.3340u	86.4782u
gds	606.7109n	315.0637n	420.6518n	305.4928n	305.4928n	39.7051u
gmb	20.4178u	11.8570u	11.4139u	11.4388u	11.4388u	28.4926u
cdtot	7.944e-16	3.144e-16	3.007e-16	3.007e-16	3.007e-16	4.300e-16
cgtot	17.4745f	7.1270f	6.8318f	6.8318f	6.8318f	9.6618f
cstot	11.3137f	4.4766f	4.2821f	4.2816f	4.2816f	6.0231f
cbtot	6.2356f	2.6062f	2.5018f	2.5051f	2.5051f	3.3140f
cgs	15.0974f	6.0466f	5.7901f	5.7860f	5.7860f	8.2381f
cgd	7.901e-16	3.127e-16	2.990e-16	2.990e-16	2.990e-16	4.287e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:m50	0:m51	0:m52	0:m53	0:m54	0:m55
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	10.6061u	10.3042u	10.0624u	-2.4174n	-40.2477n	40.2477n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.0234	1.0234	1.0234	-1.4733	0.	542.4986m
vds	1.9626	1.0234	572.8819m	-1.8596	-542.4986m	542.4986m
vbs	0.	0.	0.	-1.8596	-542.4986m	0.
vth	680.8104m	681.2106m	681.4026m	671.9278m	678.2012m	678.2012m
vdSAT	269.5625m	269.3047m	269.1810m	37.4438m	39.9161m	39.9161m
beta	209.3293u	209.3161u	209.3098u	1.1654m	469.9865u	469.9865u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	53.7293u	52.6407u	51.3445u	67.1803n	935.2154n	935.2154n
gds	284.3631n	396.0506n	813.8088n	270.0912p	5.3088n	5.3088n
gmb	17.1180u	16.7852u	16.3934u	23.8531n	316.3215n	316.3215n
cdtot	1.864e-16	1.864e-16	1.864e-16	9.849e-16	4.970e-16	3.969e-16
cgTOT	4.3854f	4.3854f	4.3854f	9.1017f	3.8272f	3.8272f
csTOT	2.6100f	2.6106f	2.6109f	9.816e-16	3.969e-16	4.970e-16
cbTOT	1.6244f	1.6244f	1.6244f	7.1355f	2.9424f	2.9424f
cgs	3.5790f	3.5799f	3.5803f	9.816e-16	3.969e-16	5.317e-16
cgD	1.858e-16	1.858e-16	1.858e-16	9.861e-16	5.317e-16	3.969e-16

subckt element	0:m56	0:m57	0:m58	0:m59	0:m60	0:m61
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-40.2477n	40.2477n	10.9910u	20.5682u	22.2679u	101.5070u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	542.4986m	1.0038	987.4954m	1.2002	-266.6996m
vds	-542.4986m	542.4986m	1.0038	1.5945	1.2002	625.0586m
vbs	-542.4986m	0.	0.	0.	0.	625.0586m
vth	678.2012m	678.2012m	680.6464m	677.3065m	681.0193m	-575.4231m
vdSAT	39.9161m	39.9161m	257.2372m	250.3118m	382.3919m	-285.3870m
beta	469.9865u	469.9865u	247.4101u	485.9107u	210.8732u	2.2224m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m
gm	935.2154n	935.2154n	59.3465u	114.8972u	74.8938u	568.3830u
gds	5.3088n	5.3088n	436.5062n	632.3556n	670.1365n	17.2887u
gmb	316.3215n	316.3215n	18.9516u	36.6920u	23.4390u	155.3919u
cdTOT	4.970e-16	3.969e-16	2.196e-16	4.300e-16	1.930e-16	26.0367f
cgTOT	3.8272f	3.8272f	5.1056f	9.6614f	4.5288f	42.4836f
csTOT	3.969e-16	4.970e-16	3.0758f	6.0208f	2.7031f	3.4893f
cbTOT	2.9424f	2.9424f	1.8582f	3.3267f	1.6415f	12.9007f
cgs	3.969e-16	5.317e-16	4.2121f	8.2216f	3.7350f	3.2891f
cgD	5.317e-16	3.969e-16	2.190e-16	4.287e-16	1.924e-16	34.4556f

subckt element	0:m62	0:m63	0:m64	0:m65	0:m66	0:m67
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-891.7582m	-266.6996m	-891.7582m	-266.6996m	-891.7582m	-266.6996m
vds	-625.0586m	625.0586m	-625.0586m	625.0586m	-625.0586m	625.0586m
vbs	0.	625.0586m	0.	625.0586m	0.	625.0586m
vth	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m
vdSAT	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m
beta	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u
gds	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u
gmb	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u
cdTOT	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f
cgTOT	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f
csTOT	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f
cbTOT	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f
cgs	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f
cgD	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m68	0:m69	0:m70	0:m71	0:m72	0:m73
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	id	id	id	id	id	id
id	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-891.7582m	-266.6996m	-891.7582m	-266.6996m	-891.7582m	-266.6996m
vds	-625.0586m	625.0586m	-625.0586m	625.0586m	-625.0586m	625.0586m
vbs	0.	625.0586m	0.	625.0586m	0.	625.0586m
vth	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m
vdsat	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m
beta	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u
gds	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u
gmb	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u
cdtot	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f
cgtd	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f
cstot	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f
cbtot	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f
cgs	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f
cgd	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f

subckt	0:m74	0:m75	0:m76	0:m77	0:m78	0:m79
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	id	id	id	id	id	id
id	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-891.7582m	-266.6996m	-891.7582m	-266.6996m	-891.7582m	-266.6996m
vds	-625.0586m	625.0586m	-625.0586m	625.0586m	-625.0586m	625.0586m
vbs	0.	625.0586m	0.	625.0586m	0.	625.0586m
vth	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m	-575.4231m
vdsat	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m	-285.3870m
beta	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m	2.2224m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u	568.3830u
gds	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u	17.2887u
gmb	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u	155.3919u
cdtot	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f
cgtd	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f	42.4836f
cstot	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f	26.0367f	3.4893f
cbtot	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f	12.9007f
cgs	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f
cgd	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f	3.2891f	34.4556f

subckt	0:m80	0:m81	0:m82	0:m83	0:m84	0:m85
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	id	id	id	id	id	id
id	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-891.7582m	0.	-884.1895m	0.	-884.1895m	0.
vds	-625.0586m	884.1895m	-884.1895m	884.1895m	-884.1895m	884.1895m
vbs	0.	884.1895m	0.	884.1895m	0.	884.1895m
vth	-575.4231m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m
vdsat	-285.3870m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m
beta	2.2224m	2.2269m	2.2269m	2.2269m	2.2269m	2.2269m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	568.3830u	574.8275u	574.8275u	574.8275u	574.8275u	574.8275u
gds	17.2887u	16.2455u	16.2455u	16.2455u	16.2455u	16.2455u
gmb	155.3919u	156.2790u	156.2790u	156.2790u	156.2790u	156.2790u
cdtot	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f
cgtd	42.4836f	42.4834f	42.4834f	42.4834f	42.4834f	42.4834f
cstot	26.0367f	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f	3.4893f
cbtot	12.9007f	12.9153f	12.9153f	12.9153f	12.9153f	12.9153f
cgs	34.4556f	3.2893f	34.3841f	3.2893f	34.3841f	3.2893f
cgd	3.2891f	34.3841f	3.2893f	34.3841f	3.2893f	34.3841f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m86	0:m87	0:m88	0:m89	0:m90	0:m91
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-884.1895m	0.	-884.1895m	0.	-884.1895m	0.
vds	-884.1895m	884.1895m	-884.1895m	884.1895m	-884.1895m	884.1895m
vbs	0.	884.1895m	0.	884.1895m	0.	884.1895m
vth	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m
vdsat	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m
beta	2.2269m	2.2269m	2.2269m	2.2269m	2.2269m	2.2269m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	574.8275u	574.8275u	574.8275u	574.8275u	574.8275u	574.8275u
gds	16.2455u	16.2455u	16.2455u	16.2455u	16.2455u	16.2455u
gmb	156.2790u	156.2790u	156.2790u	156.2790u	156.2790u	156.2790u
cdtot	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f
cgtot	42.4834f	42.4834f	42.4834f	42.4834f	42.4834f	42.4834f
cstot	26.0027f	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f	3.4893f
cbtot	12.9153f	12.9153f	12.9153f	12.9153f	12.9153f	12.9153f
cgs	34.3841f	3.2893f	34.3841f	3.2893f	34.3841f	3.2893f
cgd	3.2893f	34.3841f	3.2893f	34.3841f	3.2893f	34.3841f

subckt	0:m92	0:m93	0:m94	0:m95	0:m96	0:m97
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	101.5070u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-884.1895m	0.	-884.1895m	0.	-884.1895m	0.
vds	-884.1895m	884.1895m	-884.1895m	884.1895m	-884.1895m	884.1895m
vbs	0.	884.1895m	0.	884.1895m	0.	884.1895m
vth	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m
vdsat	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m
beta	2.2269m	2.2269m	2.2269m	2.2269m	2.2269m	2.2269m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	574.8275u	574.8275u	574.8275u	574.8275u	574.8275u	574.8275u
gds	16.2455u	16.2455u	16.2455u	16.2455u	16.2455u	16.2455u
gmb	156.2790u	156.2790u	156.2790u	156.2790u	156.2790u	156.2790u
cdtot	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f
cgtot	42.4834f	42.4834f	42.4834f	42.4834f	42.4834f	42.4834f
cstot	26.0027f	3.4893f	26.0027f	3.4893f	26.0027f	3.4893f
cbtot	12.9153f	12.9153f	12.9153f	12.9153f	12.9153f	12.9153f
cgs	34.3841f	3.2893f	34.3841f	3.2893f	34.3841f	3.2893f
cgd	3.2893f	34.3841f	3.2893f	34.3841f	3.2893f	34.3841f

subckt	0:m98	0:m99	0:m100	0:m101	0:m102	0:m103
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-101.5070u	101.5070u	-101.5070u	9.6245u	-9.6245u	9.6245u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-884.1895m	0.	-884.1895m	-102.2049m	-795.4367m	-102.2049m
vds	-884.1895m	884.1895m	-884.1895m	693.2317m	-693.2317m	693.2317m
vbs	0.	884.1895m	0.	693.2317m	0.	693.2317m
vth	-571.0440m	-571.0440m	-571.0440m	-645.0374m	-645.0374m	-645.0374m
vdsat	-282.9173m	-282.9173m	-282.9173m	-151.3917m	-151.3917m	-151.3917m
beta	2.2269m	2.2269m	2.2269m	813.9717u	813.9717u	813.9717u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	574.8275u	574.8275u	574.8275u	100.4988u	100.4988u	100.4988u
gds	16.2455u	16.2455u	16.2455u	380.7949n	380.7949n	380.7949n
gmb	156.2790u	156.2790u	156.2790u	35.7257u	35.7257u	35.7257u
cdtot	3.4893f	26.0027f	3.4893f	39.0718f	2.7710f	39.0718f
cgtot	42.4834f	42.4834f	42.4834f	59.6900f	59.6900f	59.6900f
cstot	26.0027f	3.4893f	26.0027f	2.7710f	39.0718f	2.7710f
cbtot	12.9153f	12.9153f	12.9153f	21.3888f	21.3888f	21.3888f
cgs	34.3841f	3.2893f	34.3841f	2.7563f	51.5921f	2.7563f
cgd	3.2893f	34.3841f	3.2893f	51.5921f	2.7563f	51.5921f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m104	0:m105	0:m106	0:m107	0:m108	0:m109
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region						
id	-9.6245u	9.6245u	-9.6245u	-3.5814n	3.5814n	-3.5814n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-795.4367m	-102.2049m	-795.4367m	-2.1298	437.0282m	-2.1298
vds	-693.2317m	693.2317m	-693.2317m	-2.5668	2.5668	-2.5668
vbs	0.	693.2317m	0.	-2.5668	0.	-2.5668
vth	-645.0374m	-645.0374m	-645.0374m	677.3385m	677.3385m	677.3385m
vdsat	-151.3917m	-151.3917m	-151.3917m	37.3065m	37.3065m	37.3065m
beta	813.9717u	813.9717u	813.9717u	470.4068u	470.4068u	470.4068u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	100.4988u	100.4988u	100.4988u	96.1241n	96.1241n	96.1241n
gds	380.7949n	380.7949n	380.7949n	374.3371p	374.3371p	374.3371p
gmb	35.7257u	35.7257u	35.7257u	33.5568n	33.5568n	33.5568n
cdtot	2.7710f	39.0718f	2.7710f	4.019e-16	3.969e-16	4.019e-16
cgtot	59.6900f	59.6900f	59.6900f	3.8358f	3.8358f	3.8358f
cstot	39.0718f	2.7710f	39.0718f	3.969e-16	4.019e-16	3.969e-16
cbtot	21.3888f	21.3888f	21.3888f	3.0375f	3.0375f	3.0375f
cgs	51.5921f	2.7563f	51.5921f	3.969e-16	4.035e-16	3.969e-16
cgd	2.7563f	51.5921f	2.7563f	4.035e-16	3.969e-16	4.035e-16

subckt	0:m110	0:m111	0:m112	0:m113	0:m114	0:m115
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Cutoff	Cutoff	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region						
id	3.5814n	1.1943n	-211.0522u	480.8220n	-480.8220n	480.8220n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	437.0282m	437.0282m	0.	1.0576	-433.1707m	1.0576
vds	2.5668	437.0282m	-795.4367m	1.4908	-1.4908	1.4908
vbs	0.	0.	-795.4367m	1.4908	0.	1.4908
vth	677.3385m	681.4605m	600.7670m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m
vdsat	37.3065m	37.0194m	175.2094m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m
beta	470.4068u	221.2062u	10.7258m	4.9740m	4.9740m	4.9740m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	96.1241n	32.1861n	1.7088m	11.6290u	11.6290u	11.6290u
gds	374.3371p	172.4552p	34.4763u	218.5166n	218.5166n	218.5166n
gmb	33.5568n	11.2548n	396.6600u	3.3399u	3.3399u	3.3399u
cdtot	3.969e-16	1.869e-16	30.5080f	8.8372f	7.7446f	8.8372f
cgtot	3.8358f	1.9851f	51.6198f	42.4681f	42.4681f	42.4681f
cstot	4.019e-16	1.890e-16	4.3362f	7.7446f	8.8372f	7.7446f
cbtot	3.0375f	1.6095f	14.7310f	25.9613f	25.9613f	25.9613f
cgs	4.035e-16	1.897e-16	4.2331f	7.7358f	9.1920f	7.7358f
cgd	3.969e-16	1.869e-16	41.0427f	9.1920f	7.7358f	9.1920f

subckt	0:m116	0:m117	0:m118	0:m119	0:m120	0:m121
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region						
id	-480.8220n	480.8220n	-480.8220n	480.8220n	-480.8220n	480.8220n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-433.1707m	1.0576	-433.1707m	1.0576	-433.1707m	1.0576
vds	-1.4908	1.4908	-1.4908	1.4908	-1.4908	1.4908
vbs	0.	1.4908	0.	1.4908	0.	1.4908
vth	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m
vdsat	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m
beta	4.9740m	4.9740m	4.9740m	4.9740m	4.9740m	4.9740m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	11.6290u	11.6290u	11.6290u	11.6290u	11.6290u	11.6290u
gds	218.5166n	218.5166n	218.5166n	218.5166n	218.5166n	218.5166n
gmb	3.3399u	3.3399u	3.3399u	3.3399u	3.3399u	3.3399u
cdtot	7.7446f	8.8372f	7.7446f	8.8372f	7.7446f	8.8372f
cgtot	42.4681f	42.4681f	42.4681f	42.4681f	42.4681f	42.4681f
cstot	8.8372f	7.7446f	8.8372f	7.7446f	8.8372f	7.7446f
cbtot	25.9613f	25.9613f	25.9613f	25.9613f	25.9613f	25.9613f
cgs	9.1920f	7.7358f	9.1920f	7.7358f	9.1920f	7.7358f
cgd	7.7358f	9.1920f	7.7358f	9.1920f	7.7358f	9.1920f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m122	0:m123	0:m124	0:m125	0:m126	0:m127
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region						
id	-480.8220n	480.8220n	-480.8220n	480.8220n	-480.8220n	480.8220n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-433.1707m	1.0576	-433.1707m	1.0576	-433.1707m	1.0576
vds	-1.4908	1.4908	-1.4908	1.4908	-1.4908	1.4908
vbs	0.	1.4908	0.	1.4908	0.	1.4908
vth	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m
vdsat	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m
beta	4.9740m	4.9740m	4.9740m	4.9740m	4.9740m	4.9740m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	11.6290u	11.6290u	11.6290u	11.6290u	11.6290u	11.6290u
gds	218.5166n	218.5166n	218.5166n	218.5166n	218.5166n	218.5166n
gmb	3.3399u	3.3399u	3.3399u	3.3399u	3.3399u	3.3399u
cdtot	7.7446f	8.8372f	7.7446f	8.8372f	7.7446f	8.8372f
cgtot	42.4681f	42.4681f	42.4681f	42.4681f	42.4681f	42.4681f
cstot	8.8372f	7.7446f	8.8372f	7.7446f	8.8372f	7.7446f
cbtot	25.9613f	25.9613f	25.9613f	25.9613f	25.9613f	25.9613f
cgs	9.1920f	7.7358f	9.1920f	7.7358f	9.1920f	7.7358f
cgd	7.7358f	9.1920f	7.7358f	9.1920f	7.7358f	9.1920f

subckt	0:m128	0:m129	0:m130	0:m131	0:m132	0:m133
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos
model	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Saturati
region						
id	-480.8220n	480.8220n	-480.8220n	480.8220n	-480.8220n	-8.2315u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-433.1707m	1.0576	-433.1707m	1.0576	-433.1707m	266.6996m
vds	-1.4908	1.4908	-1.4908	1.4908	-1.4908	-617.4900m
vbs	0.	1.4908	0.	1.4908	0.	-617.4900m
vth	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	-557.8585m	678.6344m
vdsat	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	-43.1442m	181.0067m
beta	4.9740m	4.9740m	4.9740m	4.9740m	4.9740m	415.3925u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m
gm	11.6290u	11.6290u	11.6290u	11.6290u	11.6290u	66.4933u
gds	218.5166n	218.5166n	218.5166n	218.5166n	218.5166n	554.8365n
gmb	3.3399u	3.3399u	3.3399u	3.3399u	3.3399u	21.4883u
cdtot	7.7446f	8.8372f	7.7446f	8.8372f	7.7446f	5.0551f
cgtot	42.4681f	42.4681f	42.4681f	42.4681f	42.4681f	8.1720f
cstot	8.8372f	7.7446f	8.8372f	7.7446f	8.8372f	3.617e-16
cbtot	25.9613f	25.9613f	25.9613f	25.9613f	25.9613f	2.8815f
cgs	9.1920f	7.7358f	9.1920f	7.7358f	9.1920f	3.607e-16
cgd	7.7358f	9.1920f	7.7358f	9.1920f	7.7358f	6.8757f

subckt	0:m134	0:m135	0:m136	0:m137	0:m138	0:m139
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region						
id	8.2315u	-8.2315u	8.2315u	-8.2315u	8.2315u	-8.2315u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	884.1895m	266.6996m	884.1895m	266.6996m	884.1895m	266.6996m
vds	617.4900m	-617.4900m	617.4900m	-617.4900m	617.4900m	-617.4900m
vbs	0.	-617.4900m	0.	-617.4900m	0.	-617.4900m
vth	678.6344m	678.6344m	678.6344m	678.6344m	678.6344m	678.6344m
vdsat	181.0067m	181.0067m	181.0067m	181.0067m	181.0067m	181.0067m
beta	415.3925u	415.3925u	415.3925u	415.3925u	415.3925u	415.3925u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	66.4933u	66.4933u	66.4933u	66.4933u	66.4933u	66.4933u
gds	554.8365n	554.8365n	554.8365n	554.8365n	554.8365n	554.8365n
gmb	21.4883u	21.4883u	21.4883u	21.4883u	21.4883u	21.4883u
cdtot	3.617e-16	5.0551f	3.617e-16	5.0551f	3.617e-16	5.0551f
cgtot	8.1720f	8.1720f	8.1720f	8.1720f	8.1720f	8.1720f
cstot	5.0551f	3.617e-16	5.0551f	3.617e-16	5.0551f	3.617e-16
cbtot	2.8815f	2.8815f	2.8815f	2.8815f	2.8815f	2.8815f
cgs	6.8757f	3.607e-16	6.8757f	3.607e-16	6.8757f	3.607e-16
cgd	3.607e-16	6.8757f	3.607e-16	6.8757f	3.607e-16	6.8757f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m140	0:m141	0:m142	0:m143	0:m144	0:m145
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	8.2315u	-8.2315u	8.2315u	-8.2315u	8.2315u	-8.2315u
id	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	884.1895m	266.6996m	884.1895m	266.6996m	884.1895m	266.6996m
vds	617.4900m	-617.4900m	617.4900m	-617.4900m	617.4900m	-617.4900m
vbs	0.	-617.4900m	0.	-617.4900m	0.	-617.4900m
vth	678.6344m	678.6344m	678.6344m	678.6344m	678.6344m	678.6344m
vdsat	181.0067m	181.0067m	181.0067m	181.0067m	181.0067m	181.0067m
beta	415.3925u	415.3925u	415.3925u	415.3925u	415.3925u	415.3925u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	66.4933u	66.4933u	66.4933u	66.4933u	66.4933u	66.4933u
gds	554.8365n	554.8365n	554.8365n	554.8365n	554.8365n	554.8365n
gmb	21.4883u	21.4883u	21.4883u	21.4883u	21.4883u	21.4883u
cdtot	3.617e-16	5.0551f	3.617e-16	5.0551f	3.617e-16	5.0551f
cgtot	8.1720f	8.1720f	8.1720f	8.1720f	8.1720f	8.1720f
cstot	5.0551f	3.617e-16	5.0551f	3.617e-16	5.0551f	3.617e-16
cbtot	2.8815f	2.8815f	2.8815f	2.8815f	2.8815f	2.8815f
cgs	6.8757f	3.607e-16	6.8757f	3.607e-16	6.8757f	3.607e-16
cgd	3.607e-16	6.8757f	3.607e-16	6.8757f	3.607e-16	6.8757f

subckt	0:m146	0:m147	0:m148	0:m149	0:m150	0:m151
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	8.2315u	10.6395u	10.4558u	-211.0522u	211.0522u	-211.0522u
id	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	884.1895m	1.0234	1.0234	102.2049m	797.5201m	102.2049m
vds	617.4900m	212.6934m	203.9859m	-695.3151m	695.3151m	-695.3151m
vbs	0.	0.	0.	-695.3151m	0.	-695.3151m
vth	678.6344m	680.8714m	680.8751m	601.4479m	601.4479m	601.4479m
vdsat	181.0067m	269.9801m	269.9777m	176.0871m	176.0871m	176.0871m
beta	415.3925u	254.1518u	254.1516u	10.7210m	10.7210m	10.7210m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	66.4933u	45.3908u	43.8082u	1.7025m	1.7025m	1.7025m
gds	554.8365n	20.0524u	22.1567u	36.6641u	36.6641u	36.6641u
gmb	21.4883u	14.9605u	14.4909u	395.9942u	395.9942u	395.9942u
cdtot	3.617e-16	2.263e-16	2.263e-16	30.5223f	4.3362f	30.5223f
cgtot	8.1720f	5.2507f	5.2507f	51.6237f	51.6237f	51.6237f
cstot	5.0551f	3.1702f	3.1702f	4.3362f	30.5223f	4.3362f
cbtot	2.8815f	1.9010f	1.9010f	14.7283f	14.7283f	14.7283f
cgs	6.8757f	4.3448f	4.3448f	4.2330f	41.0684f	4.2330f
cgd	3.607e-16	2.256e-16	2.256e-16	41.0684f	4.2330f	41.0684f

subckt	0:m152	0:m153	0:m154	0:m155	0:m156	0:m157
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	211.0522u	-211.0522u	211.0522u	-211.0522u	211.0522u	-211.0522u
id	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	797.5201m	102.2049m	797.5201m	102.2049m	797.5201m	102.2049m
vds	695.3151m	-695.3151m	695.3151m	-695.3151m	695.3151m	-695.3151m
vbs	0.	-695.3151m	0.	-695.3151m	0.	-695.3151m
vth	601.4479m	601.4479m	601.4479m	601.4479m	601.4479m	601.4479m
vdsat	176.0871m	176.0871m	176.0871m	176.0871m	176.0871m	176.0871m
beta	10.7210m	10.7210m	10.7210m	10.7210m	10.7210m	10.7210m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	1.7025m	1.7025m	1.7025m	1.7025m	1.7025m	1.7025m
gds	36.6641u	36.6641u	36.6641u	36.6641u	36.6641u	36.6641u
gmb	395.9942u	395.9942u	395.9942u	395.9942u	395.9942u	395.9942u
cdtot	4.3362f	30.5223f	4.3362f	30.5223f	4.3362f	30.5223f
cgtot	51.6237f	51.6237f	51.6237f	51.6237f	51.6237f	51.6237f
cstot	30.5223f	4.3362f	30.5223f	4.3362f	30.5223f	4.3362f
cbtot	14.7283f	14.7283f	14.7283f	14.7283f	14.7283f	14.7283f
cgs	41.0684f	4.2330f	41.0684f	4.2330f	41.0684f	4.2330f
cgd	4.2330f	41.0684f	4.2330f	41.0684f	4.2330f	41.0684f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt						
element	0:m158	0:m159	0:m160	0:m161	0:m162	0:m163
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	211.0522u	211.0522u	-211.0522u	211.0522u	-211.0522u	211.0522u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	797.5201m	795.4367m	0.	795.4367m	0.	795.4367m
vds	695.3151m	795.4367m	-795.4367m	795.4367m	-795.4367m	795.4367m
vbs	0.	0.	-795.4367m	0.	-795.4367m	0.
vth	601.4479m	600.7670m	600.7670m	600.7670m	600.7670m	600.7670m
vdsat	176.0871m	175.2094m	175.2094m	175.2094m	175.2094m	175.2094m
beta	10.7210m	10.7258m	10.7258m	10.7258m	10.7258m	10.7258m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	1.7025m	1.7088m	1.7088m	1.7088m	1.7088m	1.7088m
gds	36.6641u	34.4763u	34.4763u	34.4763u	34.4763u	34.4763u
gmb	395.9942u	396.6600u	396.6600u	396.6600u	396.6600u	396.6600u
cdtot	4.3362f	4.3362f	30.5080f	4.3362f	30.5080f	4.3362f
cgctot	51.6237f	51.6198f	51.6198f	51.6198f	51.6198f	51.6198f
cstot	30.5223f	30.5080f	4.3362f	30.5080f	4.3362f	30.5080f
cbtot	14.7283f	14.7310f	14.7310f	14.7310f	14.7310f	14.7310f
cgs	41.0684f	41.0427f	4.2331f	41.0427f	4.2331f	41.0427f
cgd	4.2330f	4.2331f	41.0427f	4.2331f	41.0427f	4.2331f

subckt						
element	0:m164	0:m165	0:m166	0:m167	0:m168	0:m169
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff
id	-211.0522u	211.0522u	-211.0522u	211.0522u	-4.4999u	4.4999u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	795.4367m	0.	795.4367m	-966.7496m	542.4986m
vds	-795.4367m	795.4367m	-795.4367m	795.4367m	-1.5092	1.5092
vbs	-795.4367m	0.	-795.4367m	0.	-1.5092	0.
vth	600.7670m	600.7670m	600.7670m	600.7670m	598.6089m	598.6089m
vdsat	175.2094m	175.2094m	175.2094m	175.2094m	52.2251m	52.2251m
beta	10.7258m	10.7258m	10.7258m	10.7258m	6.7552m	6.7552m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	1.7088m	1.7088m	1.7088m	1.7088m	89.0490u	89.0490u
gds	34.4763u	34.4763u	34.4763u	34.4763u	1.3946u	1.3946u
gmb	396.6600u	396.6600u	396.6600u	396.6600u	21.5454u	21.5454u
cdtot	30.5080f	4.3362f	30.5080f	4.3362f	5.3350f	2.6972f
cgctot	51.6198f	51.6198f	51.6198f	51.6198f	16.8665f	16.8665f
cstot	4.3362f	30.5080f	4.3362f	30.5080f	2.6972f	5.3350f
cbtot	14.7310f	14.7310f	14.7310f	14.7310f	8.7325f	8.7325f
cgs	4.2331f	41.0427f	4.2331f	41.0427f	2.6875f	6.3369f
cgd	41.0427f	4.2331f	41.0427f	4.2331f	6.3369f	2.6875f

subckt						
element	0:m170	0:m171	0:m172	0:m173	0:m174	0:m175
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-4.4999u	4.4999u	-4.4999u	4.4999u	-4.4999u	4.4999u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-966.7496m	542.4986m	-966.7496m	542.4986m	-966.7496m	542.4986m
vds	-1.5092	1.5092	-1.5092	1.5092	-1.5092	1.5092
vbs	-1.5092	0.	-1.5092	0.	-1.5092	0.
vth	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m
vdsat	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m
beta	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u
gds	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u
gmb	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u
cdtot	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f
cgctot	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f
cstot	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f
cbtot	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f
cgs	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f
cgd	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt						
element	0:m176	0:m177	0:m178	0:m179	0:m180	0:m181
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-4.4999u	4.4999u	-4.4999u	4.4999u	-4.4999u	4.4999u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-966.7496m	542.4986m	-966.7496m	542.4986m	-966.7496m	542.4986m
vds	-1.5092	1.5092	-1.5092	1.5092	-1.5092	1.5092
vbs	-1.5092	0.	-1.5092	0.	-1.5092	0.
vth	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m
vdsat	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m
beta	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u
gds	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u
gmb	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u
cdtot	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f
cgtot	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f
cstot	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f
cbtot	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f
cgs	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f
cgd	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f

subckt						
element	0:m182	0:m183	0:m184	0:m185	0:m186	0:m187
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-4.4999u	4.4999u	-4.4999u	4.4999u	-4.4999u	4.4999u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-966.7496m	542.4986m	-966.7496m	542.4986m	-966.7496m	542.4986m
vds	-1.5092	1.5092	-1.5092	1.5092	-1.5092	1.5092
vbs	-1.5092	0.	-1.5092	0.	-1.5092	0.
vth	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m	598.6089m
vdsat	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m	52.2251m
beta	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m	6.7552m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u	89.0490u
gds	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u	1.3946u
gmb	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u	21.5454u
cdtot	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f
cgtot	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f	16.8665f
cstot	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f	2.6972f	5.3350f
cbtot	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f	8.7325f
cgs	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f
cgd	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f	6.3369f	2.6875f

subckt		
element	0:m188	0:m189
model	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati
id	10.6395u	10.4558u
ibs	0.	0.
ibd	0.	0.
vgs	987.5354m	996.2429m
vds	1.7915	413.5041m
vbs	0.	0.
vth	680.1986m	680.7858m
vdsat	246.9902m	252.3021m
beta	255.6197u	255.2453u
gam eff	636.6611m	636.6611m
gm	59.8525u	57.2938u
gds	315.1730n	1.5724u
gmb	19.1304u	18.3536u
cdtot	2.263e-16	2.263e-16
cgtot	5.2504f	5.2505f
cstot	3.1688f	3.1699f
cbtot	1.9078f	1.9062f
cgs	4.3358f	4.3392f
cgd	2.256e-16	2.256e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการจำลองการทำงานวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอด้วยโปรแกรม HSPICE

1 \*\*\*\*\* Star-HSPICE -- 2001.4 (20011215) 12:46:28 03/06/2005 pcnt

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* cfoa level 49 \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* operating point status is all simulation time is 0.

node	=voltage	node	=voltage	node	=voltage
+0:13	=-469.9461m	0:14	= 465.0946m	0:15	= 842.1662m
+0:16	=-816.4711m	0:17	= 829.9790m	0:18	=-817.7994m
+0:23	= -1.3726	0:24	= 410.7314m	0:25	= 475.8985m
+0:26	= -1.2809	0:27	= 1.2733	0:28	=-442.4545m
+0:aa	= 1.0940	0:ai	= -1.0346	0:ao	= -1.1618
+0:b1	= 66.6713m	0:b2	=-572.2776u	0:b3	= 332.2210m
+0:b4	=-565.1219m	0:bb	= -1.1904	0:bc2	=-921.3323m
+0:bc3	= 289.3338m	0:bc4	= 301.2566m	0:bc5	= 1.4934
+0:cc	= 1.0123	0:ci	= 1.0433	0:co	= 42.0865m
+0:cs1	=-463.6339m	0:cs10	= 1.2937	0:cs11	= -1.2945
+0:cs12	= 1.2919	0:cs13	= -1.2943	0:cs14	= 1.2910
+0:cs2	= 464.7673m	0:cs3	=-899.1893m	0:cs4	= 1.2938
+0:cs5	= -1.2994	0:cs6	= 1.2949	0:cs7	= -1.3087
+0:cs8	= 1.3049	0:cs9	= -1.3329	0:csb1	=-300.0000m
+0:csb2	= 300.0000m	0:dd	= -1.2480	0:g10	= 496.8366m
+0:g9	=-494.9381m	0:mr	= -1.0536	0:vdd	= 1.5000
+0:vin	= 0.	0:vin-	= 497.3035u	0:vo	= -1.0387
+0:vss	= -1.5000				

\*\*\*\* voltage sources

subckt	element	0:vdd	0:vss	0:vin	0:vcs1	0:vcs2
	volts	1.5000	-1.5000	0.	-300.0000m	300.0000m
	current	-11.2995m	11.2879m	0.	490.4735n	-283.5974n
	power	16.9493m	16.9319m	0.	147.1420n	85.0792n

total voltage source power dissipation= 33.8814m watts

\*\*\*\* resistors

subckt	element	0:rb
	r value	650.0000
	v drop	6.6338m
	current	10.2058u
	power	67.7029n

\*\*\*\* mosfets

subckt	element	0:mi1	0:mi2	0:mi9	0:mi3	0:mi4	0:mi5
	model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
	region	Saturati	Saturati	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati
	id	110.4263u	99.9690u	233.7935n	-215.3264u	-215.3264u	-110.8759u
	ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	vgs	1.0346	1.0301	539.6861m	-1.0351	-1.0301	-1.0433
	vds	2.5346	465.3757m	1.8768	-470.4434m	-1.0301	-2.5433
	vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	vth	667.8770m	668.7588m	668.1574m	-639.6896m	-639.2271m	-640.0851m
	vdsat	290.1120m	286.5340m	40.8425m	-331.4769m	-328.0312m	-337.1559m
	beta	1.8721m	1.8732m	1.9851m	3.3041m	3.3071m	1.5565m
	gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
	gm	520.8137u	479.8881u	5.3377u	979.1589u	997.6485u	499.2091u
	gds	2.6361u	13.3511u	24.7253n	16.6770u	6.9606u	2.2078u
	gmb	165.3121u	152.9806u	1.8022u	340.8547u	347.5791u	173.7305u
	cdtot	1.6665f	1.6665f	1.6710f	11.6930f	11.6930f	5.5161f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cgtot	36.3979f	36.3978f	15.1028f	252.4012f	252.4010f	119.2545f
cstot	23.3281f	23.3391f	2.1875f	166.5347f	166.5109f	78.5207f
cbtot	11.8838f	11.8905f	11.2933f	86.7299f	86.7862f	41.0596f
cgs	31.8139f	31.8255f	2.3645f	222.4610f	222.3650f	104.9167f
cgd	1.6616f	1.6616f	1.6709f	11.6303f	11.6303f	5.4865f

subckt						
element	0:mi6	0:mi10	0:mi7	0:mi8	0:mi11	0:mi12
model	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Cutoff	Saturati	Saturati	Cutoff	Saturati
id	-100.2895u	-304.8307n	216.4471u	216.4471u	-233.7960n	-3.3363u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0349	-546.4402m	1.0428	1.0349	-657.8338m	-657.8338m
vds	-456.7232m	-1.8597	464.5973m	1.0349	-657.8338m	-2.3178
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-641.8093m	-640.6500m	664.3882m	664.1451m	-658.6574m	-640.0066m
vdsat	-329.6040m	-43.7043m	298.5422m	293.5236m	-65.5554m	-73.4739m
beta	1.5582m	1.6646m	3.7241m	3.7288m	183.7504u	1.7766m
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m
gm	458.2097u	6.9891u	990.6230u	1.0216m	4.4347u	59.7959u
gds	8.5329u	12.3484n	30.8483u	8.1076u	10.6986n	111.0659n
gmb	159.5600u	2.5474u	315.4518u	324.5864u	1.6003u	21.5094u
cdtot	5.5161f	5.5440f	3.3176f	3.3176f	6.177e-16	5.9397f
cgtot	119.2543f	52.8099f	72.0804f	72.0802f	9.5938f	99.8248f
cstot	78.5621f	9.6695f	46.4594f	46.4532f	4.6650f	55.6026f
cbtot	41.0975f	38.1838f	23.3107f	23.3317f	4.7687f	43.8353f
cgs	104.9480f	10.9700f	63.3332f	63.3018f	6.0209f	72.1988f
cgd	5.4865f	5.5425f	3.3079f	3.3079f	6.161e-16	5.9200f

subckt						
element	0:mi13	0:mi14	0:mi15	0:mi16	0:mi17	0:mi18
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	3.3363u	10.8037u	304.8331n	3.8877u	-3.8877u	-9.6831u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	682.2006m	682.2006m	683.5289m	683.5289m	-670.0210m	-670.0210m
vds	682.2006m	1.5005	683.5289m	2.3300	-670.0210m	-1.4995
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	669.2682m	662.7718m	681.5895m	668.5660m	-641.3682m	-638.5400m
vdsat	71.6291m	74.5981m	66.1414m	72.4505m	-78.3462m	-79.7047m
beta	1.8076m	4.9059m	204.2044u	1.8077m	1.7737m	4.1176m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m
gm	57.6454u	180.6230u	5.4376u	65.0836u	67.2529u	165.8613u
gds	309.0682n	825.1910n	29.1442n	281.0779n	172.6011n	352.1411n
gmb	19.0640u	59.6637u	1.8025u	21.5128u	24.1947u	59.6275u
cdtot	1.5307f	4.1475f	1.735e-16	1.5307f	5.9374f	13.7729f
cgtot	25.1246f	69.9187f	2.9716f	25.4137f	105.3241f	246.9873f
cstot	13.3711f	38.6240f	1.3382f	13.6480f	61.2586f	145.2505f
cbtot	10.8346f	28.9437f	1.5124f	10.8522f	44.2253f	102.4034f
cgs	17.7345f	51.2819f	1.7766f	18.1144f	79.8230f	189.3629f
cgd	1.5281f	4.1400f	1.732e-16	1.5280f	5.9153f	13.7203f

subckt						
element	0:mc1	0:mc2	0:mc3	0:mc4	0:mc5	0:mc6
model	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	203.9705u	203.9705u	-79.4903n	-206.0518u	-206.0518u	11.2188u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.0301	1.1898	-1.1904	-1.0349	-1.0274	1.0940
vds	309.6306m	136.8066m	-572.2776u	-405.9692m	-2.1476	66.6713m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	664.2295m	664.5278m	-654.2216m	-639.8151m	-638.4271m	677.9575m
vdsat	290.3098m	393.5924m	-435.5050m	-331.2171m	-326.6070m	319.2872m
beta	3.8864m	3.6398m	271.1426u	3.1878m	3.1148m	477.8083u
gam eff	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m
gm	916.8836u	424.3680u	135.0065n	927.8214u	960.7332u	28.0211u
gds	115.7009u	1.1764m	138.8102u	30.7381u	4.5629u	148.1477u
gmb	294.8972u	150.9666u	57.6947n	323.5742u	334.8729u	10.0522u
cdtot	3.4552f	41.0611f	14.6494f	11.2812f	11.0067f	5.9050f
cgtot	75.0537f	86.6991f	26.2841f	243.5247f	237.6069f	11.6433f
cstot	48.3877f	39.4387f	10.4859f	160.6725f	156.6930f	4.8200f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cbtot	24.2997f	26.3430f	9.1692f	83.6896f	81.7440f	3.8134f
cgs	65.9240f	50.1514f	12.8227f	214.6292f	209.2080f	6.1135f
cgd	3.4451f	35.0450f	12.9537f	11.2207f	10.9477f	5.0722f

subckt	0:mc7	0:mc8	0:mc9	0:mc10	0:mc11	0:mc12
element	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	id	id	id	id	id	id
id	11.3719u	11.3719u	-10.9367u	-9.2906u	-9.2906u	11.1888u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	682.2006m	682.8923m	-1.2480	-670.0210m	-680.0726m	1.0123
vds	251.9858m	194.4513m	-565.1219m	-487.7064m	-2.0659	332.2210m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	662.5699m	662.5944m	-666.2290m	-639.3760m	-638.4946m	680.8204m
vdsat	74.7138m	74.9970m	-465.7828m	-79.3104m	-84.6305m	262.7547m
beta	5.7209m	5.7205m	81.7228u	4.1168m	3.2918m	254.5997u
gam eff	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m
gm	193.2602u	192.5989u	33.5754u	159.5930u	153.4258u	57.3320u
gds	1.9546u	2.8352u	1.0547u	449.5882n	304.8650n	3.5532u
gmb	63.8535u	63.6370u	11.4914u	57.4037u	55.0719u	18.3964u
cdtot	4.8363f	4.8362f	3.007e-16	13.7733f	11.0200f	2.263e-16
cgtot	81.5512f	81.8369f	6.8318f	246.0714f	205.8433f	5.2507f
cstot	45.1322f	45.4120f	4.2823f	144.3570f	124.4927f	3.1700f
cbtot	33.6984f	33.7145f	2.4955f	102.3194f	82.6095f	1.9031f
cgs	59.9243f	60.3098f	5.7968f	188.1823f	162.6607f	4.3425f
cgd	4.8275f	4.8274f	2.990e-16	13.7210f	10.9745f	2.256e-16

subckt	0:mo1	0:mo2	0:mo9	0:mo3	0:mo4	0:mo5
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Cutoff	Cutoff	Saturati	Cutoff	Cutoff	Saturati
region	id	id	id	id	id	id
id	5.9883p	7.9187p	9.9372u	-398.7300p	-399.1433p	-409.6246u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	108.2854m	127.3576m	666.9101m	-123.1948m	-127.3576m	-1.0956
vds	2.6618	338.1517m	1.6377	-333.9890m	-127.3576m	-1.5421
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	661.5429m	662.5332m	661.9793m	-574.6715m	-578.1634m	-638.2179m
vdsat	37.6511m	37.6513m	68.7839m	-39.9574m	-39.9574m	-377.9709m
beta	5.7720m	5.7701m	5.7299m	46.6865m	46.6278m	4.6165m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	173.7961p	229.6365p	173.1648u	11.9711n	11.9768n	1.6266m
gds	617.7888f	1.2396p	789.3493n	223.8880p	297.9808p	10.8446u
gmb	68.7034p	90.0734p	57.3065u	4.1736n	4.1901n	563.6360u
cdtot	4.8447f	4.8447f	4.8377f	73.1656f	73.1656f	16.4973f
cgtot	47.8755f	47.5142f	74.9540f	419.7878f	419.2913f	355.9613f
cstot	4.8447f	4.8447f	38.6591f	73.1662f	73.1662f	234.8955f
cbtot	38.1849f	37.8236f	33.3230f	273.4471f	272.9505f	121.3196f
cgs	4.8459f	4.8459f	51.0151f	73.1754f	73.1754f	314.6578f
cgd	4.8447f	4.8447f	4.8303f	73.1656f	73.1656f	16.4089f

subckt	0:mo6	0:mo10	0:mo7	0:mo8	0:mo11	0:mo12
element	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	id	id	id	id	id	id
id	-398.4032u	-1.826e-19	9.9828m	9.9828m	-9.9372u	-107.8101u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0893	454.7502m	1.0807	1.0893	-1.0241	-1.0241
vds	-1.4579	-1.3230	1.4494	1.0893	-1.0241	-1.9425
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-638.2875m	-638.3990m	590.9515m	593.4004m	-658.3547m	-640.3168m
vdsat	-373.1315m	-37.8463m	349.7559m	353.1373m	-307.4520m	-322.6574m
beta	4.6213m	4.9893m	102.3025m	102.1251m	173.8442u	1.6779m
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m
gm	1.6042m	5.484e-18	33.0259m	32.7428m	49.1280u	509.1785u
gds	10.8720u	8.113e-21	723.4573u	856.7456u	321.0597n	2.5316u
gmb	556.1914u	2.712e-18	7.1816m	7.1795m	17.1471u	177.5691u
cdtot	16.4973f	16.5856f	43.2265f	43.2265f	6.160e-16	5.9279f
cgtot	355.9612f	226.6558f	513.9070f	513.9070f	13.6297f	128.1306f
cstot	234.9005f	16.5856f	304.2610f	304.6560f	8.7724f	84.3950f
cbtot	121.4149f	193.4782f	141.1080f	140.9924f	4.8942f	44.2013f
cgs	314.5708f	16.5920f	413.2045f	413.9792f	11.7258f	112.6672f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cgd	16.4089f	16.5856f	42.1971f	42.1964f	6.127e-16	5.8961f
subckt						
element	0:mo13	0:mo14	0:mo15	0:mo16	0:mo17	0:mo18
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	107.8101u	9.9829m	2.2079p	38.6930p	-43.7862p	-61.1630n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.0575	1.0575	219.0743m	219.0743m	-226.7393m	-226.7393m
vds	1.0575	461.3466m	219.0743m	2.7733	-226.7393m	-2.5387
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	669.1082m	597.5367m	681.7874m	668.3771m	-641.7345m	-537.2318m
vdsat	304.2017m	333.4234m	36.8029m	37.4882m	-37.8310m	-39.9788m
beta	1.7110m	125.0024m	205.6010u	1.8225m	1.7907m	99.9894m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m
gm	486.0117u	34.6482m	63.8739p	1.1191n	1.3075n	1.8071u
gds	3.9133u	3.1642m	437.7281f	3.9876p	3.6047p	32.0783n
gmb	154.0903u	7.8312m	24.3688p	424.5733p	524.1045p	555.0353n
cdtot	1.5289f	52.6792f	1.737e-16	1.5332f	5.9596f	154.5850f
cgtot	33.4249f	626.2448f	1.9815f	14.7946f	57.5865f	862.2777f
cstot	21.4103f	372.1159f	1.737e-16	1.5332f	5.9599f	154.6660f
cbtot	10.9015f	172.3952f	1.6340f	11.7278f	45.6655f	553.0205f
cgs	29.2332f	505.2932f	1.738e-16	1.5336f	5.9615f	154.7062f
cgd	1.5245f	51.4223f	1.737e-16	1.5332f	5.9596f	154.5844f

subckt						
element	0:mbc1	0:mbc2	0:mbc3	0:mbc4	0:mbc5	0:mbc6
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-9.9653u	-10.2058u	-9.9653u	-10.2058u	9.9653u	10.2058u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.2107	-1.2040	-1.2107	-1.2226	1.0364	1.0364
vds	-1.2107	-1.1921	-1.2107	-764.8905m	578.6677m	1.0364
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-665.6956m	-665.2771m	-665.6956m	-666.0639m	681.6342m	681.4392m
vdsat	-438.3809m	-433.9801m	-438.3809m	-446.9769m	277.2469m	277.3721m
beta	82.2185u	86.0603u	82.2185u	82.0570u	194.1547u	194.1607u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	33.1893u	34.3838u	33.1893u	33.1895u	49.0614u	50.3214u
gds	302.7684n	312.2922n	302.7684n	421.1577n	806.5087n	384.1910n
gmb	11.3923u	11.8092u	11.3923u	11.3652u	15.6499u	16.0292u
cdtot	3.007e-16	3.144e-16	3.007e-16	3.007e-16	1.733e-16	1.733e-16
cgtot	6.8318f	7.1270f	6.8318f	6.8318f	4.1005f	4.1005f
cstot	4.2816f	4.4766f	4.2816f	4.2821f	2.4269f	2.4266f
cbtot	2.5059f	2.6070f	2.5059f	2.5026f	1.5315f	1.5315f
cgs	5.7852f	6.0458f	5.7852f	5.7894f	3.3306f	3.3302f
cgd	2.990e-16	3.127e-16	2.990e-16	2.990e-16	1.727e-16	1.727e-16

subckt						
element	0:mbc7	0:mbc8	0:mbc9	0:mbc10	0:mbc11	0:mbc12
model	0:pmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-10.4948u	10.4948u	-11.2214u	-11.2214u	9.9372u	9.9372u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0352	1.0364	-1.0352	-993.7035m	1.0329	1.0364
vds	-1.0352	1.9648	-206.2965m	-1.2516	171.0079m	167.1438m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-658.3455m	681.0435m	-656.3012m	-655.4374m	680.8891m	680.8908m
vdsat	-315.7282m	277.6261m	-317.6839m	-287.4550m	276.0879m	278.3654m
beta	173.5258u	194.1728u	223.8471u	225.4207u	253.7755u	253.6357u
gam eff	684.9772m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	50.3942u	51.3320u	41.0684u	59.8384u	37.3929u	36.5967u
gds	337.5123n	274.6479n	28.2462u	331.8110n	32.7070u	34.5030u
gmb	17.5718u	16.3372u	15.1049u	20.9414u	12.5806u	12.3457u
cdtot	6.160e-16	1.733e-16	2.8977f	7.944e-16	1.4626f	1.6155f
cgtot	13.6298f	4.1005f	18.3626f	17.4745f	5.7535f	5.8129f
cstot	8.7724f	2.4261f	11.1549f	11.3116f	3.0447f	3.0206f
cbtot	4.8880f	1.5315f	6.3933f	6.2373f	2.0031f	2.0156f
cgs	11.7321f	3.3293f	14.7000f	15.0920f	4.0450f	3.9966f
cgd	6.127e-16	1.727e-16	2.3616f	7.901e-16	1.1652f	1.2892f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:mbc13	0:mbc14	0:mbc15	0:mbc16	0:mbc17	0:mbc18
model	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-10.8912u	-10.8912u	10.6910u	10.6910u	-11.2188u	-11.2188u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0352	-1.0049	1.0087	1.0364	-1.0352	-993.7961m
vds	-195.1439m	-261.5793m	274.0387m	191.3371m	-206.2039m	-1.2271
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-656.3104m	-656.2555m	680.8452m	680.8805m	-656.3013m	-655.4577m
vdsat	-317.6771m	-295.1299m	260.3715m	278.3720m	-317.6839m	-287.5087m
beta	223.8468u	224.9743u	254.7442u	253.6361u	223.8471u	225.4165u
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m
gm	38.9426u	50.1682u	53.3381u	41.4541u	41.0509u	59.8099u
gds	30.9716u	11.1675u	7.2463u	27.8746u	28.2686u	334.7256n
gmb	14.4014u	17.8831u	17.2275u	13.8284u	15.0991u	20.9310u
cdtot	4.1756f	7.944e-16	2.263e-16	8.402e-16	2.9093f	7.944e-16
cgtot	18.8903f	17.4746f	5.2506f	5.5043f	18.3675f	17.4745f
cstot	11.0212f	11.3145f	3.1701f	3.1202f	11.1539f	11.3116f
cbtot	6.5094f	6.2289f	1.9038f	1.9493f	6.3943f	6.2373f
cgs	14.3846f	15.1053f	4.3418f	4.2150f	14.6974f	15.0922f
cgd	3.3567f	7.901e-16	2.256e-16	6.795e-16	2.3704f	7.901e-16

subckt element	0:mbc19	0:mbc20	0:mbc21	0:mbc22	0:mbc23	0:mbc24
model	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	79.4885n	79.4891n	-11.1888u	-11.1888u	10.9367u	10.9367u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	599.1893m	600.8107m	-1.0352	-994.8542m	999.4481m	1.0364
vds	898.6170m	600.8107m	-205.1458m	-962.6332m	734.3263m	200.5519m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	680.5791m	680.7060m	-656.3022m	-655.6762m	680.6491m	680.8766m
vdsat	45.1847m	45.4111m	-317.6832m	-288.1320m	254.4847m	278.3745m
beta	268.1452u	268.1197u	223.8471u	225.3688u	255.1220u	253.6363u
gam eff	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	1.6846u	1.6849u	40.8504u	59.4787u	59.8529u	43.2396u
gds	8.8679n	9.5681n	28.5254u	371.5864n	600.0216n	25.4585u
gmb	564.3849n	564.3480n	15.0331u	20.8082u	19.1299u	14.3648u
cdtot	2.269e-16	2.269e-16	3.0400f	7.944e-16	2.263e-16	4.521e-16
cgtot	2.5067f	2.5165f	18.4219f	17.4745f	5.2506f	5.3446f
cstot	4.834e-16	4.938e-16	11.1416f	11.3124f	3.1697f	3.1540f
cbtot	1.8145f	1.8145f	6.4061f	6.2364f	1.9056f	1.9171f
cgs	5.761e-16	5.903e-16	14.6672f	15.0944f	4.3394f	4.3020f
cgd	2.268e-16	2.268e-16	2.4708f	7.901e-16	2.256e-16	3.901e-16

subckt element	0:mv1	0:mv2	0:mv3	0:mv4	0:mv5	0:mv6
model	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-11.0686u	-11.0686u	11.0686u	-11.0597u	11.0597u	11.0597u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0352	-991.8998m	1.0051	-1.0032	994.4943m	1.0364
vds	-208.1002m	-1.7868	1.0051	-1.0032	1.7913	205.5057m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-656.4845m	-655.1800m	680.6459m	-656.2084m	680.1986m	680.8744m
vdsat	-317.5208m	-286.2832m	258.0825m	-293.8308m	251.5405m	278.3759m
beta	219.9738u	221.6025u	247.3596u	213.3773u	255.3394u	253.6364u
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	40.6918u	59.3187u	59.5364u	57.5319u	60.9202u	44.1807u
gds	27.2891u	275.3195n	438.6147n	360.6624n	323.0488n	24.1907u
gmb	14.9525u	20.7636u	19.0097u	20.1142u	19.4575u	14.6458u
cdtot	2.6083f	7.807e-16	2.196e-16	7.532e-16	2.263e-16	2.263e-16
cgtot	17.9514f	17.1787f	5.1056f	16.5873f	5.2505f	5.2508f
cstot	10.9838f	11.1146f	3.0758f	10.7262f	3.1689f	3.1702f
cbtot	6.2671f	6.1368f	1.8580f	5.9248f	1.9065f	1.8986f
cgs	14.5003f	14.8277f	4.2123f	14.3187f	4.3372f	4.3473f
cgd	2.1379f	7.765e-16	2.190e-16	7.492e-16	2.256e-16	2.256e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:mv7	0:mv8	0:mv9	0:mv10	0:mv11	0:mv12
element	0:pms	0:pms	0:nmos	0:pms	0:nmos	0:nmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-22.4298u	-22.4298u	21.9393u	-21.0788u	21.3624u	21.3624u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0352	-990.9607m	1.2000	-1.2000	994.3482m	1.0364
vds	-209.0393m	-1.5910	1.2000	-1.2000	1.5943	205.6518m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-649.8609m	-648.7190m	681.0657m	-657.8541m	677.3065m	677.8983m
vdsat	-323.2316m	-291.0852m	382.1754m	-439.0721m	254.8155m	281.9344m
beta	433.1439u	436.4110u	207.9887u	174.5952u	485.3857u	482.1416u
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	684.9772m	636.6611m	636.6611m
gm	80.5263u	118.3179u	73.8295u	70.5591u	116.8971u	84.1522u
gds	56.0212u	591.2311n	660.4142n	643.2062n	648.4421n	47.6003u
gmb	29.6363u	41.4027u	23.1082u	24.2328u	37.3038u	27.8824u
cdtot	5.8846f	1.5355f	1.904e-16	6.366e-16	4.300e-16	6.696e-16
cgtot	35.2929f	33.4496f	4.4714f	14.0735f	9.6615f	9.7629f
cstot	21.5364f	21.8625f	2.6661f	9.0652f	6.0209f	6.0068f
cbtot	12.0695f	11.7479f	1.6236f	4.9441f	3.3243f	3.3290f
cgs	28.3347f	29.1494f	3.6839f	12.2189f	8.2242f	8.1961f
cgd	4.7901f	1.5273f	1.898e-16	6.332e-16	4.287e-16	6.036e-16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

## ผลการจำลองการทำงานวงจรขยายสัญญาณแบบป้อนกลับกระแสที่นำเสนอกจากการเลย์เอาต์ (Layout) ด้วยโปรแกรม HSPICE

```

1 ***** Star-HSPICE -- 2001.4 (20011215) 12:47:50 03/06/2005 pcnt
*****
***** cfoa level 49 *****
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000
*****
**** operating point status is all simulation time is 0.
node =voltage node =voltage node =voltage
+0:13 =-475.1354m 0:14 = 472.6498m 0:15 = 861.0023m
+0:16 =-852.8366m 0:17 = 853.3438m 0:18 =-849.1318m
+0:23 = -1.4642 0:24 = 405.9958m 0:25 = 466.3752m
+0:26 = -1.2247 0:27 = 1.2191 0:28 =-435.5184m
+0:aa = 1.0881 0:ai = -1.0289 0:ao =-957.0061m
+0:b1 = 67.2640m 0:b2 = -82.3659m 0:b3 = 352.6595m
+0:b4 =-583.7012m 0:bb = -1.2019 0:bc2 =-927.1181m
+0:bc3 = 286.4410m 0:bc4 = 298.3023m 0:bc5 = 1.4933
+0:cc = 1.0097 0:ci = 1.0350 0:co = 54.9426m
+0:cs1 =-476.5591m 0:cs10 = 1.2996 0:cs11 = -1.2873
+0:cs12 = 1.2978 0:cs13 = -1.2873 0:cs14 = 1.2968
+0:cs2 = 462.5785m 0:cs3 = -1.2926 0:cs4 = 1.2996
+0:cs5 = -1.2898 0:cs6 = 1.3007 0:cs7 = -1.3017
+0:cs8 = 1.3088 0:cs9 = -1.2979 0:csb1 =-299.7712m
+0:csb2 = 307.2103m 0:dd = -1.2353 0:g10 = 504.1612m
+0:g9 =-496.2334m 0:mr = -1.0444 0:vdd = 1.5000
+0:vi+ = 0. 0:vi- = 543.6077u 0:vo = -1.0309
+0:vss = -1.5000

**** voltage sources
subckt
element 0:vdd 0:vss 0:vin
volts 1.5000 -1.5000 0.
current -11.2219m 11.2207m 0.
power 16.8328m 16.8311m 0.

total voltage source power dissipation= 33.6639m watts

**** resistors
subckt
element 0:r26
r value 650.0000
v drop -6.6977m
current -10.3042u
power 69.0145n

**** mosfets

subckt
element 0:m9 0:m10 0:m11 0:m12 0:m13 0:m14
model 0:pmos 0:pmos 0:pmos 0:pmos 0:pmos 0:pmos
region cutoff cutoff cutoff cutoff cutoff saturati
id 3.711e-20 -3.711e-20 3.711e-20 -3.711e-20 3.711e-20 -81.7960u
ibs 0. 0. 0. 0. 0. 0.
ibd 0. 0. 0. 0. 0. 0.
vgs 1.7289 449.2186m 1.7289 449.2186m 1.7289 -1.0993
vds 1.2797 -1.2797 1.2797 -1.2797 1.2797 -1.5549
vbs 1.2797 0. 1.2797 0. 1.2797 0.
vth -643.4836m -643.4836m -643.4836m -643.4836m -643.4836m -643.2562m
vdsat -37.8103m -37.8103m -37.8103m -37.8103m -37.8103m -376.5871m
beta 1.0022m 1.0022m 1.0022m 1.0022m 1.0022m 927.6975u
gam eff 684.9772m 684.9772m 684.9772m 684.9772m 684.9772m 684.9772m
gm 1.114e-18 1.114e-18 1.114e-18 1.114e-18 1.114e-18 325.8026u

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

gds	1.657e-21	1.657e-21	1.657e-21	1.657e-21	1.657e-21	2.1545u
gmb	5.511e-19	5.511e-19	5.511e-19	5.511e-19	5.511e-19	112.8972u
cdtot	3.3376f	3.3376f	3.3376f	3.3376f	3.3376f	3.3199f
cgto	45.8592f	45.8592f	45.8592f	45.8592f	45.8592f	71.9139f
cstot	3.3376f	3.3376f	3.3376f	3.3376f	3.3376f	47.2701f
cbtot	39.1826f	39.1826f	39.1826f	39.1826f	39.1826f	24.6776f
cgs	3.3376f	3.3389f	3.3376f	3.3389f	3.3376f	63.3391f
cgd	3.3389f	3.3376f	3.3389f	3.3376f	3.3389f	3.3021f

subckt						
element	0:m15	0:m16	0:m17	0:m18	0:m19	0:m20
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff
id	81.7960u	-81.7960u	81.7960u	-81.7960u	43.3833p	-43.3833p
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	455.6211m	-1.0993	455.6211m	-1.0993	0.	-280.8676m
vds	1.5549	-1.5549	1.5549	-1.5549	280.8676m	-280.8676m
vbs	1.5549	0.	1.5549	0.	280.8676m	0.
vth	-643.2562m	-643.2562m	-643.2562m	-643.2562m	-649.9990m	-649.9990m
vdsat	-376.5871m	-376.5871m	-376.5871m	-376.5871m	-37.7603m	-37.7603m
beta	927.6975u	927.6975u	927.6975u	927.6975u	452.1494u	452.1494u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	325.8026u	325.8026u	325.8026u	325.8026u	1.2887n	1.2887n
gds	2.1545u	2.1545u	2.1545u	2.1545u	3.0005p	3.0005p
gmb	112.8972u	112.8972u	112.8972u	112.8972u	508.5477p	508.5477p
cdtot	47.2701f	3.3199f	47.2701f	3.3199f	1.5095f	1.5092f
cgto	71.9139f	71.9139f	71.9139f	71.9139f	14.6164f	14.6164f
cstot	3.3199f	47.2701f	3.3199f	47.2701f	1.5092f	1.5095f
cbtot	24.6776f	24.6776f	24.6776f	24.6776f	11.5974f	11.5974f
cgs	3.3021f	63.3391f	3.3021f	63.3391f	1.5092f	1.5100f
cgd	63.3391f	3.3021f	63.3391f	3.3021f	1.5100f	1.5092f

subckt						
element	0:m21	0:m22	0:m23	0:m24	0:m25	0:m27
model	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos
region	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Saturati
id	-10.9910u	2.9900f	-2.9900f	-17.1847n	17.1847n	-11.1040u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-990.5571m	-87.3728m	-2.5444	-962.6085m	460.7728m	-993.5172m
vds	-1.7940	2.4570	-2.4570	-1.4234	1.4234	-948.0681m
vbs	0.	0.	-2.4570	-1.4234	0.	0.
vth	-655.1740m	671.6732m	671.6732m	672.1137m	672.1137m	-655.6883m
vdsat	-285.2910m	37.3803m	37.3803m	37.8479m	37.8479m	-287.1305m
beta	221.6521u	1.1656m	1.1656m	1.1653m	1.1653m	225.4183u
gam eff	684.9772m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m
gm	59.1276u	86.8543f	86.8543f	446.7941n	446.7941n	59.2519u
gds	272.9458n	3.092e-16	3.092e-16	1.9944n	1.9944n	371.2410n
gmb	20.6990u	37.1168f	37.1168f	154.3555n	154.3555n	20.7309u
cdtot	7.807e-16	9.816e-16	9.816e-16	1.0098f	9.816e-16	7.944e-16
cgto	17.1787f	10.9213f	10.9213f	8.9324f	8.9324f	17.4745f
cstot	11.1146f	9.816e-16	9.816e-16	9.816e-16	1.0098f	11.3124f
cbtot	6.1377f	8.9577f	8.9577f	6.9443f	6.9443f	6.2374f
cgs	14.8267f	9.819e-16	9.816e-16	9.816e-16	1.0192f	15.0934f
cgd	7.765e-16	9.816e-16	9.819e-16	1.0192f	9.816e-16	7.901e-16

subckt						
element	0:m28	0:m29	0:m30	0:m31	0:m32	0:m33
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-11.1376u	-20.5682u	-22.2678u	-11.1389u	501.9273n	-501.9273n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-992.4064m	-1.1928	-989.5617m	-992.3611m	1.3970	-657.0401m
vds	-1.2324	-1.1928	-1.5965	-1.2446	2.0541	-2.0541
vbs	0.	0.	0.	0.	2.0541	0.
vth	-655.4534m	-657.8600m	-648.7144m	-655.4432m	-651.2264m	-651.2264m
vdsat	-286.4803m	-433.6715m	-290.0474m	-286.4542m	-68.2929m	-68.2929m
beta	225.4686u	174.7974u	436.5127u	225.4706u	335.8691u	335.8691u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	59.6109u	69.7863u	117.9247u	59.6253u	9.3367u	9.3367u
gds	331.7259n	628.7948n	586.1419n	330.2782n	17.5685n	17.5685n
gmb	20.8639u	23.9837u	41.2699u	20.8692u	3.3636u	3.3636u

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนการนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cdtot	7.944e-16	6.366e-16	1.5355f	7.944e-16	9.2463f	1.1265f
cgtot	17.4745f	14.0735f	33.4496f	17.4745f	17.9397f	17.9397f
cstot	11.3116f	9.0652f	21.8625f	11.3116f	1.1265f	9.2463f
cbtot	6.2383f	4.9483f	11.7498f	6.2383f	8.4828f	8.4828f
cgs	15.0912f	12.2148f	29.1473f	15.0911f	1.1233f	11.9602f
cgd	7.901e-16	6.332e-16	1.5273f	7.901e-16	11.9602f	1.1233f

subckt						
element	0:m34	0:m35	0:m36	0:m37	0:m38	0:m39
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	saturati	saturati	saturati	saturati	saturati	saturati
id	501.9273n	-501.9273n	501.9273n	-501.9273n	501.9273n	-10.5297u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.3970	-657.0401m	1.3970	-657.0401m	1.3970	-1.2353
vds	2.0541	-2.0541	2.0541	-2.0541	2.0541	-583.7012m
vbs	2.0541	0.	2.0541	0.	2.0541	0.
vth	-651.2264m	-651.2264m	-651.2264m	-651.2264m	-651.2264m	-666.2136m
vdsat	-68.2929m	-68.2929m	-68.2929m	-68.2929m	-68.2929m	-456.3344m
beta	335.8691u	335.8691u	335.8691u	335.8691u	335.8691u	81.8886u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	9.3367u	9.3367u	9.3367u	9.3367u	9.3367u	33.2037u
gds	17.5685n	17.5685n	17.5685n	17.5685n	17.5685n	816.7100n
gmb	3.3636u	3.3636u	3.3636u	3.3636u	3.3636u	11.3667u
cdtot	9.2463f	1.1265f	9.2463f	1.1265f	9.2463f	3.007e-16
cgtot	17.9397f	17.9397f	17.9397f	17.9397f	17.9397f	6.8318f
cstot	1.1265f	9.2463f	1.1265f	9.2463f	1.1265f	4.2823f
cbtot	8.4828f	8.4828f	8.4828f	8.4828f	8.4828f	2.4990f
cgs	1.1233f	11.9602f	1.1233f	11.9602f	1.1233f	5.7932f
cgd	11.9602f	1.1233f	11.9602f	1.1233f	11.9602f	2.990e-16

subckt						
element	0:m40	0:m41	0:m42	0:m43	0:m44	0:m45
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	501.9304n	-501.9304n	501.9304n	-501.9304n	501.9304n	-501.9304n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-156.3557m	-646.6562m	-156.3557m	-646.6562m	-156.3557m	-646.6562m
vds	490.3004m	-490.3004m	490.3004m	-490.3004m	490.3004m	-490.3004m
vbs	490.3004m	0.	490.3004m	0.	490.3004m	0.
vth	-650.4590m	-650.4590m	-650.4590m	-650.4590m	-650.4590m	-650.4590m
vdsat	-64.6781m	-64.6781m	-64.6781m	-64.6781m	-64.6781m	-64.6781m
beta	418.3865u	418.3865u	418.3865u	418.3865u	418.3865u	418.3865u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	9.5987u	9.5987u	9.5987u	9.5987u	9.5987u	9.5987u
gds	24.8017n	24.8017n	24.8017n	24.8017n	24.8017n	24.8017n
gmb	3.4649u	3.4649u	3.4649u	3.4649u	3.4649u	3.4649u
cdtot	10.1757f	1.4022f	10.1757f	1.4022f	10.1757f	1.4022f
cgtot	20.9406f	20.9406f	20.9406f	20.9406f	20.9406f	20.9406f
cstot	1.4022f	10.1757f	1.4022f	10.1757f	1.4022f	10.1757f
cbtot	10.3751f	10.3751f	10.3751f	10.3751f	10.3751f	10.3751f
cgs	1.3988f	13.0967f	1.3988f	13.0967f	1.3988f	13.0967f
cgd	13.0967f	1.3988f	13.0967f	1.3988f	13.0967f	1.3988f

subckt						
element	0:m46	0:m47	0:m48	0:m49	0:m50	0:m51
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	saturati	saturati	saturati	saturati	saturati
id	501.9304n	-11.1040u	27.3252u	-27.3252u	27.3252u	-27.3252u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-156.3557m	-1.0374	901.8936m	-1.0336	901.8936m	-1.0336
vds	490.3004m	-199.2725m	1.9355	-1.9355	1.9355	-1.9355
vbs	490.3004m	0.	1.9355	0.	1.9355	0.
vth	-650.4590m	-656.3070m	-648.6317m	-648.6317m	-648.6317m	-648.6317m
vdsat	-64.6781m	-319.3087m	-322.9301m	-322.9301m	-322.9301m	-322.9301m
beta	418.3865u	223.7662u	423.6627u	423.6627u	423.6627u	423.6627u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	9.5987u	39.7253u	128.6734u	128.6734u	128.6734u	128.6734u
gds	24.8017n	30.3761u	642.3386n	642.3386n	642.3386n	642.3386n
gmb	3.4649u	14.6704u	44.8610u	44.8610u	44.8610u	44.8610u
cdtot	10.1757f	3.8549f	21.3726f	1.5012f	21.3726f	1.5012f
cgtot	20.9406f	18.7105f	32.7105f	32.7105f	32.7105f	32.7105f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในข้อมูลทั้งหมดโดยบริษัทไอทีเอส จำกัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cstot	1.4022f	11.0578f	1.5012f	21.3726f	1.5012f	21.3726f
cbtot	10.3751f	6.4780f	11.4346f	11.4346f	11.4346f	11.4346f
cgs	1.3988f	14.4695f	1.4931f	28.5541f	1.4931f	28.5541f
cgd	13.0967f	3.1038f	28.5541f	1.4931f	28.5541f	1.4931f

subckt						
element	0:m52	0:m53	0:m54	0:m55	0:m56	0:m57
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	saturati	Cutoff	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati
id	-10.4134u	43.3833p	-43.3833p	-10.9910u	-22.2679u	-11.1389u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0336	0.	-280.8676m	-1.0374	-1.0374	-1.0374
vds	-1.0336	280.8676m	-280.8676m	-202.2326m	-203.2280m	-200.4285m
vbs	0.	280.8676m	0.	0.	0.	0.
vth	-658.3469m	-649.9990m	-649.9990m	-656.4893m	-649.8657m	-656.3061m
vdsat	-314.5325m	-37.7603m	-37.7603m	-319.1461m	-324.8615m	-319.3094m
beta	173.5717u	452.1494u	452.1494u	219.8943u	432.9872u	223.7663u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	50.2118u	1.2887n	1.2887n	39.5926u	78.3669u	39.9463u
gds	335.1134n	3.0005p	3.0005p	29.0984u	59.5745u	30.0926u
gmb	17.5107u	508.5477p	508.5477p	14.5994u	28.9415u	14.7436u
cdtot	6.160e-16	1.5095f	1.5092f	3.4503f	7.4136f	3.7274f
cgtot	13.6298f	14.6164f	14.6164f	18.3016f	35.9283f	18.7066f
cstot	8.7724f	1.5092f	1.5095f	10.9030f	21.3797f	11.0718f
cbtot	4.8889f	11.5974f	11.5974f	6.3412f	12.2040f	6.4664f
cgs	11.7312f	1.5092f	1.5100f	14.3046f	27.9642f	14.5019f
cgd	6.127e-16	1.5100f	1.5092f	2.7858f	5.9806f	3.0038f

subckt						
element	0:m58	0:m59	0:m60	0:m61	0:m62	0:m63
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-10.6061u	-10.6395u	-10.3042u	-10.3042u	-10.0624u	-10.0624u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0374	-995.8388m	-1.2069	-1.2254	-1.2136	-1.2136
vds	-1.0374	-995.8388m	-1.1950	-774.8614m	-1.2136	-1.2136
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	-658.3437m	-656.2144m	-665.2747m	-666.0557m	-665.6932m	-665.6932m
vdsat	-317.3562m	-288.3882m	-436.0866m	-449.0901m	-440.5344m	-440.5344m
beta	173.4633u	213.6360u	86.0213u	82.0200u	82.1805u	82.1805u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	50.6421u	56.4921u	34.5323u	33.3403u	33.3340u	33.3340u
gds	340.7899n	348.1319n	315.0637n	420.6518n	305.4928n	305.4928n
gmb	17.6549u	19.7632u	11.8570u	11.4139u	11.4388u	11.4388u
cdtot	6.160e-16	7.532e-16	3.144e-16	3.007e-16	3.007e-16	3.007e-16
cgtot	13.6298f	16.5872f	7.1270f	6.8318f	6.8318f	6.8318f
cstot	8.7724f	10.7261f	4.4766f	4.2821f	4.2816f	4.2816f
cbtot	4.8867f	5.9298f	2.6062f	2.5018f	2.5051f	2.5051f
cgs	11.7333f	14.3136f	6.0466f	5.7901f	5.7860f	5.7860f
cgd	6.127e-16	7.492e-16	3.127e-16	2.990e-16	2.990e-16	2.990e-16

subckt						
element	0:m64	0:m65	0:m66	0:m67	0:m68	0:m69
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Saturati
id	1.0829u	-1.0829u	1.0829u	-1.0829u	1.0829u	20.5682u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	651.6096m	460.6777m	651.6096m	460.6777m	651.6096m	1.0234
vds	190.9319m	-190.9319m	190.9319m	-190.9319m	190.9319m	212.7334m
vbs	0.	-190.9319m	0.	-190.9319m	0.	0.
vth	672.6389m	672.6389m	672.6389m	672.6389m	672.6389m	677.8953m
vdsat	59.3870m	59.3870m	59.3870m	59.3870m	59.3870m	273.4975m
beta	1.1593m	1.1593m	1.1593m	1.1593m	1.1593m	483.1219u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	20.5644u	20.5644u	20.5644u	20.5644u	20.5644u	86.4782u
gds	253.5418n	253.5418n	253.5418n	253.5418n	253.5418n	39.7051u
gmb	6.8319u	6.8319u	6.8319u	6.8319u	6.8319u	28.4926u
cdtot	9.807e-16	5.4944f	9.807e-16	5.4944f	9.807e-16	4.300e-16
cgtot	13.0914f	13.0914f	13.0914f	13.0914f	13.0914f	9.6618f
cstot	5.4944f	9.807e-16	5.4944f	9.807e-16	5.4944f	6.0231f
cbtot	6.8795f	6.8795f	6.8795f	6.8795f	6.8795f	3.3140f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นใช้ประโยชน์อื่นใดการคัดลอกหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cgs	7.1444f	9.797e-16	7.1444f	9.797e-16	7.1444f	8.2381f
cgd	9.797e-16	7.1444f	9.797e-16	7.1444f	9.797e-16	4.287e-16
subckt						
element	0:m70	0:m71	0:m72	0:m73	0:m74	0:m75
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	10.6061u	10.3042u	10.0624u	-3.4597u	3.4597u	-3.4597u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.0234	1.0234	1.0234	-962.6085m	460.7728m	-962.6085m
vds	1.9626	1.0234	572.8819m	-1.4234	1.4234	-1.4234
vbs	0.	0.	0.	0.	1.4234	0.
vth	680.8104m	681.2106m	681.4026m	412.9699m	412.9699m	412.9699m
vdsat	269.5625m	269.3047m	269.1810m	69.7531m	69.7531m	69.7531m
beta	209.3293u	209.3161u	209.3098u	1.2489m	1.2489m	1.2489m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.7846m	636.7846m	636.7846m
gm	53.7293u	52.6407u	51.3445u	51.1462u	51.1462u	51.1462u
gds	284.3631n	396.0506n	813.8088n	238.6196n	238.6196n	238.6196n
gmb	17.1180u	16.7852u	16.3934u	4.6621u	4.6621u	4.6621u
cdtot	1.864e-16	1.864e-16	1.864e-16	8.9874f	9.816e-16	8.9874f
cg tot	4.3854f	4.3854f	4.3854f	19.7404f	19.7404f	19.7404f
cstot	2.6100f	2.6106f	2.6109f	9.816e-16	8.9874f	9.816e-16
cbtot	1.6244f	1.6244f	1.6244f	1.9122f	1.9122f	1.9122f
cgs	3.5790f	3.5799f	3.5803f	9.816e-16	18.1085f	9.816e-16
cgd	1.858e-16	1.858e-16	1.858e-16	18.1085f	9.816e-16	18.1085f

subckt						
element	0:m76	0:m77	0:m78	0:m79	0:m80	0:m81
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff
id	-27.3252u	27.3252u	-27.3252u	27.3252u	2.9900f	-2.9900f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	1.0645	0.	1.0645	-87.3728m	-2.5444
vds	-1.0645	1.0645	-1.0645	1.0645	2.4570	-2.4570
vbs	-1.0645	0.	-1.0645	0.	0.	-2.4570
vth	677.9788m	677.9788m	677.9788m	677.9788m	671.6732m	671.6732m
vdsat	299.9424m	299.9424m	299.9424m	299.9424m	37.3803m	37.3803m
beta	441.8872u	441.8872u	441.8872u	441.8872u	1.1656m	1.1656m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	123.8500u	123.8500u	123.8500u	123.8500u	86.8543f	86.8543f
gds	984.5699n	984.5699n	984.5699n	984.5699n	3.092e-16	3.092e-16
gmb	39.2571u	39.2571u	39.2571u	39.2571u	37.1168f	37.1168f
cdtot	5.5438f	3.958e-16	5.5438f	3.958e-16	9.816e-16	9.816e-16
cg tot	8.9227f	8.9227f	8.9227f	8.9227f	10.9213f	10.9213f
cstot	3.958e-16	5.5438f	3.958e-16	5.5438f	9.816e-16	9.816e-16
cbtot	3.0634f	3.0634f	3.0634f	3.0634f	8.9577f	8.9577f
cgs	3.947e-16	7.5978f	3.947e-16	7.5978f	9.819e-16	9.816e-16
cgd	7.5978f	3.947e-16	7.5978f	3.947e-16	9.816e-16	9.819e-16

subckt						
element	0:m82	0:m83	0:m84	0:m85	0:m86	0:m87
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	2.9900f	10.9910u	20.5682u	22.2679u	20.0699u	-20.0699u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-87.3728m	1.0038	987.4954m	1.2002	-553.8124m	-1.0295
vds	2.4570	1.0038	1.5945	1.2002	475.6790m	-475.6790m
vbs	0.	0.	0.	0.	475.6790m	0.
vth	671.6732m	680.6464m	677.3065m	681.0193m	-651.9563m	-651.9563m
vdsat	37.3803m	257.2372m	250.3118m	382.3919m	-317.1544m	-317.1544m
beta	1.1656m	247.4101u	485.9107u	210.8732u	336.5543u	336.5543u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m
gm	86.8543f	59.3465u	114.8972u	74.8938u	95.6641u	95.6641u
gds	3.092e-16	436.5062n	632.3556n	670.1365n	1.3749u	1.3749u
gmb	37.1168f	18.9516u	36.6920u	23.4390u	33.3396u	33.3396u
cdtot	9.816e-16	2.196e-16	4.300e-16	1.930e-16	16.9823f	1.1924f
cg tot	10.9213f	5.1056f	9.6614f	4.5288f	26.0537f	26.0537f
cstot	9.816e-16	3.0758f	6.0208f	2.7031f	1.1924f	16.9823f
cbtot	8.9577f	1.8582f	3.3267f	1.6415f	9.1554f	9.1554f
cgs	9.819e-16	4.2121f	8.2216f	3.7350f	1.1860f	22.6899f
cgd	9.816e-16	2.190e-16	4.287e-16	1.924e-16	22.6899f	1.1860f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดให้ใช้โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m88	0:m89	0:m90	0:m91	0:m92	0:m93
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	20.0699u	-20.0699u	20.0699u	-20.0699u	20.0699u	-20.0699u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-553.8124m	-1.0295	-553.8124m	-1.0295	-553.8124m	-1.0295
vds	475.6790m	-475.6790m	475.6790m	-475.6790m	475.6790m	-475.6790m
vbs	475.6790m	0.	475.6790m	0.	475.6790m	0.
vth	-651.9563m	-651.9563m	-651.9563m	-651.9563m	-651.9563m	-651.9563m
vdsat	-317.1544m	-317.1544m	-317.1544m	-317.1544m	-317.1544m	-317.1544m
beta	336.5543u	336.5543u	336.5543u	336.5543u	336.5543u	336.5543u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	95.6641u	95.6641u	95.6641u	95.6641u	95.6641u	95.6641u
gds	1.3749u	1.3749u	1.3749u	1.3749u	1.3749u	1.3749u
gmb	33.3396u	33.3396u	33.3396u	33.3396u	33.3396u	33.3396u
cdtot	16.9823f	1.1924f	16.9823f	1.1924f	16.9823f	1.1924f
cgctot	26.0537f	26.0537f	26.0537f	26.0537f	26.0537f	26.0537f
csctot	1.1924f	16.9823f	1.1924f	16.9823f	1.1924f	16.9823f
cbtot	9.1554f	9.1554f	9.1554f	9.1554f	9.1554f	9.1554f
cgs	1.1860f	22.6899f	1.1860f	22.6899f	1.1860f	22.6899f
cgd	22.6899f	1.1860f	22.6899f	1.1860f	22.6899f	1.1860f

subckt	0:m94	0:m95	0:m96	0:m97	0:m98	0:m99
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	20.0699u	-20.0699u	11.5112u	-11.5112u	11.5112u	-11.5112u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-553.8124m	-1.0295	-562.3118m	-1.0274	-562.3118m	-1.0274
vds	475.6790m	-475.6790m	465.0384m	-465.0384m	465.0384m	-465.0384m
vbs	475.6790m	0.	465.0384m	0.	465.0384m	0.
vth	-651.9563m	-651.9563m	-657.2544m	-657.2544m	-657.2544m	-657.2544m
vdsat	-317.1544m	-317.1544m	-310.9382m	-310.9382m	-310.9382m	-310.9382m
beta	336.5543u	336.5543u	200.8768u	200.8768u	200.8768u	200.8768u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	95.6641u	95.6641u	55.9349u	55.9349u	55.9349u	55.9349u
gds	1.3749u	1.3749u	813.5262n	813.5262n	813.5262n	813.5262n
gmb	33.3396u	33.3396u	19.5048u	19.5048u	19.5048u	19.5048u
cdtot	16.9823f	1.1924f	10.1415f	7.120e-16	10.1415f	7.120e-16
cgctot	26.0537f	26.0537f	15.7001f	15.7001f	15.7001f	15.7001f
csctot	1.1924f	16.9823f	7.120e-16	10.1415f	7.120e-16	10.1415f
cbtot	9.1554f	9.1554f	5.6033f	5.6033f	5.6033f	5.6033f
cgs	1.1860f	22.6899f	7.082e-16	13.5556f	7.082e-16	13.5556f
cgd	22.6899f	1.1860f	13.5556f	7.082e-16	13.5556f	7.082e-16

subckt	0:m100	0:m101	0:m102	0:m103	0:m104	0:m105
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	11.5112u	-11.5112u	11.5112u	-11.5112u	19.0378u	-19.0378u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-562.3118m	-1.0274	-562.3118m	-1.0274	-615.4104m	-1.0274
vds	465.0384m	-465.0384m	465.0384m	-465.0384m	411.9398m	-411.9398m
vbs	465.0384m	0.	465.0384m	0.	411.9398m	0.
vth	-657.2544m	-657.2544m	-657.2544m	-657.2544m	-652.3482m	-652.3482m
vdsat	-310.9382m	-310.9382m	-310.9382m	-310.9382m	-315.2300m	-315.2300m
beta	200.8768u	200.8768u	200.8768u	200.8768u	325.0265u	325.0265u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	55.9349u	55.9349u	55.9349u	55.9349u	90.7244u	90.7244u
gds	813.5262n	813.5262n	813.5262n	813.5262n	2.2145u	2.2145u
gmb	19.5048u	19.5048u	19.5048u	19.5048u	31.6571u	31.6571u
cdtot	10.1415f	7.120e-16	10.1415f	7.120e-16	16.3961f	1.1512f
cgctot	15.7001f	15.7001f	15.7001f	15.7001f	25.1662f	25.1662f
csctot	7.120e-16	10.1415f	7.120e-16	10.1415f	1.1512f	16.3961f
cbtot	5.6033f	5.6033f	5.6033f	5.6033f	8.8531f	8.8531f
cgs	7.082e-16	13.5556f	7.082e-16	13.5556f	1.1450f	21.9052f
cgd	13.5556f	7.082e-16	13.5556f	7.082e-16	21.9052f	1.1450f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:m106	0:m107	0:m108	0:m109	0:m110	0:m111
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	19.0378u	-19.0378u	19.0378u	-19.0378u	19.0378u	-19.0378u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-615.4104m	-1.0274	-615.4104m	-1.0274	-615.4104m	-1.0274
vds	411.9398m	-411.9398m	411.9398m	-411.9398m	411.9398m	-411.9398m
vbs	411.9398m	0.	411.9398m	0.	411.9398m	0.
vth	-652.3482m	-652.3482m	-652.3482m	-652.3482m	-652.3482m	-652.3482m
vdsat	-315.2300m	-315.2300m	-315.2300m	-315.2300m	-315.2300m	-315.2300m
beta	325.0265u	325.0265u	325.0265u	325.0265u	325.0265u	325.0265u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	90.7244u	90.7244u	90.7244u	90.7244u	90.7244u	90.7244u
gds	2.2145u	2.2145u	2.2145u	2.2145u	2.2145u	2.2145u
gmb	31.6571u	31.6571u	31.6571u	31.6571u	31.6571u	31.6571u
cdtot	16.3961f	1.1512f	16.3961f	1.1512f	16.3961f	1.1512f
cgtot	25.1662f	25.1662f	25.1662f	25.1662f	25.1662f	25.1662f
cstot	1.1512f	16.3961f	1.1512f	16.3961f	1.1512f	16.3961f
cbtot	8.8531f	8.8531f	8.8531f	8.8531f	8.8531f	8.8531f
cgs	1.1450f	21.9052f	1.1450f	21.9052f	1.1450f	21.9052f
cgd	21.9052f	1.1450f	21.9052f	1.1450f	21.9052f	1.1450f

subckt element	0:m112	0:m113	0:m114	0:m115	0:m116	0:m117
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Saturati
id	19.0378u	-19.0378u	501.9304n	501.9304n	-501.9304n	20.0699u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-615.4104m	-1.0274	-156.3557m	-156.3557m	-646.6562m	0.
vds	411.9398m	-411.9398m	490.3004m	490.3004m	-490.3004m	1.0249
vbs	411.9398m	0.	490.3004m	490.3004m	0.	1.0249
vth	-652.3482m	-652.3482m	-650.4590m	-650.4590m	-650.4590m	-651.5025m
vdsat	-315.2300m	-315.2300m	-64.6781m	-64.6781m	-64.6781m	-314.0442m
beta	325.0265u	325.0265u	418.3865u	418.3865u	418.3865u	336.8367u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	90.7244u	90.7244u	9.5987u	9.5987u	9.5987u	97.2467u
gds	2.2145u	2.2145u	24.8017n	24.8017n	24.8017n	648.6800n
gmb	31.6571u	31.6571u	3.4649u	3.4649u	3.4649u	33.9243u
cdtot	16.3961f	1.1512f	10.1757f	10.1757f	1.4022f	16.9799f
cgtot	25.1662f	25.1662f	20.9406f	20.9406f	20.9406f	26.0537f
cstot	1.1512f	16.3961f	1.4022f	1.4022f	10.1757f	1.1924f
cbtot	8.8531f	8.8531f	10.3751f	10.3751f	10.3751f	9.1607f
cgs	1.1450f	21.9052f	1.3988f	1.3988f	13.0967f	1.1860f
cgd	21.9052f	1.1450f	13.0967f	13.0967f	1.3988f	22.6807f

subckt element	0:m118	0:m119	0:m120	0:m121	0:m122	0:m123
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-20.0699u	20.0699u	-20.0699u	20.0699u	-20.0699u	20.0699u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0249	0.	-1.0249	0.	-1.0249	0.
vds	-1.0249	1.0249	-1.0249	1.0249	-1.0249	1.0249
vbs	0.	1.0249	0.	1.0249	0.	1.0249
vth	-651.5025m	-651.5025m	-651.5025m	-651.5025m	-651.5025m	-651.5025m
vdsat	-314.0442m	-314.0442m	-314.0442m	-314.0442m	-314.0442m	-314.0442m
beta	336.8367u	336.8367u	336.8367u	336.8367u	336.8367u	336.8367u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	97.2467u	97.2467u	97.2467u	97.2467u	97.2467u	97.2467u
gds	648.6800n	648.6800n	648.6800n	648.6800n	648.6800n	648.6800n
gmb	33.9243u	33.9243u	33.9243u	33.9243u	33.9243u	33.9243u
cdtot	1.1924f	16.9799f	1.1924f	16.9799f	1.1924f	16.9799f
cgtot	26.0537f	26.0537f	26.0537f	26.0537f	26.0537f	26.0537f
cstot	16.9799f	1.1924f	16.9799f	1.1924f	16.9799f	1.1924f
cbtot	9.1607f	9.1607f	9.1607f	9.1607f	9.1607f	9.1607f
cgs	22.6807f	1.1860f	22.6807f	1.1860f	22.6807f	1.1860f
cgd	1.1860f	22.6807f	1.1860f	22.6807f	1.1860f	22.6807f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m124	0:m125	0:m126	0:m127	0:m128	0:m129
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-20.0699u	20.0699u	-20.0699u	-10.8494u	19.0378u	-19.0378u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0249	0.	-1.0249	-1.0016	1.1116	-1.0208
vds	-1.0249	1.0249	-1.0249	-273.8805m	2.1324	-2.1324
vbs	0.	1.0249	0.	0.	2.1324	0.
vth	-651.5025m	-651.5025m	-651.5025m	-656.2454m	-651.1617m	-651.1617m
vdsat	-314.0442m	-314.0442m	-314.0442m	-292.7423m	-311.2050m	-311.2050m
beta	336.8367u	336.8367u	336.8367u	225.0947u	317.6825u	317.6825u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	97.2467u	97.2467u	97.2467u	51.6487u	93.2848u	93.2848u
gds	648.6800n	648.6800n	648.6800n	8.7862u	425.5025n	425.5025n
gmb	33.9243u	33.9243u	33.9243u	18.3298u	32.5602u	32.5602u
cdtot	1.1924f	16.9799f	1.1924f	7.944e-16	15.9982f	1.1237f
cgto	26.0537f	26.0537f	26.0537f	17.4746f	24.5745f	24.5745f
cstot	16.9799f	1.1924f	16.9799f	11.3144f	1.1237f	15.9982f
cbtot	9.1607f	9.1607f	9.1607f	6.2313f	8.6574f	8.6574f
cgs	22.6807f	1.1860f	22.6807f	15.1029f	1.1177f	21.3642f
cgd	1.1860f	22.6807f	1.1860f	7.901e-16	21.3642f	1.1177f

subckt	0:m130	0:m131	0:m132	0:m133	0:m134	0:m135
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	19.0378u	-19.0378u	19.0378u	-19.0378u	19.0378u	-19.0378u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.1116	-1.0208	1.1116	-1.0208	1.1116	-1.0208
vds	2.1324	-2.1324	2.1324	-2.1324	2.1324	-2.1324
vbs	2.1324	0.	2.1324	0.	2.1324	0.
vth	-651.1617m	-651.1617m	-651.1617m	-651.1617m	-651.1617m	-651.1617m
vdsat	-311.2050m	-311.2050m	-311.2050m	-311.2050m	-311.2050m	-311.2050m
beta	317.6825u	317.6825u	317.6825u	317.6825u	317.6825u	317.6825u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	93.2848u	93.2848u	93.2848u	93.2848u	93.2848u	93.2848u
gds	425.5025n	425.5025n	425.5025n	425.5025n	425.5025n	425.5025n
gmb	32.5602u	32.5602u	32.5602u	32.5602u	32.5602u	32.5602u
cdtot	15.9982f	1.1237f	15.9982f	1.1237f	15.9982f	1.1237f
cgto	24.5745f	24.5745f	24.5745f	24.5745f	24.5745f	24.5745f
cstot	1.1237f	15.9982f	1.1237f	15.9982f	1.1237f	15.9982f
cbtot	8.6574f	8.6574f	8.6574f	8.6574f	8.6574f	8.6574f
cgs	1.1177f	21.3642f	1.1177f	21.3642f	1.1177f	21.3642f
cgd	21.3642f	1.1177f	21.3642f	1.1177f	21.3642f	1.1177f

subckt	0:m136	0:m137	0:m138	0:m139	0:m140	0:m141
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	19.0378u	-19.0378u	501.9273n	501.9273n	-501.9273n	-10.8494u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.1116	-1.0208	1.3970	1.3970	-657.0401m	-1.0374
vds	2.1324	-2.1324	2.0541	2.0541	-2.0541	-191.1579m
vbs	2.1324	0.	2.0541	2.0541	0.	0.
vth	-651.1617m	-651.1617m	-651.2264m	-651.2264m	-651.2264m	-656.3137m
vdsat	-311.2050m	-311.2050m	-68.2929m	-68.2929m	-68.2929m	-319.3037m
beta	317.6825u	317.6825u	335.8691u	335.8691u	335.8691u	223.7660u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	93.2848u	93.2848u	9.3367u	9.3367u	9.3367u	38.1669u
gds	425.5025n	425.5025n	17.5685n	17.5685n	17.5685n	32.3770u
gmb	32.5602u	32.5602u	3.3636u	3.3636u	3.3636u	14.1514u
cdtot	15.9982f	1.1237f	9.2463f	9.2463f	1.1265f	4.6900f
cgto	24.5745f	24.5745f	17.9397f	17.9397f	17.9397f	19.0991f
cstot	1.1237f	15.9982f	1.1265f	1.1265f	9.2463f	10.9569f
cbtot	8.6574f	8.6574f	8.4828f	8.4828f	8.4828f	6.5549f
cgs	1.1177f	21.3642f	1.1233f	1.1233f	11.9602f	14.2440f
cgd	21.3642f	1.1177f	11.9602f	11.9602f	1.1233f	3.7672f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนการนำออกจำหน่าย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt						
element	0:m142	0:m143	0:m144	0:m145	0:m146	0:m147
model	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-11.1376u	-50.1319u	50.1319u	-50.1319u	50.1319u	-50.1319u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0374	562.3118m	1.0344	562.3118m	1.0344	0.
vds	-200.3832m	-472.1062m	472.1062m	-472.1062m	472.1062m	-1.0274
vbs	0.	-472.1062m	0.	-472.1062m	0.	-1.0274
vth	-656.3061m	673.5732m	673.5732m	673.5732m	673.5732m	673.3366m
vdsat	-319.3093m	285.0495m	285.0495m	285.0495m	285.0495m	280.5697m
beta	223.7663u	944.4601u	944.4601u	944.4601u	944.4601u	945.5455u
gam eff	684.9772m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	39.9376u	241.1837u	241.1837u	241.1837u	241.1837u	247.6886u
gds	30.1037u	6.4127u	6.4127u	6.4127u	6.4127u	1.9088u
gmb	14.7408u	76.8565u	76.8565u	76.8565u	76.8565u	78.7883u
cdtot	3.7325f	11.7857f	8.415e-16	11.7857f	8.415e-16	11.7841f
cgtot	18.7087f	18.5629f	18.5629f	18.5629f	18.5629f	18.5628f
cstot	11.0712f	8.415e-16	11.7857f	8.415e-16	11.7857f	8.415e-16
cbtot	6.4669f	6.1631f	6.1631f	6.1631f	6.1631f	6.1679f
cgs	14.5006f	8.390e-16	16.0966f	8.390e-16	16.0966f	8.390e-16
cgd	3.0078f	16.0966f	8.390e-16	16.0966f	8.390e-16	16.0892f

subckt						
element	0:m148	0:m149	0:m150	0:m151	0:m152	0:m153
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	50.1319u	-50.1319u	50.1319u	-23.7808u	23.7808u	-23.7808u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.0274	0.	1.0274	553.8124m	1.0249	553.8124m
vds	1.0274	-1.0274	1.0274	-471.0522m	471.0522m	-471.0522m
vbs	0.	-1.0274	0.	-471.0522m	0.	-471.0522m
vth	673.3366m	673.3366m	673.3366m	677.7852m	677.7852m	677.7852m
vdsat	280.5697m	280.5697m	280.5697m	274.4993m	274.4993m	274.4993m
beta	945.5455u	945.5455u	945.5455u	483.0222u	483.0222u	483.0222u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	247.6886u	247.6886u	247.6886u	119.0215u	119.0215u	119.0215u
gds	1.9088u	1.9088u	1.9088u	2.9149u	2.9149u	2.9149u
gmb	78.7883u	78.7883u	78.7883u	37.9685u	37.9685u	37.9685u
cdtot	8.415e-16	11.7841f	8.415e-16	6.0228f	4.300e-16	6.0228f
cgtot	18.5628f	18.5628f	18.5628f	9.6618f	9.6618f	9.6618f
cstot	11.7841f	8.415e-16	11.7841f	4.300e-16	6.0228f	4.300e-16
cbtot	6.1679f	6.1679f	6.1679f	3.3134f	3.3134f	3.3134f
cgs	16.0892f	8.390e-16	16.0892f	4.287e-16	8.2381f	4.287e-16
cgd	8.390e-16	16.0892f	8.390e-16	8.2381f	4.287e-16	8.2381f

subckt						
element	0:m154	0:m155	0:m156	0:m157	0:m158	0:m159
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	23.7808u	37.9966u	-37.9966u	37.9966u	-37.9966u	37.9966u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.0249	1.1195	962.0131m	1.1195	962.0131m	1.1195
vds	471.0522m	157.5330m	-157.5330m	157.5330m	-157.5330m	157.5330m
vbs	0.	0.	-157.5330m	0.	-157.5330m	0.
vth	677.7852m	675.1737m	675.1737m	675.1737m	675.1737m	675.1737m
vdsat	274.4993m	338.7623m	338.7623m	338.7623m	338.7623m	338.7623m
beta	483.0222u	749.2701u	749.2701u	749.2701u	749.2701u	749.2701u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	119.0215u	101.7751u	101.7751u	101.7751u	101.7751u	101.7751u
gds	2.9149u	168.6325u	168.6325u	168.6325u	168.6325u	168.6325u
gmb	37.9685u	35.1782u	35.1782u	35.1782u	35.1782u	35.1782u
cdtot	4.300e-16	7.2565f	8.4738f	7.2565f	8.4738f	7.2565f
cgtot	9.6618f	17.6007f	17.6007f	17.6007f	17.6007f	17.6007f
cstot	6.0228f	8.4738f	7.2565f	8.4738f	7.2565f	8.4738f
cbtot	3.3134f	5.5385f	5.5385f	5.5385f	5.5385f	5.5385f
cgs	8.2381f	10.9310f	6.0067f	10.9310f	6.0067f	10.9310f
cgd	4.287e-16	6.0067f	10.9310f	6.0067f	10.9310f	6.0067f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m160	0:m161	0:m162	0:m163	0:m164	0:m165
element	0:nmos	0:nmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
region	id	id	id	id	id	id
id	11.1040u	11.1376u	66.3069u	-66.3069u	66.3069u	-66.3069u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.0097	1.0881	351.0531m	-1.0940	351.0531m	-1.0940
vds	352.6595m	67.2640m	1.4451	-1.4451	1.4451	-1.4451
vbs	0.	0.	1.4451	0.	1.4451	0.
vth	680.8117m	677.9573m	-644.4161m	-644.4161m	-644.4161m	-644.4161m
vdsat	261.0692m	315.4360m	-371.6450m	-371.6450m	-371.6450m	-371.6450m
beta	254.7040u	478.2531u	774.7990u	774.7990u	774.7990u	774.7990u
gam eff	636.6611m	636.6611m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	57.7544u	28.3267u	267.8378u	267.8378u	267.8378u	267.8378u
gds	2.8099u	145.3109u	1.8167u	1.8167u	1.8167u	1.8167u
gmb	18.5139u	10.1434u	92.8561u	92.8561u	92.8561u	92.8561u
cdtot	2.263e-16	5.8881f	39.4536f	2.7708f	39.4536f	2.7708f
cgctot	5.2506f	11.6404f	60.0787f	60.0787f	60.0787f	60.0787f
cstot	3.1700f	4.8308f	2.7708f	39.4536f	2.7708f	39.4536f
cbtot	1.9036f	3.8121f	20.6661f	20.6661f	20.6661f	20.6661f
cgs	4.3419f	6.1277f	2.7560f	52.8543f	2.7560f	52.8543f
cgd	2.256e-16	5.0544f	52.8543f	2.7560f	52.8543f	2.7560f

subckt	0:m166	0:m167	0:m168	0:m169	0:m170	0:m171
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Saturati	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region	id	id	id	id	id	id
id	66.3069u	-66.3069u	47.2882f	-47.2882f	47.2882f	-47.2882f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	351.0531m	-1.0940	507.1918m	73.9302m	507.1918m	73.9302m
vds	1.4451	-1.4451	433.2616m	-433.2616m	433.2616m	-433.2616m
vbs	1.4451	0.	433.2616m	0.	433.2616m	0.
vth	-644.4161m	-644.4161m	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m
vdsat	-371.6450m	-371.6450m	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m
beta	774.7990u	774.7990u	2.3465m	2.3465m	2.3465m	2.3465m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	267.8378u	267.8378u	1.4243p	1.4243p	1.4243p	1.4243p
gds	1.8167u	1.8167u	25.5715f	25.5715f	25.5715f	25.5715f
gmb	92.8561u	92.8561u	549.5563f	549.5563f	549.5563f	549.5563f
cdtot	39.4536f	2.7708f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cgctot	60.0787f	60.0787f	22.6940f	22.6940f	22.6940f	22.6940f
cstot	2.7708f	39.4536f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cbtot	20.6661f	20.6661f	15.3281f	15.3281f	15.3281f	15.3281f
cgs	2.7560f	52.8543f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f
cgd	52.8543f	2.7560f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f

subckt	0:m172	0:m173	0:m174	0:m175	0:m176	0:m177
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region	id	id	id	id	id	id
id	47.2882f	-47.2882f	47.2882f	-47.2882f	47.2882f	-47.2882f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	507.1918m	73.9302m	507.1918m	73.9302m	507.1918m	73.9302m
vds	433.2616m	-433.2616m	433.2616m	-433.2616m	433.2616m	-433.2616m
vbs	433.2616m	0.	433.2616m	0.	433.2616m	0.
vth	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m
vdsat	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m
beta	2.3465m	2.3465m	2.3465m	2.3465m	2.3465m	2.3465m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	1.4243p	1.4243p	1.4243p	1.4243p	1.4243p	1.4243p
gds	25.5715f	25.5715f	25.5715f	25.5715f	25.5715f	25.5715f
gmb	549.5563f	549.5563f	549.5563f	549.5563f	549.5563f	549.5563f
cdtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cgctot	22.6940f	22.6940f	22.6940f	22.6940f	22.6940f	22.6940f
cstot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cbtot	15.3281f	15.3281f	15.3281f	15.3281f	15.3281f	15.3281f
cgs	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f
cgd	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m178	0:m179	0:m180	0:m181	0:m182	0:m183
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region	id	id	id	id	id	id
id	47.2882f	-47.2882f	47.2882f	-47.2882f	47.2882f	-47.2882f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	507.1918m	73.9302m	507.1918m	73.9302m	507.1918m	73.9302m
vds	433.2616m	-433.2616m	433.2616m	-433.2616m	433.2616m	-433.2616m
vbs	433.2616m	0.	433.2616m	0.	433.2616m	0.
vth	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m	-578.6642m
vdsat	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m	-39.9139m
beta	2.3465m	2.3465m	2.3465m	2.3465m	2.3465m	2.3465m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	1.4243p	1.4243p	1.4243p	1.4243p	1.4243p	1.4243p
gds	25.5715f	25.5715f	25.5715f	25.5715f	25.5715f	25.5715f
gmb	549.5563f	549.5563f	549.5563f	549.5563f	549.5563f	549.5563f
cdtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cgtd	22.6940f	22.6940f	22.6940f	22.6940f	22.6940f	22.6940f
cbtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cstot	15.3281f	15.3281f	15.3281f	15.3281f	15.3281f	15.3281f
cgs	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f
cgd	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f

subckt	0:m184	0:m185	0:m186	0:m187	0:m188	0:m189
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region	id	id	id	id	id	id
id	47.2882f	-47.2882f	842.2074f	-842.2074f	842.2074f	-842.2074f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	507.1918m	73.9302m	0.	-35.8020m	0.	-35.8020m
vds	433.2616m	-433.2616m	35.8020m	-35.8020m	35.8020m	-35.8020m
vbs	433.2616m	0.	35.8020m	0.	35.8020m	0.
vth	-578.6642m	-578.6642m	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m
vdsat	-39.9139m	-39.9139m	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m
beta	2.3465m	2.3465m	2.3409m	2.3409m	2.3409m	2.3409m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	1.4243p	1.4243p	25.3270p	25.3270p	25.3270p	25.3270p
gds	25.5715f	25.5715f	10.0232p	10.0232p	10.0232p	10.0232p
gmb	549.5563f	549.5563f	9.3796p	9.3796p	9.3796p	9.3796p
cdtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cgtd	22.6940f	22.6940f	21.8790f	21.8790f	21.8790f	21.8790f
cbtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cstot	15.3281f	15.3281f	14.5132f	14.5132f	14.5132f	14.5132f
cgs	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f
cgd	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f

subckt	0:m190	0:m191	0:m192	0:m193	0:m194	0:m195
element	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
model	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
region	id	id	id	id	id	id
id	842.2074f	-842.2074f	842.2074f	-842.2074f	842.2074f	-842.2074f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	-35.8020m	0.	-35.8020m	0.	-35.8020m
vds	35.8020m	-35.8020m	35.8020m	-35.8020m	35.8020m	-35.8020m
vbs	35.8020m	0.	35.8020m	0.	35.8020m	0.
vth	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m
vdsat	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m
beta	2.3409m	2.3409m	2.3409m	2.3409m	2.3409m	2.3409m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	25.3270p	25.3270p	25.3270p	25.3270p	25.3270p	25.3270p
gds	10.0232p	10.0232p	10.0232p	10.0232p	10.0232p	10.0232p
gmb	9.3796p	9.3796p	9.3796p	9.3796p	9.3796p	9.3796p
cdtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cgtd	21.8790f	21.8790f	21.8790f	21.8790f	21.8790f	21.8790f
cbtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cstot	14.5132f	14.5132f	14.5132f	14.5132f	14.5132f	14.5132f
cgs	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f
cgd	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m196	0:m197	0:m198	0:m199	0:m200	0:m201
element	0:m196	0:m197	0:m198	0:m199	0:m200	0:m201
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	842.2074f	-842.2074f	842.2074f	-842.2074f	842.2074f	-842.2074f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	-35.8020m	0.	-35.8020m	0.	-35.8020m
vds	35.8020m	-35.8020m	35.8020m	-35.8020m	35.8020m	-35.8020m
vbs	35.8020m	0.	35.8020m	0.	35.8020m	0.
vth	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m	-585.3809m
vdsat	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m	-39.9140m
beta	2.3409m	2.3409m	2.3409m	2.3409m	2.3409m	2.3409m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	25.3270p	25.3270p	25.3270p	25.3270p	25.3270p	25.3270p
gds	10.0232p	10.0232p	10.0232p	10.0232p	10.0232p	10.0232p
gmb	9.3796p	9.3796p	9.3796p	9.3796p	9.3796p	9.3796p
cdtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cgtot	21.8790f	21.8790f	21.8790f	21.8790f	21.8790f	21.8790f
cstot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.6827f
cbtot	14.5132f	14.5132f	14.5132f	14.5132f	14.5132f	14.5132f
cgs	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f
cgd	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f	3.6832f	3.6827f

subckt	0:m202	0:m203	0:m204	0:m205	0:m206	0:m207
element	0:m202	0:m203	0:m204	0:m205	0:m206	0:m207
model	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	842.2074f	-842.2074f	-38.5066p	38.5066p	-38.5066p	38.5066p
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	-35.8020m	-2.4439	275.2642m	-2.4439	275.2642m
vds	35.8020m	-35.8020m	-2.7191	2.7191	-2.7191	2.7191
vbs	35.8020m	0.	-2.7191	0.	-2.7191	0.
vth	-585.3809m	-585.3809m	677.2736m	677.2736m	677.2736m	677.2736m
vdsat	-39.9140m	-39.9140m	37.0919m	37.0919m	37.0919m	37.0919m
beta	2.3409m	2.3409m	470.4404u	470.4404u	470.4404u	470.4404u
gam eff	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	25.3270p	25.3270p	1.1089n	1.1089n	1.1089n	1.1089n
gds	10.0232p	10.0232p	3.9881p	3.9881p	3.9881p	3.9881p
gmb	9.3796p	9.3796p	412.8445p	412.8445p	412.8445p	412.8445p
cdtot	3.6827f	3.6827f	3.970e-16	3.969e-16	3.970e-16	3.969e-16
cgtot	21.8790f	21.8790f	4.0170f	4.0170f	4.0170f	4.0170f
cstot	3.6827f	3.6827f	3.969e-16	3.970e-16	3.969e-16	3.970e-16
cbtot	14.5132f	14.5132f	3.2230f	3.2230f	3.2230f	3.2230f
cgs	3.6827f	3.6832f	3.969e-16	3.971e-16	3.969e-16	3.971e-16
cgd	3.6832f	3.6827f	3.971e-16	3.969e-16	3.971e-16	3.969e-16

subckt	0:m208	0:m209	0:m210	0:m211	0:m212	0:m213
element	0:m208	0:m209	0:m210	0:m211	0:m212	0:m213
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-10.5892u	13.6127n	-13.6127n	13.6127n	-13.6127n	13.6127n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.2019	2.2501	-280.8676m	2.2501	-280.8676m	2.2501
vds	-82.3659m	2.5309	-2.5309	2.5309	-2.5309	2.5309
vbs	0.	2.5309	0.	2.5309	0.	2.5309
vth	-654.1541m	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m
vdsat	-444.2136m	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m
beta	270.6429u	5.0096m	5.0096m	5.0096m	5.0096m	5.0096m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	19.4472u	391.9149n	391.9149n	391.9149n	391.9149n	391.9149n
gds	115.4049u	7.0178n	7.0178n	7.0178n	7.0178n	7.0178n
gmb	8.0133u	116.8273n	116.8273n	116.8273n	116.8273n	116.8273n
cdtot	13.5223f	7.7724f	7.7535f	7.7724f	7.7535f	7.7724f
cgtot	26.1823f	42.8639f	42.8639f	42.8639f	42.8639f	42.8639f
cstot	11.3111f	7.7535f	7.7724f	7.7535f	7.7724f	7.7535f
cbtot	8.8426f	27.3394f	27.3394f	27.3394f	27.3394f	27.3394f
cgs	13.9538f	7.7533f	7.7787f	7.7533f	7.7787f	7.7533f
cgd	11.6941f	7.7787f	7.7533f	7.7787f	7.7533f	7.7787f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:m214	0:m215	0:m216	0:m217	0:m218	0:m219
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-13.6127n	13.6127n	-13.6127n	13.6127n	-13.6127n	13.6127n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-280.8676m	2.2501	-280.8676m	2.2501	-280.8676m	2.2501
vds	-2.5309	2.5309	-2.5309	2.5309	-2.5309	2.5309
vbs	0.	2.5309	0.	2.5309	0.	2.5309
vth	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m
vdsat	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m
beta	5.0096m	5.0096m	5.0096m	5.0096m	5.0096m	5.0096m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	391.9149n	391.9149n	391.9149n	391.9149n	391.9149n	391.9149n
gds	7.0178n	7.0178n	7.0178n	7.0178n	7.0178n	7.0178n
gmb	116.8273n	116.8273n	116.8273n	116.8273n	116.8273n	116.8273n
cdtot	7.7535f	7.7724f	7.7535f	7.7724f	7.7535f	7.7724f
cgtot	42.8639f	42.8639f	42.8639f	42.8639f	42.8639f	42.8639f
cstot	7.7724f	7.7535f	7.7724f	7.7535f	7.7724f	7.7535f
cbtot	27.3394f	27.3394f	27.3394f	27.3394f	27.3394f	27.3394f
cgs	7.7787f	7.7533f	7.7787f	7.7533f	7.7787f	7.7533f
cgd	7.7533f	7.7787f	7.7533f	7.7787f	7.7533f	7.7787f

subckt element	0:m220	0:m221	0:m222	0:m223	0:m224	0:m225
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-13.6127n	13.6127n	-13.6127n	13.6127n	-13.6127n	47.2882f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-280.8676m	2.2501	-280.8676m	2.2501	-280.8676m	507.1918m
vds	-2.5309	2.5309	-2.5309	2.5309	-2.5309	433.2616m
vbs	0.	2.5309	0.	2.5309	0.	433.2616m
vth	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	-578.6642m
vdsat	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	-39.9139m
beta	5.0096m	5.0096m	5.0096m	5.0096m	5.0096m	2.3465m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	391.9149n	391.9149n	391.9149n	391.9149n	391.9149n	1.4243p
gds	7.0178n	7.0178n	7.0178n	7.0178n	7.0178n	25.5715f
gmb	116.8273n	116.8273n	116.8273n	116.8273n	116.8273n	549.5563f
cdtot	7.7535f	7.7724f	7.7535f	7.7724f	7.7535f	3.6827f
cgtot	42.8639f	42.8639f	42.8639f	42.8639f	42.8639f	22.6940f
cstot	7.7724f	7.7535f	7.7724f	7.7535f	7.7724f	3.6827f
cbtot	27.3394f	27.3394f	27.3394f	27.3394f	27.3394f	15.3281f
cgs	7.7787f	7.7533f	7.7787f	7.7533f	7.7787f	3.6827f
cgd	7.7533f	7.7787f	7.7533f	7.7787f	7.7533f	3.6832f

subckt element	0:m226	0:m227	0:m228	0:m229	0:m230	0:m231
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-47.2882f	842.2074f	-842.2074f	-844.6243n	844.6243n	-844.6243n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	73.9302m	0.	-35.8020m	-849.6754m	650.8682m	-849.6754m
vds	-433.2616m	35.8020m	-35.8020m	-1.5005	1.5005	-1.5005
vbs	0.	35.8020m	0.	-1.5005	0.	-1.5005
vth	-578.6642m	-585.3809m	-585.3809m	674.3396m	674.3396m	674.3396m
vdsat	-39.9139m	-39.9140m	-39.9140m	58.4947m	58.4947m	58.4947m
beta	2.3465m	2.3409m	2.3409m	833.5458u	833.5458u	833.5458u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	1.4243p	25.3270p	25.3270p	15.8787u	15.8787u	15.8787u
gds	25.5715f	10.0232p	10.0232p	74.8878n	74.8878n	74.8878n
gmb	549.5563f	9.3796p	9.3796p	5.2765u	5.2765u	5.2765u
cdtot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	3.8041f	7.055e-16	3.8041f
cgtot	22.6940f	21.8790f	21.8790f	9.3657f	9.3657f	9.3657f
cstot	3.6827f	3.6827f	3.6827f	7.055e-16	3.8041f	7.055e-16
cbtot	15.3281f	14.5132f	14.5132f	5.0343f	5.0343f	5.0343f
cgs	3.6832f	3.6827f	3.6832f	7.048e-16	4.9393f	7.048e-16
cgd	3.6827f	3.6832f	3.6827f	4.9393f	7.048e-16	4.9393f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:m232	0:m233	0:m234	0:m235	0:m236	0:m237
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	844.6243n	-844.6243n	10.5297u	10.3255u	10.5892u	10.6395u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	650.8682m	-849.6754m	992.8442m	1.0019	990.0080m	987.5354m
vds	1.5005	-1.5005	708.9142m	272.7634m	1.2074	1.7915
vbs	0.	-1.5005	0.	0.	0.	0.
vth	674.3396m	674.3396m	680.6599m	680.8458m	680.4475m	680.1986m
vdsat	58.4947m	58.4947m	250.1624m	255.9843m	248.4459m	246.9902m
beta	833.5458u	833.5458u	255.3871u	255.0139u	255.5099u	255.6197u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	15.8787u	15.8787u	58.7874u	52.7365u	59.4730u	59.8525u
gds	74.8878n	74.8878n	602.9910n	6.7736u	374.2472n	315.1730n
gmb	5.2765u	5.2765u	18.8028u	17.0315u	19.0126u	19.1304u
cdtot	7.055e-16	3.8041f	2.263e-16	2.263e-16	2.263e-16	2.263e-16
cgtot	9.3657f	9.3657f	5.2505f	5.2506f	5.2505f	5.2504f
cstot	3.8041f	7.055e-16	3.1696f	3.1700f	3.1692f	3.1688f
cbtot	5.0343f	5.0343f	1.9068f	1.9051f	1.9073f	1.9078f
cgs	4.9393f	7.048e-16	4.3381f	4.3405f	4.3370f	4.3358f
cgd	7.048e-16	4.9393f	2.256e-16	2.256e-16	2.256e-16	2.256e-16

subckt element	0:m238	0:m239	0:m240	0:m241	0:m242	0:m243
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	10.4134u	10.5297u	10.3255u	10.5892u	10.6395u	10.4134u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	998.1374m	1.0234	1.0234	1.0234	1.0234	1.0234
vds	340.9025m	207.3846m	198.2888m	210.2207m	212.6934m	202.0914m
vbs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vth	680.8167m	680.8736m	680.8775m	680.8724m	680.8714m	680.8759m
vdsat	253.5198m	269.9786m	269.9761m	269.9794m	269.9801m	269.9772m
beta	255.1679u	254.1517u	254.1515u	254.1517u	254.1518u	254.1516u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	56.0291u	44.4326u	42.7438u	44.9472u	45.3908u	43.4566u
gds	2.7694u	21.3245u	23.5804u	20.6406u	20.0524u	22.6263u
gmb	17.9812u	14.6766u	14.1732u	14.8292u	14.9605u	14.3861u
cdtot	2.263e-16	2.263e-16	2.263e-16	2.263e-16	2.263e-16	2.263e-16
cgtot	5.2505f	5.2507f	5.2507f	5.2507f	5.2507f	5.2507f
cstot	3.1699f	3.1702f	3.1702f	3.1702f	3.1702f	3.1702f
cbtot	1.9058f	1.9010f	1.9010f	1.9010f	1.9010f	1.9010f
cgs	4.3396f	4.3448f	4.3448f	4.3448f	4.3448f	4.3448f
cgd	2.256e-16	2.256e-16	2.256e-16	2.256e-16	2.256e-16	2.256e-16

subckt element	0:m244	0:m245	0:m246	0:m247	0:m248	0:m249
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	1.0829u	-1.0829u	1.0829u	-1.0829u	1.0829u	-26.1981f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	650.8682m	386.1790m	650.8682m	386.1790m	650.8682m	-507.1918m
vds	264.6892m	-264.6892m	264.6892m	-264.6892m	264.6892m	-542.9939m
vbs	0.	-264.6892m	0.	-264.6892m	0.	-542.9939m
vth	672.6074m	672.6074m	672.6074m	672.6074m	672.6074m	678.6661m
vdsat	59.1702m	59.1702m	59.1702m	59.1702m	59.1702m	37.0577m
beta	1.1593m	1.1593m	1.1593m	1.1593m	1.1593m	429.7084u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	20.6071u	20.6071u	20.6071u	20.6071u	20.6071u	760.5340f
gds	175.7265n	175.7265n	175.7265n	175.7265n	175.7265n	3.5574f
gmb	6.8462u	6.8462u	6.8462u	6.8462u	6.8462u	311.1710f
cdtot	9.807e-16	5.4345f	9.807e-16	5.4345f	9.807e-16	3.627e-16
cgtot	13.0309f	13.0309f	13.0309f	13.0309f	13.0309f	4.0321f
cstot	5.4345f	9.807e-16	5.4345f	9.807e-16	5.4345f	3.627e-16
cbtot	6.8762f	6.8762f	6.8762f	6.8762f	6.8762f	3.3065f
cgs	7.0621f	9.797e-16	7.0621f	9.797e-16	7.0621f	3.627e-16
cgd	9.797e-16	7.0621f	9.797e-16	7.0621f	9.797e-16	3.628e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m250	0:m251	0:m252	0:m253	0:m254	0:m255
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	26.1981f	-26.1981f	26.1981f	-26.1981f	26.1981f	-26.1981f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	35.8020m	-507.1918m	35.8020m	-507.1918m	35.8020m	-507.1918m
vds	542.9939m	-542.9939m	542.9939m	-542.9939m	542.9939m	-542.9939m
vbs	0.	-542.9939m	0.	-542.9939m	0.	-542.9939m
vth	678.6661m	678.6661m	678.6661m	678.6661m	678.6661m	678.6661m
vdsat	37.0577m	37.0577m	37.0577m	37.0577m	37.0577m	37.0577m
beta	429.7084u	429.7084u	429.7084u	429.7084u	429.7084u	429.7084u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	760.5340f	760.5340f	760.5340f	760.5340f	760.5340f	760.5340f
gds	3.5574f	3.5574f	3.5574f	3.5574f	3.5574f	3.5574f
gmb	311.1710f	311.1710f	311.1710f	311.1710f	311.1710f	311.1710f
cdtot	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16
cgtot	4.0321f	4.0321f	4.0321f	4.0321f	4.0321f	4.0321f
cstot	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16
cbtot	3.3065f	3.3065f	3.3065f	3.3065f	3.3065f	3.3065f
cgs	3.628e-16	3.627e-16	3.628e-16	3.627e-16	3.628e-16	3.627e-16
cgd	3.627e-16	3.628e-16	3.627e-16	3.628e-16	3.627e-16	3.628e-16

subckt	0:m256	0:m257	0:m258	0:m259	0:m260	0:m261
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	26.1981f	-26.1981f	26.1981f	-26.1981f	26.1981f	-26.1981f
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	35.8020m	-507.1918m	35.8020m	-507.1918m	35.8020m	-507.1918m
vds	542.9939m	-542.9939m	542.9939m	-542.9939m	542.9939m	-542.9939m
vbs	0.	-542.9939m	0.	-542.9939m	0.	-542.9939m
vth	678.6661m	678.6661m	678.6661m	678.6661m	678.6661m	678.6661m
vdsat	37.0577m	37.0577m	37.0577m	37.0577m	37.0577m	37.0577m
beta	429.7084u	429.7084u	429.7084u	429.7084u	429.7084u	429.7084u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	760.5340f	760.5340f	760.5340f	760.5340f	760.5340f	760.5340f
gds	3.5574f	3.5574f	3.5574f	3.5574f	3.5574f	3.5574f
gmb	311.1710f	311.1710f	311.1710f	311.1710f	311.1710f	311.1710f
cdtot	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16
cgtot	4.0321f	4.0321f	4.0321f	4.0321f	4.0321f	4.0321f
cstot	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16	3.627e-16
cbtot	3.3065f	3.3065f	3.3065f	3.3065f	3.3065f	3.3065f
cgs	3.628e-16	3.627e-16	3.628e-16	3.627e-16	3.628e-16	3.627e-16
cgd	3.627e-16	3.628e-16	3.627e-16	3.628e-16	3.627e-16	3.628e-16

subckt	0:m262	0:m263	0:m264	0:m265	0:m266	0:m267
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	26.1981f	-12.2467p	-498.1161u	498.1161u	-498.1161u	498.1161u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	35.8020m	0.	595.4179m	1.0645	595.4179m	1.0645
vds	542.9939m	-275.2642m	-469.0637m	469.0637m	-469.0637m	469.0637m
vbs	0.	-275.2642m	-469.0637m	0.	-469.0637m	0.
vth	678.6661m	681.5295m	605.6826m	605.6826m	605.6826m	605.6826m
vdsat	37.0577m	36.8283m	331.7309m	331.7309m	331.7309m	331.7309m
beta	429.7084u	221.2110u	6.2689m	6.2689m	6.2689m	6.2689m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	760.5340f	352.6754p	1.7388m	1.7388m	1.7388m	1.7388m
gds	3.5574f	2.1067p	150.2195u	150.2195u	150.2195u	150.2195u
gmb	311.1710f	131.5131p	392.5527u	392.5527u	392.5527u	392.5527u
cdtot	3.627e-16	1.869e-16	18.7083f	2.6482f	18.7083f	2.6482f
cgtot	4.0321f	2.0711f	31.6615f	31.6615f	31.6615f	31.6615f
cstot	3.627e-16	1.869e-16	2.6482f	18.7083f	2.6482f	18.7083f
cbtot	3.3065f	1.6972f	8.8139f	8.8139f	8.8139f	8.8139f
cgs	3.628e-16	1.869e-16	2.5849f	25.4371f	2.5849f	25.4371f
cgd	3.627e-16	1.870e-16	25.4371f	2.5849f	25.4371f	2.5849f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m268	0:m269	0:m270	0:m271	0:m272	0:m273
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-498.1161u	498.1161u	-498.1161u	498.1161u	-498.1161u	498.1161u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	595.4179m	1.0645	595.4179m	1.0645	595.4179m	1.0645
vds	-469.0637m	469.0637m	-469.0637m	469.0637m	-469.0637m	469.0637m
vbs	-469.0637m	0.	-469.0637m	0.	-469.0637m	0.
vth	605.6826m	605.6826m	605.6826m	605.6826m	605.6826m	605.6826m
vdsat	331.7309m	331.7309m	331.7309m	331.7309m	331.7309m	331.7309m
beta	6.2689m	6.2689m	6.2689m	6.2689m	6.2689m	6.2689m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	1.7388m	1.7388m	1.7388m	1.7388m	1.7388m	1.7388m
gds	150.2195u	150.2195u	150.2195u	150.2195u	150.2195u	150.2195u
gmb	392.5527u	392.5527u	392.5527u	392.5527u	392.5527u	392.5527u
cdtot	18.7083f	2.6482f	18.7083f	2.6482f	18.7083f	2.6482f
cgtot	31.6615f	31.6615f	31.6615f	31.6615f	31.6615f	31.6615f
cstot	2.6482f	18.7083f	2.6482f	18.7083f	2.6482f	18.7083f
cbtot	8.8139f	8.8139f	8.8139f	8.8139f	8.8139f	8.8139f
cgs	2.5849f	25.4371f	2.5849f	25.4371f	2.5849f	25.4371f
cgd	25.4371f	2.5849f	25.4371f	2.5849f	25.4371f	2.5849f

subckt	0:m274	0:m275	0:m276	0:m277	0:m278	0:m279
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-498.1161u	498.1161u	-498.1161u	498.1161u	-498.1161u	498.1161u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	595.4179m	1.0645	595.4179m	1.0645	595.4179m	1.0645
vds	-469.0637m	469.0637m	-469.0637m	469.0637m	-469.0637m	469.0637m
vbs	-469.0637m	0.	-469.0637m	0.	-469.0637m	0.
vth	605.6826m	605.6826m	605.6826m	605.6826m	605.6826m	605.6826m
vdsat	331.7309m	331.7309m	331.7309m	331.7309m	331.7309m	331.7309m
beta	6.2689m	6.2689m	6.2689m	6.2689m	6.2689m	6.2689m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	1.7388m	1.7388m	1.7388m	1.7388m	1.7388m	1.7388m
gds	150.2195u	150.2195u	150.2195u	150.2195u	150.2195u	150.2195u
gmb	392.5527u	392.5527u	392.5527u	392.5527u	392.5527u	392.5527u
cdtot	18.7083f	2.6482f	18.7083f	2.6482f	18.7083f	2.6482f
cgtot	31.6615f	31.6615f	31.6615f	31.6615f	31.6615f	31.6615f
cstot	2.6482f	18.7083f	2.6482f	18.7083f	2.6482f	18.7083f
cbtot	8.8139f	8.8139f	8.8139f	8.8139f	8.8139f	8.8139f
cgs	2.5849f	25.4371f	2.5849f	25.4371f	2.5849f	25.4371f
cgd	25.4371f	2.5849f	25.4371f	2.5849f	25.4371f	2.5849f

subckt	0:m280	0:m281	0:m282	0:m283	0:m284	0:m285
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-498.1161u	498.1161u	-498.1161u	498.1161u	-996.2049u	996.2049u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	595.4179m	1.0645	595.4179m	1.0645	-351.0531m	1.0859
vds	-469.0637m	469.0637m	-469.0637m	469.0637m	-1.4369	1.4369
vbs	-469.0637m	0.	-469.0637m	0.	-1.4369	0.
vth	605.6826m	605.6826m	605.6826m	605.6826m	596.4046m	596.4046m
vdsat	331.7309m	331.7309m	331.7309m	331.7309m	348.9592m	348.9592m
beta	6.2689m	6.2689m	6.2689m	6.2689m	10.2443m	10.2443m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	1.7388m	1.7388m	1.7388m	1.7388m	3.2999m	3.2999m
gds	150.2195u	150.2195u	150.2195u	150.2195u	72.5399u	72.5399u
gmb	392.5527u	392.5527u	392.5527u	392.5527u	717.5388u	717.5388u
cdtot	18.7083f	2.6482f	18.7083f	2.6482f	30.5231f	4.3359f
cgtot	31.6615f	31.6615f	31.6615f	31.6615f	51.7193f	51.7193f
cstot	2.6482f	18.7083f	2.6482f	18.7083f	4.3359f	30.5231f
cbtot	8.8139f	8.8139f	8.8139f	8.8139f	14.2926f	14.2926f
cgs	2.5849f	25.4371f	2.5849f	25.4371f	4.2324f	41.4864f
cgd	25.4371f	2.5849f	25.4371f	2.5849f	41.4864f	4.2324f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt						
element	0:m286	0:m287	0:m288	0:m289	0:m290	0:m291
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-996.2049u	996.2049u	-996.2049u	996.2049u	-996.2049u	996.2049u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-351.0531m	1.0859	-351.0531m	1.0859	-351.0531m	1.0859
vds	-1.4369	1.4369	-1.4369	1.4369	-1.4369	1.4369
vbs	-1.4369	0.	-1.4369	0.	-1.4369	0.
vth	596.4046m	596.4046m	596.4046m	596.4046m	596.4046m	596.4046m
vdsat	348.9592m	348.9592m	348.9592m	348.9592m	348.9592m	348.9592m
beta	10.2443m	10.2443m	10.2443m	10.2443m	10.2443m	10.2443m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	3.2999m	3.2999m	3.2999m	3.2999m	3.2999m	3.2999m
gds	72.5399u	72.5399u	72.5399u	72.5399u	72.5399u	72.5399u
gmb	717.5388u	717.5388u	717.5388u	717.5388u	717.5388u	717.5388u
cdtot	30.5231f	4.3359f	30.5231f	4.3359f	30.5231f	4.3359f
cgtot	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f
cstot	4.3359f	30.5231f	4.3359f	30.5231f	4.3359f	30.5231f
cbtot	14.2926f	14.2926f	14.2926f	14.2926f	14.2926f	14.2926f
cgs	4.2324f	41.4864f	4.2324f	41.4864f	4.2324f	41.4864f
cgd	41.4864f	4.2324f	41.4864f	4.2324f	41.4864f	4.2324f

subckt						
element	0:m292	0:m293	0:m294	0:m295	0:m296	0:m297
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-996.2049u	996.2049u	-996.2049u	996.2049u	-996.2049u	996.2049u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-351.0531m	1.0859	0.	1.0940	0.	1.0940
vds	-1.4369	1.4369	-1.0940	1.0940	-1.0940	1.0940
vbs	-1.4369	0.	-1.0940	0.	-1.0940	0.
vth	596.4046m	596.4046m	598.7366m	598.7366m	598.7366m	598.7366m
vdsat	348.9592m	348.9592m	352.1779m	352.1779m	352.1779m	352.1779m
beta	10.2443m	10.2443m	10.2274m	10.2274m	10.2274m	10.2274m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	3.2999m	3.2999m	3.2729m	3.2729m	3.2729m	3.2729m
gds	72.5399u	72.5399u	85.2539u	85.2539u	85.2539u	85.2539u
gmb	717.5388u	717.5388u	717.3194u	717.3194u	717.3194u	717.3194u
cdtot	30.5231f	4.3359f	30.5608f	4.3359f	30.5608f	4.3359f
cgtot	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f
cstot	4.3359f	30.5231f	4.3359f	30.5608f	4.3359f	30.5608f
cbtot	14.2926f	14.2926f	14.2815f	14.2815f	14.2815f	14.2815f
cgs	4.2324f	41.4864f	4.2324f	41.5605f	4.2324f	41.5605f
cgd	41.4864f	4.2324f	41.5605f	4.2324f	41.5605f	4.2324f

subckt						
element	0:m298	0:m299	0:m300	0:m301	0:m302	0:m303
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-996.2049u	996.2049u	-996.2049u	996.2049u	-996.2049u	996.2049u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	1.0940	0.	1.0940	0.	1.0940
vds	-1.0940	1.0940	-1.0940	1.0940	-1.0940	1.0940
vbs	-1.0940	0.	-1.0940	0.	-1.0940	0.
vth	598.7366m	598.7366m	598.7366m	598.7366m	598.7366m	598.7366m
vdsat	352.1779m	352.1779m	352.1779m	352.1779m	352.1779m	352.1779m
beta	10.2274m	10.2274m	10.2274m	10.2274m	10.2274m	10.2274m
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	3.2729m	3.2729m	3.2729m	3.2729m	3.2729m	3.2729m
gds	85.2539u	85.2539u	85.2539u	85.2539u	85.2539u	85.2539u
gmb	717.3194u	717.3194u	717.3194u	717.3194u	717.3194u	717.3194u
cdtot	30.5608f	4.3359f	30.5608f	4.3359f	30.5608f	4.3359f
cgtot	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f	51.7193f
cstot	4.3359f	30.5608f	4.3359f	30.5608f	4.3359f	30.5608f
cbtot	14.2815f	14.2815f	14.2815f	14.2815f	14.2815f	14.2815f
cgs	4.2324f	41.5605f	4.2324f	41.5605f	4.2324f	41.5605f
cgd	41.5605f	4.2324f	41.5605f	4.2324f	41.5605f	4.2324f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt element	0:m305	0:m306	0:m307	0:m308	0:m309	0:m310
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	188.4177n	-188.4177n	188.4177n	-188.4177n	188.4177n	-188.4177n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	-646.6562m	0.	-646.6562m	0.	-646.6562m
vds	646.6562m	-646.6562m	646.6562m	-646.6562m	646.6562m	-646.6562m
vbs	646.6562m	0.	646.6562m	0.	646.6562m	0.
vth	-658.6666m	-658.6666m	-658.6666m	-658.6666m	-658.6666m	-658.6666m
vdsat	-61.5690m	-61.5690m	-61.5690m	-61.5690m	-61.5690m	-61.5690m
beta	183.9237u	183.9237u	183.9237u	183.9237u	183.9237u	183.9237u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	3.6825u	3.6825u	3.6825u	3.6825u	3.6825u	3.6825u
gds	8.7371n	8.7371n	8.7371n	8.7371n	8.7371n	8.7371n
gmb	1.3304u	1.3304u	1.3304u	1.3304u	1.3304u	1.3304u
cdtot	3.9878f	6.180e-16	3.9878f	6.180e-16	3.9878f	6.180e-16
cgtot	8.9367f	8.9367f	8.9367f	8.9367f	8.9367f	8.9367f
cstot	6.180e-16	3.9878f	6.180e-16	3.9878f	6.180e-16	3.9878f
cbtot	4.7205f	4.7205f	4.7205f	4.7205f	4.7205f	4.7205f
cgs	6.166e-16	5.1115f	6.166e-16	5.1115f	6.166e-16	5.1115f
cgd	5.1115f	6.166e-16	5.1115f	6.166e-16	5.1115f	6.166e-16

subckt element	0:m311	0:m312	0:m313	0:m314	0:m315	0:m316
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	188.4177n	-188.4177n	188.4177n	-188.4177n	523.8986n	-523.8986n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	0.	-646.6562m	0.	-646.6562m	852.8002m	-646.6562m
vds	646.6562m	-646.6562m	646.6562m	-646.6562m	1.4995	-1.4995
vbs	646.6562m	0.	646.6562m	0.	1.4995	0.
vth	-658.6666m	-658.6666m	-658.6666m	-658.6666m	-649.6251m	-649.6251m
vdsat	-61.5690m	-61.5690m	-61.5690m	-61.5690m	-64.9830m	-64.9830m
beta	183.9237u	183.9237u	183.9237u	183.9237u	418.4781u	418.4781u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	3.6825u	3.6825u	3.6825u	3.6825u	9.9953u	9.9953u
gds	8.7371n	8.7371n	8.7371n	8.7371n	20.0142n	20.0142n
gmb	1.3304u	1.3304u	1.3304u	1.3304u	3.6060u	3.6060u
cdtot	3.9878f	6.180e-16	3.9878f	6.180e-16	10.2888f	1.4022f
cgtot	8.9367f	8.9367f	8.9367f	8.9367f	21.0539f	21.0539f
cstot	6.180e-16	3.9878f	6.180e-16	3.9878f	1.4022f	10.2888f
cbtot	4.7205f	4.7205f	4.7205f	4.7205f	10.3855f	10.3855f
cgs	6.166e-16	5.1115f	6.166e-16	5.1115f	1.3987f	13.2470f
cgd	5.1115f	6.166e-16	5.1115f	6.166e-16	13.2470f	1.3987f

subckt element	0:m317	0:m318	0:m319	0:m320	0:m321	0:m322
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	523.8986n	-523.8986n	523.8986n	-523.8986n	523.8986n	-523.8986n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	852.8002m	-646.6562m	852.8002m	-646.6562m	852.8002m	-646.6562m
vds	1.4995	-1.4995	1.4995	-1.4995	1.4995	-1.4995
vbs	1.4995	0.	1.4995	0.	1.4995	0.
vth	-649.6251m	-649.6251m	-649.6251m	-649.6251m	-649.6251m	-649.6251m
vdsat	-64.9830m	-64.9830m	-64.9830m	-64.9830m	-64.9830m	-64.9830m
beta	418.4781u	418.4781u	418.4781u	418.4781u	418.4781u	418.4781u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	9.9953u	9.9953u	9.9953u	9.9953u	9.9953u	9.9953u
gds	20.0142n	20.0142n	20.0142n	20.0142n	20.0142n	20.0142n
gmb	3.6060u	3.6060u	3.6060u	3.6060u	3.6060u	3.6060u
cdtot	10.2888f	1.4022f	10.2888f	1.4022f	10.2888f	1.4022f
cgtot	21.0539f	21.0539f	21.0539f	21.0539f	21.0539f	21.0539f
cstot	1.4022f	10.2888f	1.4022f	10.2888f	1.4022f	10.2888f
cbtot	10.3855f	10.3855f	10.3855f	10.3855f	10.3855f	10.3855f
cgs	1.3987f	13.2470f	1.3987f	13.2470f	1.3987f	13.2470f
cgd	13.2470f	1.3987f	13.2470f	1.3987f	13.2470f	1.3987f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m323	0:m324	0:m325	0:m326	0:m327	0:m328
element	0:m323	0:m324	0:m325	0:m326	0:m327	0:m328
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	523.8986n	-523.8986n	-20.5545u	20.5545u	-20.5545u	20.5545u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	852.8002m	-646.6562m	-1.0350	1.5000	-1.0350	1.5000
vds	1.4995	-1.4995	-2.5350	2.5350	-2.5350	2.5350
vbs	1.4995	0.	0.	2.5350	0.	2.5350
vth	-649.6251m	-649.6251m	-650.8290m	-650.8290m	-650.8290m	-650.8290m
vdsat	-64.9830m	-64.9830m	-322.0091m	-322.0091m	-322.0091m	-322.0091m
beta	418.4781u	418.4781u	316.9579u	316.9579u	316.9579u	316.9579u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	9.9953u	9.9953u	97.0409u	97.0409u	97.0409u	97.0409u
gds	20.0142n	20.0142n	412.8417n	412.8417n	412.8417n	412.8417n
gmb	3.6060u	3.6060u	33.8184u	33.8184u	33.8184u	33.8184u
cdtot	10.2888f	1.4022f	1.1237f	15.9966f	1.1237f	15.9966f
cgtot	21.0539f	21.0539f	24.5746f	24.5746f	24.5746f	24.5746f
cstot	1.4022f	10.2888f	15.9966f	1.1237f	15.9966f	1.1237f
cbtot	10.3855f	10.3855f	8.6431f	8.6431f	8.6431f	8.6431f
cgs	1.3987f	13.2470f	21.3759f	1.1177f	21.3759f	1.1177f
cgd	13.2470f	1.3987f	1.1177f	21.3759f	1.1177f	21.3759f

subckt	0:m329	0:m330	0:m331	0:m332	0:m333	0:m334
element	0:m329	0:m330	0:m331	0:m332	0:m333	0:m334
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-20.5545u	33.2879n	-33.2879n	33.2879n	-33.2879n	33.2879n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.0350	1.3570	-530.8004m	1.3570	-530.8004m	1.3570
vds	-2.5350	1.8878	-1.8878	1.8878	-1.8878	1.8878
vbs	0.	1.8878	0.	1.8878	0.	1.8878
vth	-650.8290m	-651.3638m	-651.3638m	-651.3638m	-651.3638m	-651.3638m
vdsat	-322.0091m	-41.0740m	-41.0740m	-41.0740m	-41.0740m	-41.0740m
beta	316.9579u	338.0346u	338.0346u	338.0346u	338.0346u	338.0346u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	97.0409u	797.1546n	797.1546n	797.1546n	797.1546n	797.1546n
gds	412.8417n	1.3768n	1.3768n	1.3768n	1.3768n	1.3768n
gmb	33.8184u	291.8257n	291.8257n	291.8257n	291.8257n	291.8257n
cdtot	1.1237f	1.5235f	1.1296f	1.5235f	1.1296f	1.5235f
cgtot	24.5746f	10.6619f	10.6619f	10.6619f	10.6619f	10.6619f
cstot	15.9966f	1.1296f	1.5235f	1.1296f	1.5235f	1.1296f
cbtot	8.6431f	8.0678f	8.0678f	8.0678f	8.0678f	8.0678f
cgs	21.3759f	1.1295f	1.6460f	1.1295f	1.6460f	1.1295f
cgd	1.1177f	1.6460f	1.1295f	1.6460f	1.1295f	1.6460f

subckt	0:m335	0:m336	0:m337	0:m338	0:m339	0:m340
element	0:m335	0:m336	0:m337	0:m338	0:m339	0:m340
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	173.2873n	-173.2873n	173.2873n	-173.2873n	173.2873n	-173.2873n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.7101	-638.9977m	1.7101	-638.9977m	1.7101	-638.9977m
vds	2.3491	-2.3491	2.3491	-2.3491	2.3491	-2.3491
vbs	2.3491	0.	2.3491	0.	2.3491	0.
vth	-657.2599m	-657.2599m	-657.2599m	-657.2599m	-657.2599m	-657.2599m
vdsat	-59.5096m	-59.5096m	-59.5096m	-59.5096m	-59.5096m	-59.5096m
beta	184.1040u	184.1040u	184.1040u	184.1040u	184.1040u	184.1040u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	3.4375u	3.4375u	3.4375u	3.4375u	3.4375u	3.4375u
gds	6.1180n	6.1180n	6.1180n	6.1180n	6.1180n	6.1180n
gmb	1.2411u	1.2411u	1.2411u	1.2411u	1.2411u	1.2411u
cdtot	3.6223f	6.181e-16	3.6223f	6.181e-16	3.6223f	6.181e-16
cgtot	8.5858f	8.5858f	8.5858f	8.5858f	8.5858f	8.5858f
cstot	6.181e-16	3.6223f	6.181e-16	3.6223f	6.181e-16	3.6223f
cbtot	4.6965f	4.6965f	4.6965f	4.6965f	4.6965f	4.6965f
cgs	6.169e-16	4.6204f	6.169e-16	4.6204f	6.169e-16	4.6204f
cgd	4.6204f	6.169e-16	4.6204f	6.169e-16	4.6204f	6.169e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

subckt	0:m341	0:m342	0:m343	0:m344	0:m345	0:m346
element	0:m341	0:m342	0:m343	0:m344	0:m345	0:m346
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:pmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	173.2873n	-173.2873n	173.2873n	-173.2873n	-161.9328n	13.6127n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.7101	-638.9977m	1.7101	-638.9977m	-638.9977m	2.2501
vds	2.3491	-2.3491	2.3491	-2.3491	-638.9977m	2.5309
vbs	2.3491	0.	2.3491	0.	0.	2.5309
vth	-657.2599m	-657.2599m	-657.2599m	-657.2599m	-658.6730m	-540.2805m
vdsat	-59.5096m	-59.5096m	-59.5096m	-59.5096m	-59.0636m	-40.0305m
beta	184.1040u	184.1040u	184.1040u	184.1040u	184.0328u	5.0096m
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m	684.9772m
gm	3.4375u	3.4375u	3.4375u	3.4375u	3.2255u	391.9149n
gds	6.1180n	6.1180n	6.1180n	6.1180n	7.5747n	7.0178n
gmb	1.2411u	1.2411u	1.2411u	1.2411u	1.1662u	116.8273n
cdtot	3.6223f	6.181e-16	3.6223f	6.181e-16	6.181e-16	7.7724f
cgtot	8.5858f	8.5858f	8.5858f	8.5858f	8.5077f	42.8639f
cstot	6.181e-16	3.6223f	6.181e-16	3.6223f	3.5439f	7.7535f
cbtot	4.6965f	4.6965f	4.6965f	4.6965f	4.6894f	27.3394f
cgs	6.169e-16	4.6204f	6.169e-16	4.6204f	4.5162f	7.7533f
cgd	4.6204f	6.169e-16	4.6204f	6.169e-16	6.170e-16	7.7787f

subckt	0:m347	0:m348	0:m349	0:m350	0:m351	0:m352
element	0:m347	0:m348	0:m349	0:m350	0:m351	0:m352
model	0:pmos	0:pmos	0:pmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Saturati	Saturati	Saturati
id	-13.6127n	13.6127n	-13.6127n	21.0574u	-21.0574u	21.0574u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-280.8676m	2.2501	-280.8676m	1.0289	-1.5000	1.0289
vds	-2.5309	2.5309	-2.5309	2.5289	-2.5289	2.5289
vbs	0.	2.5309	0.	0.	-2.5289	0.
vth	-540.2805m	-540.2805m	-540.2805m	678.0113m	678.0113m	678.0113m
vdsat	-40.0305m	-40.0305m	-40.0305m	276.4862m	276.4862m	276.4862m
beta	5.0096m	5.0096m	5.0096m	390.7737u	390.7737u	390.7737u
gam eff	684.9772m	684.9772m	684.9772m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	391.9149n	391.9149n	391.9149n	103.6947u	103.6947u	103.6947u
gds	7.0178n	7.0178n	7.0178n	519.2161n	519.2161n	519.2161n
gmb	116.8273n	116.8273n	116.8273n	32.9583u	32.9583u	32.9583u
cdtot	7.7535f	7.7724f	7.7535f	3.481e-16	4.8737f	3.481e-16
cgtot	42.8639f	42.8639f	42.8639f	7.8892f	7.8892f	7.8892f
cstot	7.7724f	7.7535f	7.7724f	4.8737f	3.481e-16	4.8737f
cbtot	27.3394f	27.3394f	27.3394f	2.7440f	2.7440f	2.7440f
cgs	7.7787f	7.7533f	7.7787f	6.6713f	3.471e-16	6.6713f
cgd	7.7533f	7.7787f	7.7533f	3.471e-16	6.6713f	3.471e-16

subckt	0:m353	0:m354	0:m355	0:m356	0:m357	0:m358
element	0:m353	0:m354	0:m355	0:m356	0:m357	0:m358
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati
id	-21.0574u	21.0574u	37.9966u	-37.9966u	37.9966u	-37.9966u
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.5000	1.0289	1.0249	726.7766m	1.0249	726.7766m
vds	-2.5289	2.5289	298.0880m	-298.0880m	298.0880m	-298.0880m
vbs	-2.5289	0.	0.	-298.0880m	0.	-298.0880m
vth	678.0113m	678.0113m	674.8520m	674.8520m	674.8520m	674.8520m
vdsat	276.4862m	276.4862m	277.5712m	277.5712m	277.5712m	277.5712m
beta	390.7737u	390.7737u	791.3358u	791.3358u	791.3358u	791.3358u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	103.6947u	103.6947u	178.8121u	178.8121u	178.8121u	178.8121u
gds	519.2161n	519.2161n	21.9915u	21.9915u	21.9915u	21.9915u
gmb	32.9583u	32.9583u	57.5397u	57.5397u	57.5397u	57.5397u
cdtot	4.8737f	3.481e-16	7.041e-16	9.8625f	7.041e-16	9.8625f
cgtot	7.8892f	7.8892f	15.5927f	15.5927f	15.5927f	15.5927f
cstot	3.481e-16	4.8737f	9.8625f	7.041e-16	9.8625f	7.041e-16
cbtot	2.7440f	2.7440f	5.2162f	5.2162f	5.2162f	5.2162f
cgs	3.471e-16	6.6713f	13.4708f	7.021e-16	13.4708f	7.021e-16
cgd	6.6713f	3.471e-16	7.021e-16	13.4708f	7.021e-16	13.4708f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

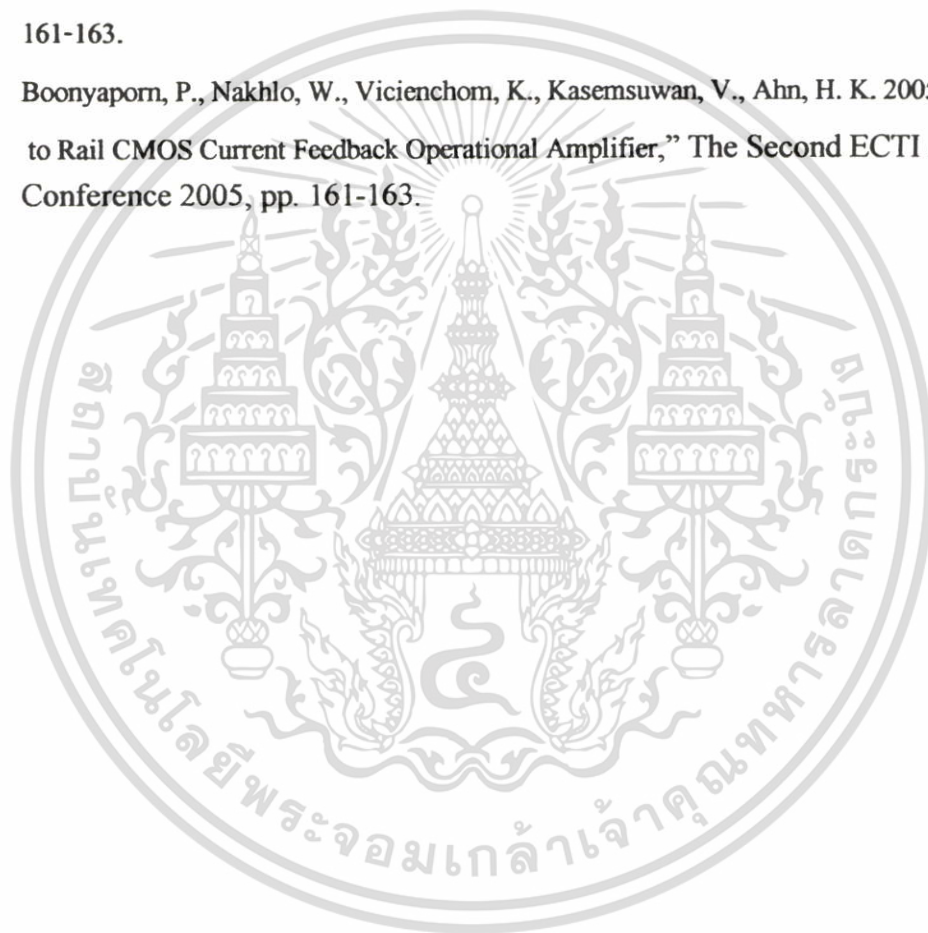
subckt	0:m359	0:m360	0:m361	0:m362	0:m363	0:m364
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	saturati	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	37.9966u	-866.4585n	866.4585n	844.6243n	-32.3830n	32.3830n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	1.0249	0.	650.8682m	650.8682m	-1.3572	532.7144m
vds	298.0880m	-650.8682m	650.8682m	1.5005	-1.8900	1.8900
vbs	0.	-650.8682m	0.	0.	-1.8900	0.
vth	674.8520m	674.0787m	674.0787m	674.3396m	678.2836m	678.2836m
vdsat	277.5712m	58.6190m	58.6190m	58.4947m	39.3138m	39.3138m
beta	791.3358u	914.8866u	914.8866u	833.5458u	413.3576u	413.3576u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	178.8121u	16.4760u	16.4760u	15.8787u	761.5820n	761.5820n
gds	21.9915u	90.2221n	90.2221n	74.8878n	3.4704n	3.4704n
gmb	57.5397u	5.4748u	5.4748u	5.2765u	258.2525n	258.2525n
cdtot	7.041e-16	4.1930f	7.742e-16	7.055e-16	4.155e-16	3.491e-16
cgtot	15.5927f	10.2624f	10.2624f	9.3657f	3.3930f	3.3930f
cstot	9.8625f	7.742e-16	4.1930f	3.8041f	3.491e-16	4.155e-16
cbtot	5.2162f	5.4932f	5.4932f	5.0343f	2.6348f	2.6348f
cgs	13.4708f	7.735e-16	5.4445f	4.9393f	3.490e-16	4.384e-16
cgd	7.021e-16	5.4445f	7.735e-16	7.048e-16	4.384e-16	3.490e-16

subckt	0:m365	0:m366	0:m367	0:m368	0:m369	0:m370
element	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
model	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos	0:nmos
region	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff	Cutoff
id	-32.3830n	32.3830n	-32.3830n	-942.0903n	942.0903n	166.4571n
ibs	0.	0.	0.	0.	0.	0.
ibd	0.	0.	0.	0.	0.	0.
vgs	-1.3572	532.7144m	-1.3572	-1.7062	647.1634m	647.1634m
vds	-1.8900	1.8900	-1.8900	-2.3533	2.3533	647.1634m
vbs	-1.8900	0.	-1.8900	-2.3533	0.	0.
vth	678.2836m	678.2836m	678.2836m	673.3531m	673.3531m	681.3710m
vdsat	39.3138m	39.3138m	39.3138m	57.7356m	57.7356m	54.7741m
beta	413.3576u	413.3576u	413.3576u	915.2946u	915.2946u	220.2949u
gam eff	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m	636.6611m
gm	761.5820n	761.5820n	761.5820n	17.6256u	17.6256u	3.2429u
gds	3.4704n	3.4704n	3.4704n	78.1395n	78.1395n	17.8551n
gmb	258.2525n	258.2525n	258.2525n	5.8586u	5.8586u	1.0798u
cdtot	4.155e-16	3.491e-16	4.155e-16	3.9990f	7.743e-16	1.868e-16
cgtot	3.3930f	3.3930f	3.3930f	10.0686f	10.0686f	2.5682f
cstot	3.491e-16	4.155e-16	3.491e-16	7.743e-16	3.9990f	8.477e-16
cbtot	2.6348f	2.6348f	2.6348f	5.4838f	5.4838f	1.5699f
cgs	3.490e-16	4.384e-16	3.490e-16	7.736e-16	5.1775f	1.0927f
cgd	4.384e-16	3.490e-16	4.384e-16	5.1775f	7.736e-16	1.866e-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

1. Boonyaporn, P., Kasemsuwan, V. 2002. "A Compact Rail to Rail CMOS Voltage Follower," The 2002 International Technical Conference on Circuit/System, Computers and Communications, pp. 82-85.
2. Boonyaporn, P., Kasemsuwan, V. 2002. "A High Performance Class AB CMOS Rail to Rail Voltage Follower," 2002 IEEE Asia-Pacific Conference on ASIC Proceedings, pp. 161-163.
3. Boonyaporn, P., Nakhlo, W., Vicienchom, K., Kasemsuwan, V., Ahn, H. K. 2005. "A Rail to Rail CMOS Current Feedback Operational Amplifier," The Second ECTI Annual Conference 2005, pp. 161-163.



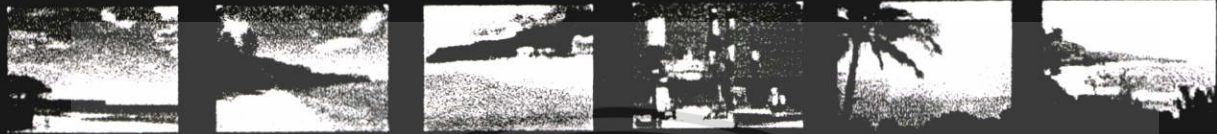
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ITC-CSCC 2002

# ITC-CSCC 2002

The 2002 International Technical Conference  
On Circuits/Systems, Computers and Communications



## Proceedings

Phuket Arcadia Hotel & Resort  
Phuket, Thailand

JULY 16-19, 2002

**Co-Sponsored by**

Sinndhorn International Institute of  
Technology, Thammasat University,  
Thailand  
King Mongkut's University of Technology  
Thonburi, Thailand  
National Electronic and Computer  
Technology Center, Thailand  
Ministry of University Affairs, Thailand

**With Technical Cooperation of**

IEICE  
IEEE  
IEEE Thailand Section

**Co-Organized by**

King Mongkut's University of Technology  
Thonburi, Thailand  
Sinndhorn International Institute of  
Technology, Thammasat University, Thailand



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Compact Rail to Rail CMOS Voltage Follower

Patt Boonyaporn and Varakorn Kasemsuwan  
 Department of Electronics, Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)  
 Tel. +66-2-326-9968 Ext. 102, Fax.: +66-2-739-2398  
 e-mail: [kkvarako@kmitl.ac.th](mailto:kkvarako@kmitl.ac.th)

**Abstract:** A compact rail to rail CMOS voltage follower is presented. The circuit is based on the symmetrical class AB voltage follower and can operate under supply voltages of  $\pm 1.5$  V. The proposed circuit has power dissipation of 5.2mW under quiescent condition and can drive  $\pm 1.25$  V to 250  $\Omega$  load with a total harmonic distortion of less than 0.5 percent and cut off frequency of 237 MHz. Although simple, the proposed circuit enables the output transistors to drive load efficiently.

## 1. Introduction

An integrated voltage follower is one of the indispensable blocks in many analog VLSI systems. At present, most system requirements make it necessary for the follower to be able to drive low-resistance loads while, at the same time, handle large output voltage swing and maintain low harmonic distortion. Several approaches have been proposed to achieve this goal [1-6]. One among the most popular approaches for realizing such follower is to employ a pseudo source follower which has a pair of complementary common-source MOS transistors. A pseudo source follower has a key advantage in that it offers small output impedance. Moreover, the pseudo source follower offers a larger output voltage swing compared to a simple common drain type source follower. However, this approach suffers from the difficulty in the control of the quiescent current as a result of the random threshold voltage and high transconductance of pullup and pulldown parts. Therefore, any practical circuit using such approach needs to incorporate an additional mechanism to control the quiescent current. In addition, compensation capacitors are required to improve the stability and the transient response and thus requiring large chip area. Kadanka et al.[7] has proposed wild swing voltage follower without feedback. The circuit contains both BJTs and MOS transistors and is based on a double buffer implemented in the class AB emitter follower configuration. BJTs are employed as a core part and connected as an emitter follower due to two main reasons: 1) BJT has higher transconductance over MOS transistor, and 2) the mismatch in base-emitter voltage ( $\Delta V_{BE}$ ) of npn and pnp is much less than the mismatch in the gate-source voltage ( $\Delta V_{GS}$ ) of NMOS and PMOS. The circuit shows good dynamic performance, good stability and low power dissipation. The circuit implementation however requires BiCMOS process which has lower level of integration and higher power dissipation compared to the well known CMOS technology.

This paper presents a compact rail to rail CMOS voltage follower which is capable of handling large output voltage swing and maintaining low harmonic distortion. The circuit

is based on the symmetrical voltage follower with additional circuit to enhance transconductance and, at the same time, reduce gate-source voltage mismatch. The circuit can operate under  $\pm 1.5$ V supplies and can drive  $\pm 1.25$ V to 250  $\Omega$  load with a total harmonic distortion of less than 0.5 percent and cut off frequency of 237 MHz. The power dissipation under quiescent condition is 5.2mW.

## 2. Circuit Description

A conventional symmetrical voltage follower is shown in Fig. 1. The circuit consists of four transistors (M1-M4) connecting in the two stage common drain (double buffer) using class AB configuration. This configuration however has three main drawbacks: 1) a large offset voltage due to the mismatch between the gate-source voltage of NMOS and PMOS, 2) a high output impedance due to a reduced transconductance ( $g_m$ ) of the MOS transistor compared to BJT's counterpart, and 3) a significant limitation in the linear output swing. All these problems can be alleviated using the proposed circuit shown in Fig. 2.

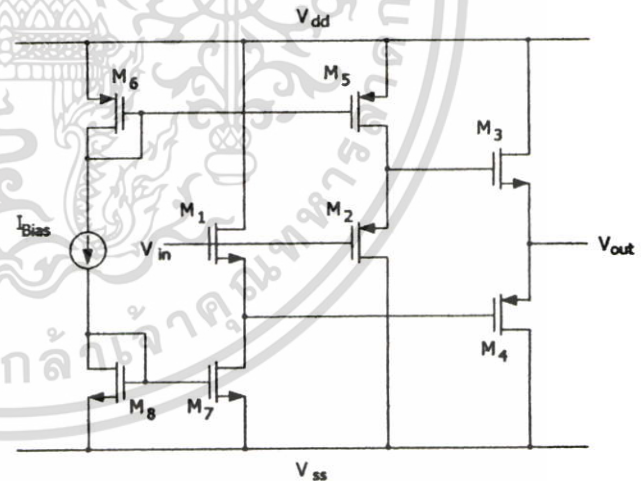


Figure 1. Conventional symmetrical voltage follower.

The proposed circuit in Fig. 2 is based on the symmetrical voltage follower described in Fig.1. The four transistors (M1, M3, M5 and M7) work as two stage common drain stage and are biased by current mirrors implemented by both NMOS and PMOS transistors (M2-M4 and M6-M8) with a transfer current ratio of  $\alpha$  (see Fig.2). Since M1 has the same drain current as M2 and M3 has the same drain current as M4, the gate-source voltages of M1 and M3 are then nearly equal provided that all NMOS have the same dimensions and all PMOS have the

same dimensions. This gate-source voltage matching approach is also applied to the upper follower (M5-M8). As a result, the offset voltage of the voltage follower has been minimized[8].

The transconductance of the output MOS transistors can be increased by using two compound transistors as suggested in [8] consisting of M1-M4 and M5-M8. The transconductance of the lower follower (M1-M4) and upper follower (M5-M8) are given by Eqs.(1a) and (1b) as

$$g_{m(LOWER)} = \frac{g_{m1} \cdot g_{m3}}{g_{m1} - \alpha \cdot g_{m3}} \quad (1a)$$

$$g_{m(UPPER)} = \frac{g_{m5} \cdot g_{m7}}{g_{m5} - \alpha \cdot g_{m7}} \quad (1b)$$

respectively.

From Eqs.(1a) and (1b), the transconductance of output transistors can be adjusted through the transfer current ratio  $\alpha$ . The simulation shows that proper value of  $\alpha$  can result in very high transconductance.

For the input voltage with the amplitude in between  $V_{LOW}$  and  $V_{HIGH}$ , the circuit will operate as a conventional voltage follower with an enhanced transconductance and the reduced gate-source voltage

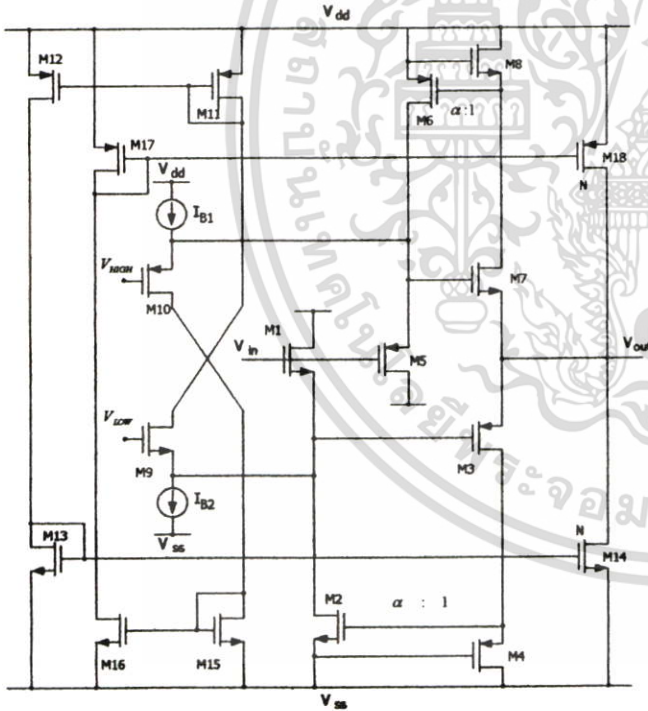


Figure 2. Proposed rail to rail voltage follower

mismatch. By using Eqs.(1a) and (1b), the output impedance of the circuit is given by

$$R_o = \left( \frac{1}{g_{m3}} - \frac{\alpha}{g_{m1}} \right) \left\| \left( \frac{1}{g_{m7}} - \frac{\alpha}{g_{m5}} \right) \right. \quad (2)$$

If the input voltage is lower than  $V_{LOW}$ , the bias current  $I_{B2}$  for both transistors M1 and M9, which are connected as

a differential amplifier, mostly becomes the drain current of M9 and is mirrored by two current mirrors M11-M12 and M13-M14. M14, which has its width N-times that of M13, now acts as bias current for the upper voltage follower(M5-M8). The output is capable to swing within one overdrive ( $V_{DSAT14}$ ) of the negative supply with the output impedance  $R_{O(LOW)}$  given by  $1/g_{m7} - \alpha/g_{m5}$ . Similarly, if the input voltage is higher than  $V_{HIGH}$ , the bias current  $I_{B1}$  for transistors M5 and M10, which are connected as a differential amplifier, mostly becomes the drain current of M10 and is mirrored by two current mirrors M15-M16 and M17-M18. M18, which has its width N-times that of M17, now acts as bias current for the lower voltage follower (M1-M4). The output in this case is capable to swing within one overdrive ( $V_{DSAT18}$ ) of the positive supply with the output impedance  $R_{O(HIGH)}$  given by  $1/g_{m3} - \alpha/g_{m1}$ .

A low quiescent current of the circuit are obtained by properly selecting biasing currents  $I_{B1}$  and  $I_{B2}$  and two bias voltages  $V_{HIGH}$  and  $V_{LOW}$ . We have chosen the  $V_{HIGH}$  and  $V_{LOW}$  to be 0.5 V and -0.5 V and  $I_{B1}$  and  $I_{B2}$  to be 10  $\mu$ A respectively. The quiescent current as a result is found to be 550  $\mu$ A.

### 3. Experimental Results

To evaluate the performance of the proposed circuit, the simulation is performed using HSPICE with a standard twin well 0.6  $\mu$ m CMOS technology. All  $W/L$  values of the transistors used in the circuit are summarized in Table I. It is noted that the mobility of the electron in this process is approximately four times that of hole and the transfer current ratio  $\alpha$  used in this work is around 1/8. The simulation results show high performance characteristics, namely low output impedance, low harmonic distortion, large linear output voltage swing, wide bandwidth and low power dissipation. The proposed voltage follower is connected to drive  $\pm 1.25$  V to 250  $\Omega$  load and the highest output impedance of the circuit is found to be less than 3.8  $\Omega$  while the harmonic distortion is less than 0.5 percent. Figure 3 shows DC transfer characteristics of the circuit with the same load. Dotted and solid lines represent input and output waveform respectively. As seen, the output can trace the input over a wide range linearly. Figure 4 show output waveform of the circuit with the input signal is 1kHz at 1.5V<sub>p-p</sub>. Figure 5 shows a frequency response of the circuit. The cut off frequency is found to be 237MHz. Figure 6 shows the output impedance of the proposed follower. It can be seen that low output impedance can be obtained. in the range of operation ( $\pm 1.25$ V) with maximum value of 3.8 $\Omega$ . Figure 7 show the THD versus the input voltage for 1kHz sinusoidal signal. The power dissipation is 5.2mW under quiescent condition.

### 4. Conclusions

A compact rail to rail CMOS voltage follower is presented. The circuit is based on the symmetrical class AB voltage follower and can operate under supply voltages of  $\pm 1.5$  V. The proposed circuit has power dissipation of 5.2mW under quiescent condition and can drive  $\pm 1.25$  V to 250  $\Omega$  load with a total harmonic distortion of less than 0.5 percent and

cut off frequency of 237 MHz. The maximum output impedance is less than 3.8 Ω. Although simple, the proposed circuit enables the output transistors to drive load efficiently.

Table 1. Aspect ratio of transistors

Transistors	Aspect Ratios (W/L)
M1,M2,M9	55/1
M3,M4	750/0.6
M5,M6,M10	220/1
M7,M8	450/0.6
M11,M12,M17	4.6/1
M13,M15,M16	1.2/1
M14	380/0.6
M18	1305/0.6

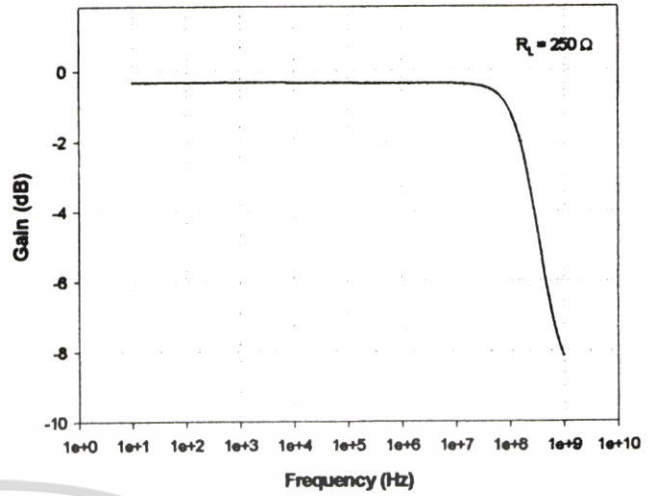


Figure 5. Frequency response of the proposed follower

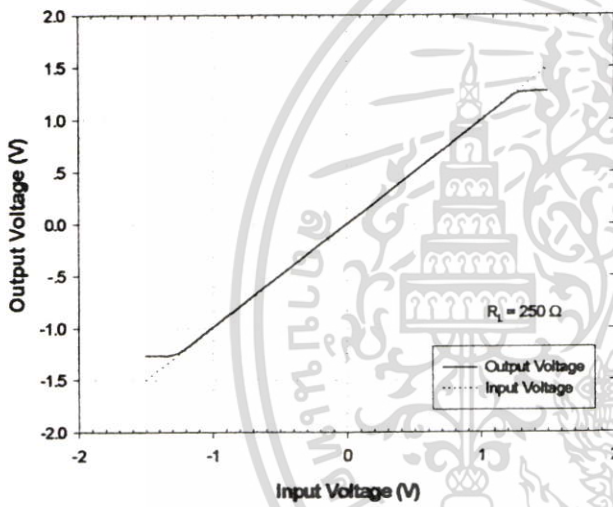


Figure 3. Dc transfer characteristics

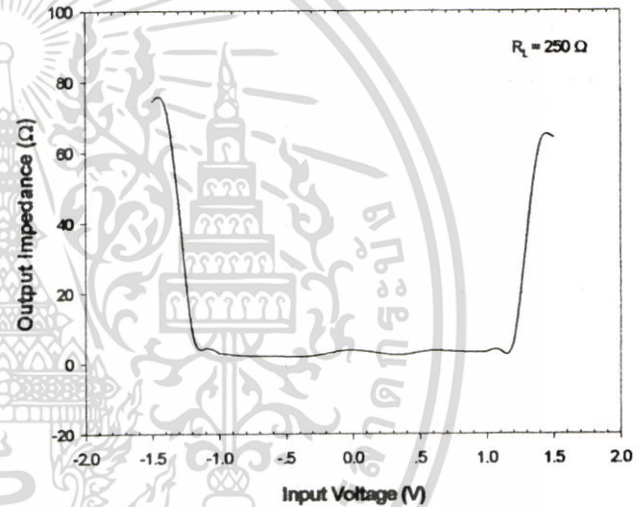


Figure 6. Output impedance

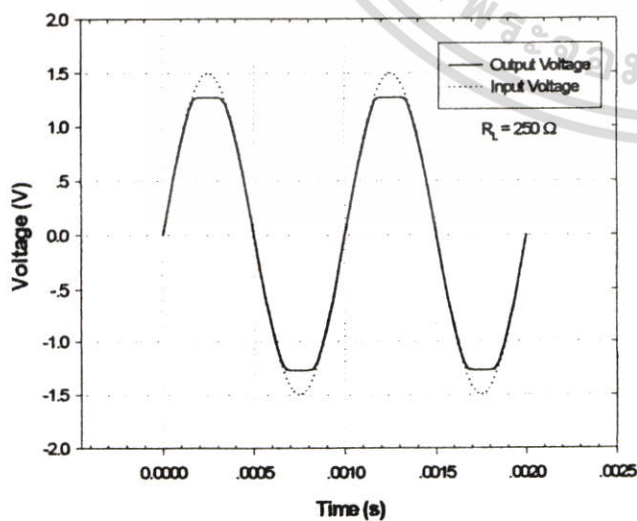


Figure 4. Output waveform

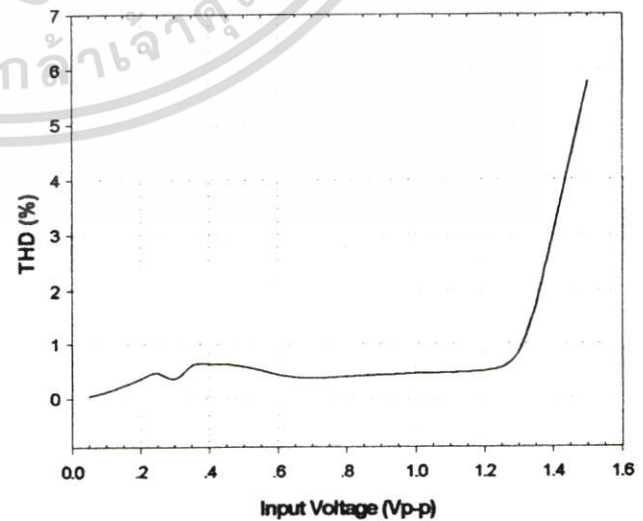


Figure 7. Total harmonic distortion (THD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

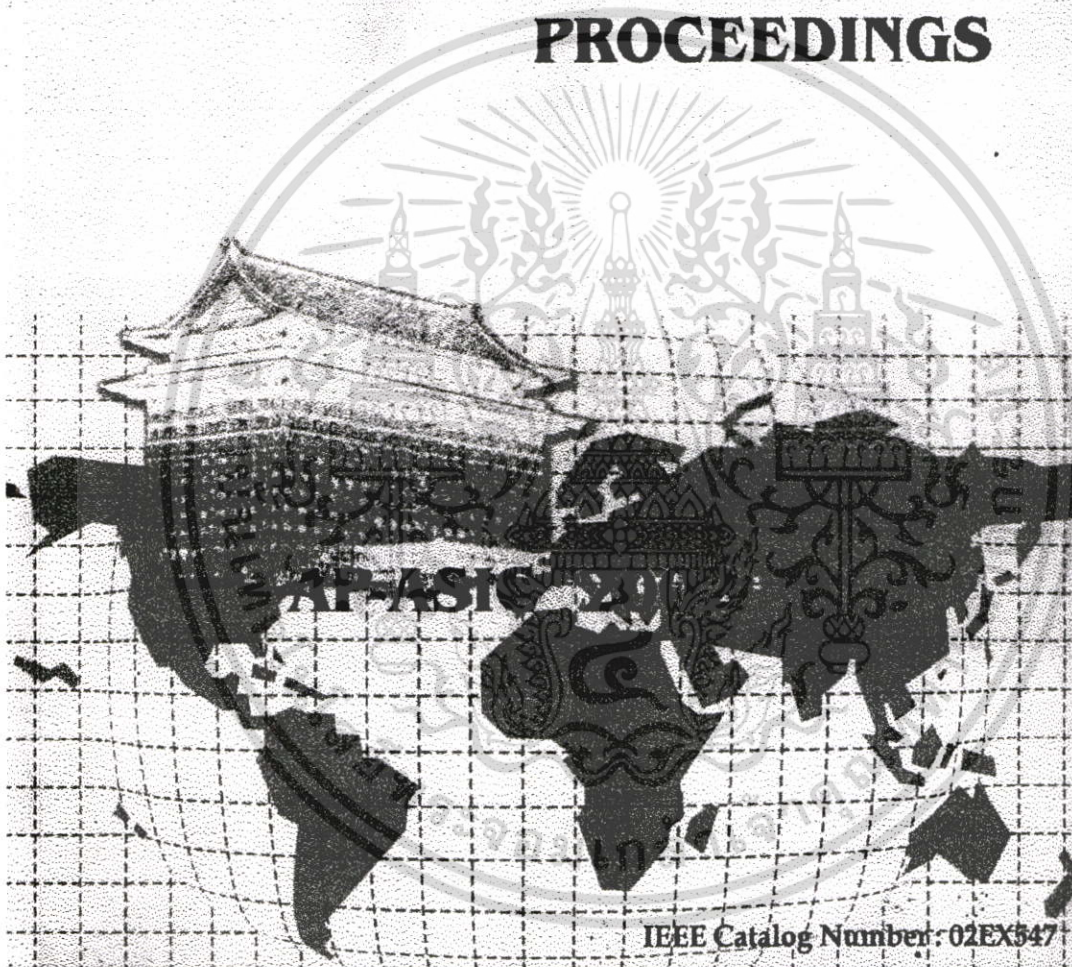
## 5. References

- [1] Ahuja, B.K., Gray, P.R., Baxter, W.M., and Uehara, G.T., "A programmable CMOS dual channel interface processor for telecommunications applications," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-19, pp. 892-899, Dec. 1984.
- [2] Brehmer, K.E., and Wieser J.B., "Large swing CMOS power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-18, pp. 624-629, Dec. 1983.
- [3] Fisher J.A., "A high performance CMOS power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.* Vol. SC-20, pp. 1200-1205, Dec. 1985.
- [4] Nagaraj, K., "Large-swing CMOS buffer amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-24, pp.181-183, Feb. 1989.
- [5] Mistlberger, F., and Kock, R., "Class AB High swing CMOS power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-27, pp. 1089-1092, July 1992.
- [6] Sekerkiran, B., "A compact rail-to-rail output stage for CMOS operation amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-34, pp. 107-110, Jan. 1999.
- [7] Kadanka, P., and Rozsypal, A., "Rail-to rail voltage follower without feedback", *Electronics Letters*, Vol. 36, pp. 104-105, Jan. 2000.
- [8] Manetakis, K., and Toumazou, C., "A new high-frequency very low output-impedance CMOS buffer," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 1, pp. 485-488, 1996.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2002 IEEE ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON ASIC PROCEEDINGS



**Grand Hotel , Taipei , Taiwan**

**AUGUST 6-8 , 2002**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A High Performance Class AB CMOS Rail to Rail Voltage Follower

*Patt Boonyaporn and Varakorn Kasemsuwan*  
 Department of Electronics, Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)  
 Phone: 66-2-326-9968 Ext. 102, Fax: 66-2-739-2398  
 Email: [kkvarako@kmitl.ac.th](mailto:kkvarako@kmitl.ac.th)

## ABSTRACT

A high performance class AB CMOS rail to rail voltage follower is presented. The circuit is based on the symmetrical class AB voltage follower and can operate under supply voltages of  $\pm 1.5$  V. The proposed circuit has power dissipation of 2.5mW under quiescent condition and can drive  $\pm 1.2$  V to 250  $\Omega$  load with a total harmonic distortion of less than 0.6 percent and cut off frequency of 131 MHz. Although simple, the proposed circuit enables the output transistors to drive load efficiently.

**Keywords-** CMOS analog integrated circuits, output stages.

## 1. INTRODUCTION

An integrated voltage follower is one of the indispensable blocks in many analog VLSI systems. At present, most system requirements make it necessary for the follower to be able to drive low-resistance loads while, at the same time, handle large output voltage swing and maintain low harmonic distortion. Several approaches have been proposed to achieve this goal [1-6]. One among the most popular approaches for realizing such follower is to employ a pseudo source follower which has a pair of complementary common-source MOS transistors with two feedback loops consisting of a pair of complementary error amplifiers. A pseudo source follower has a key advantage in that it offers small output impedance mainly due to the use of negative feedback. Moreover, the pseudo source follower offers a larger output voltage swing compared to a simple common drain type source follower. However, this approach suffers from the difficulty in the control of the quiescent current as a result of the random threshold voltage and high transconductance of pullup and pulldown parts. Therefore, any practical circuit using such approach needs to incorporate an additional mechanism to control the quiescent current. In addition, compensation capacitors are required to improve the stability and the transient response and thus requiring large chip area. Kadanka et al.[7] has proposed wild swing voltage follower without feedback. The circuit contains both BJTs and MOS transistors and is based on a double buffer implemented

in the class AB emitter follower configuration. BJTs are employed as a core part connecting as an emitter follower. An additional biasing control circuits are incorporated into emitter follower enabling the output to be able to swing close to both positive and negative supplies. The main reasons of having BJT as emitter follower are two folds: 1) BJT has higher transconductance over MOS transistor resulting in lower output impedance, and 2) the mismatch in base-emitter voltage ( $\Delta V_{BE}$ ) of npn and pnp is much less than the mismatch in the gate-source voltage ( $\Delta V_{GS}$ ) of NMOS and PMOS resulting in smaller offset voltage. The circuit shows good dynamic performance, good stability and low power dissipation. The circuit implementation however requires BiCMOS process which has lower level of integration and higher power dissipation compared to the well known CMOS technology.

This paper presents a high performance class AB CMOS rail to rail voltage follower which is capable of handling large output voltage swing and maintaining low harmonic distortion. The circuit is based on the symmetrical voltage follower with additional circuit to enhance transconductance and, at the same time, reduce gate-source voltage mismatch. The circuit can operate under  $\pm 1.5$ V supplies and can drive  $\pm 1.2$ V to 250  $\Omega$  load with a total harmonic distortion of less than 0.6 percent and cut off frequency of 131 MHz. The power dissipation under quiescent condition is 2.5mW.

## 2. CIRCUIT DESCRIPTION

A conventional symmetrical voltage follower is shown in Figure 1. The circuit consists of four transistors (M1-M4)

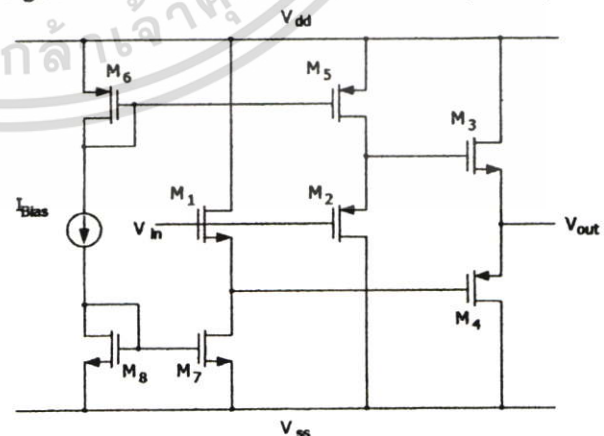


Figure 1. Conventional symmetrical voltage follower

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

connecting in the two stage common drain(double buffer) using class AB configuration. This configuration however has three main drawbacks: 1) a large offset voltage due to the mismatch between the gate-source voltage of NMOS and PMOS, 2) a high output impedance due to a reduced transconductance( $g_m$ ) of the MOS transistor compared to BJT's counterpart, and 3) a significant limitation in the linear output swing. All these problems can be alleviated using the proposed circuit shown in Figure 2.

The proposed circuit in Figure 2 is based on the symmetrical voltage follower described in Figure 1. The four transistors (M1, M3, M5 and M7) work as two stage common drain stage and are biased by current mirrors implemented by both NMOS and PMOS transistors (M2-M4 and M6-M8) with a transfer current ratio of  $\alpha$ (see Figure 2). Since M1 has the same drain current as M2 and M3 has the same drain current as M4, the gate-source voltages of M1 and M3 are then nearly equal provided that all NMOS have the same dimensions and all PMOS have the same dimensions. This gate-source voltage matching approach is also applied to the upper follower (M5-M8). As a result, the offset voltage of the voltage follower has been minimized[8].

The transconductance of the output MOS transistors can be increased by using two compound transistors as suggested in [8] consisting of M1-M4 and M5-M8. The transconductance of the lower follower (M1-M4) and upper follower (M5-M8) are given by Eqs.(1a) and (1b) as

$$g_{m(LOWER)} = \frac{g_{m1} \cdot g_{m3}}{g_{m1} - \alpha \cdot g_{m3}} \quad (1a)$$

$$g_{m(UPPER)} = \frac{g_{m5} \cdot g_{m7}}{g_{m5} - \alpha \cdot g_{m7}} \quad (1b)$$

respectively.

From Eqs.(1a) and (1b), the transconductance of output transistors can be adjusted through the transfer current ratio  $\alpha$ . The simulation shows that proper value of  $\alpha$  can result in very high transconductance.

For the input voltage with the amplitude in between  $V_{LOW}$  and  $V_{HIGH}$ , the circuit will operate as a conventional voltage follower with an enhanced transconductance and the reduced gate-source voltage mismatch. By using Eqs.(1a) and (1b), the output impedance of the circuit is given by

$$R_o = \left( \frac{1}{g_{m3}} - \frac{\alpha}{g_{m1}} \right) \left\| \left( \frac{1}{g_{m7}} - \frac{\alpha}{g_{m5}} \right) \right. \quad (2)$$

If the input voltage is lower than  $V_{LOW}$ , the bias current  $I_{B2}$  for both transistors M1 and M9, which are connected as a differential amplifier, mostly becomes the drain current of M9 and is mirrored by two current mirrors M11-M12 and M13-M14. M14, which has its width N-times that of M13, now acts as bias current for the upper voltage follower(M5-M8). The output is capable to swing within one overdrive ( $V_{DSAT14}$ ) of the negative supply with the output impedance  $R_{o(LOW)}$  given by  $1/g_{m7} - \alpha/g_{m5}$ . Similarly, if the input voltage is higher than  $V_{HIGH}$ , the bias current  $I_{B1}$  for transistors M5 and M10, which are connected as a differential amplifier, mostly becomes the drain current of M10 and is mirrored by two current mirrors M15-M16 and M17-M18. M18, which has its width N-times that of M17, now acts as bias current for the lower voltage

follower (M1-M4). The output in this case is capable to swing within one overdrive ( $V_{DSAT18}$ ) of the positive supply with the output impedance  $R_{o(HIGH)}$  given by  $1/g_{m3} - \alpha/g_{m1}$ .

A low quiescent current of the circuit are obtained by properly selecting biasing currents  $I_{B1}$  and  $I_{B2}$  and two bias voltages  $V_{HIGH}$  and  $V_{LOW}$ . We have chosen the  $V_{HIGH}$  and  $V_{LOW}$  to be 0.5 V and -0.5 V and  $I_{B1}$  and  $I_{B2}$  to be 10  $\mu$ A respectively. The quiescent current as a result is found to be 550  $\mu$ A.

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

To evaluate the performance of the proposed circuit, the simulation is performed using HSPICE with a standard twin

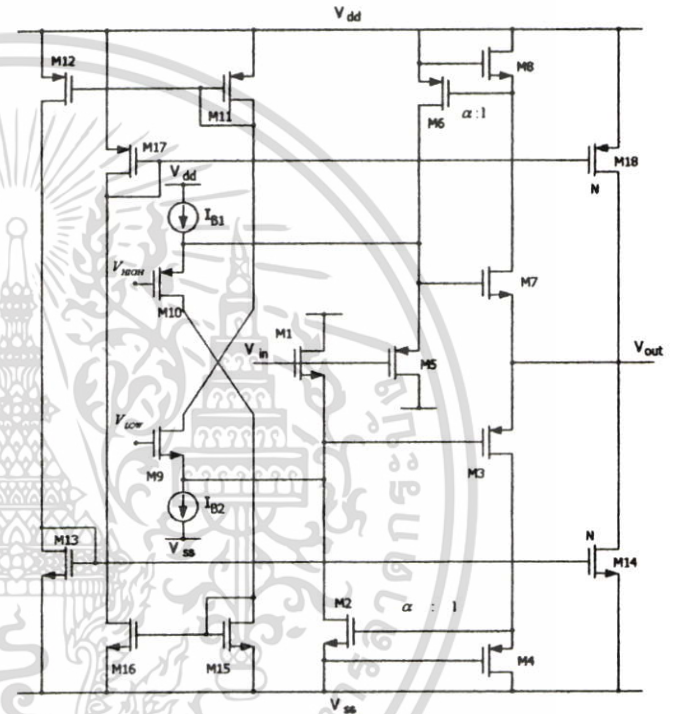


Figure 2. Proposed rail to rail voltage follower

well 0.6  $\mu$ m CMOS technology. All W/L values of the transistors used in the circuit are summarized in Table I. It is noted that the mobility of the electron in this process is approximately four times that of hole and the transfer current ratio  $\alpha$  used in this work is around 1/4. The simulation results show high performance characteristics, namely low output impedance, low harmonic distortion, large linear output voltage swing, wide bandwidth and low power dissipation. The proposed voltage follower is connected to drive  $\pm 1.2$  V to 250  $\Omega$  load and the highest output impedance of the circuit is found to be less than 6.7  $\Omega$  while the harmonic distortion is less than 0.6 percent. Figure 3 shows DC transfer characteristics of the circuit with the same load. Dotted and solid lines represent input and output waveform respectively. As seen, the output can trace the input over a wide range linearly. Figure 4 shows the output impedance of the proposed follower. It can be seen that low output impedance can be obtained in the range of operation ( $\pm 1.2$ V) with maximum value of 6.7 $\Omega$ . Figure 5 shows a frequency response of the circuit. The cut off frequency is found to be 131MHz. The power dissipation is 2.5mW under quiescent condition.

## 4. CONCLUSIONS

A high performance class AB CMOS rail-to-rail voltage follower is presented. The circuit is based on the symmetrical class AB voltage follower and can operate under supply voltages of  $\pm 1.5$  V. The proposed circuit has power dissipation of 2.5mW under quiescent condition and can drive  $\pm 1.2$  V to 250  $\Omega$  load with a total harmonic distortion of less than 0.6 percent and cut off frequency of 131 MHz. The maximum output impedance is less than 6.7  $\Omega$ . Although simple, the proposed circuit enables the output transistors to drive load efficiently.

Table I Aspect ratio of transistors

Transistors	Aspect Ratios(W/L)
M1,M2,M9	55/1
M3,M4	880/1
M5,M6,M10	220/1
M7,M8	217/1
M11,M12,M17	4.5/1
M13,M15,M16	1.2/1
M14	372/0.6
M18	1305/0.6

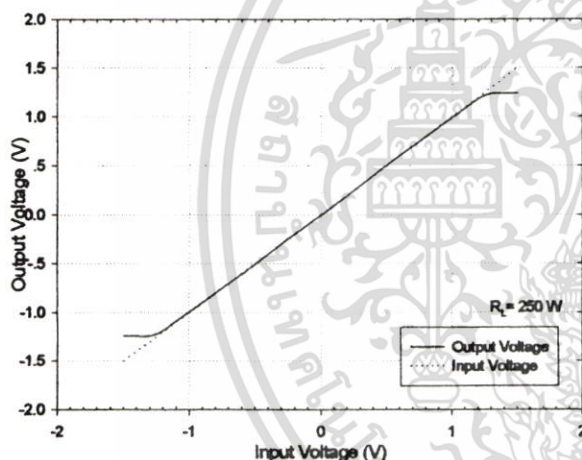


Figure 3. DC transfer characteristics.

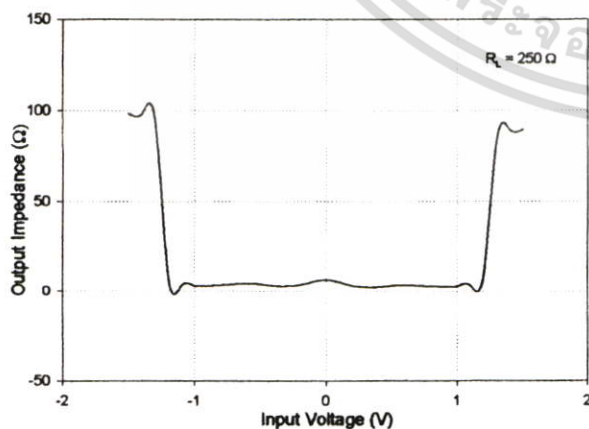


Figure 4. Output Impedance

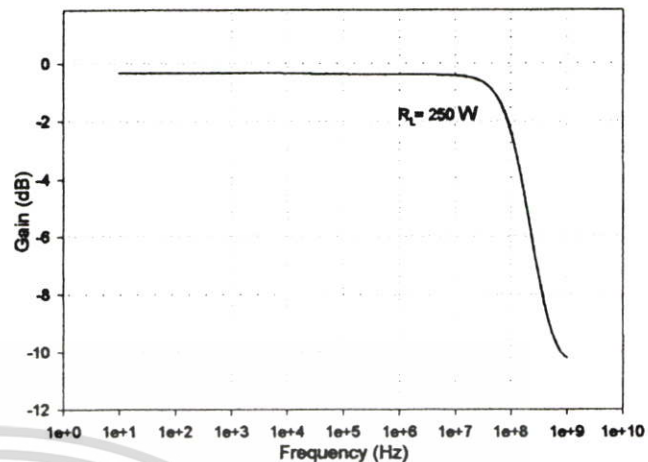


Figure 5. Frequency response of the proposed follower

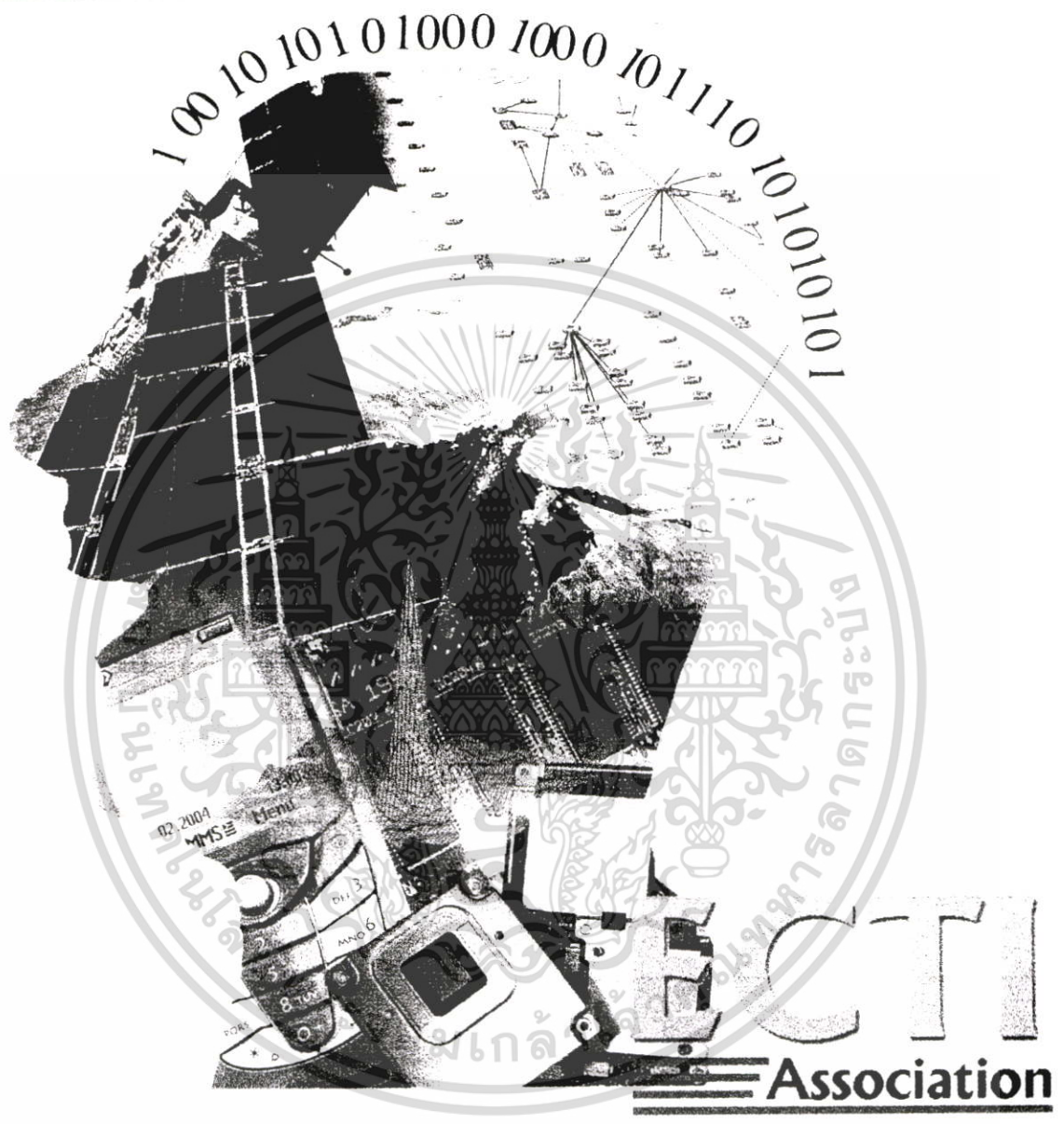
## 5. REFERENCES

- [1] Ahuja, B.K., Gray, P.R., Baxter, W.M., and Uehara, G.T., "A programmable CMOS dual channel interface processor for telecommunications applications," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-19, pp. 892-899, Dec. 1984.
- [2] Brehmer, K.E., and Wieser J.B., "Large swing CMOS power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-18, pp. 624-629, Dec. 1983.
- [3] Fisher J.A., "A high performance CMOS power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.* Vol. SC-20, pp. 1200-1205, Dec. 1985.
- [4] Nagaraj, K., "Large-swing CMOS buffer amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-24, pp.181-183, Feb. 1989.
- [5] Mislberger, F., and Kock, R., "Class AB High swing CMOS power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-27, pp. 1089-1092, July 1992.
- [6] Sekeriran, B., "A compact rail-to-rail output stage for CMOS operation amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circ.*, Vol. SC-34, pp. 107-110, Jan. 1999.
- [7] Kadanka, P., and Rozsypal, A., "Rail-to rail voltage follower without feedback", *Electronics Letters*, Vol. 36, pp. 104-105, Jan. 2000.
- [8] Manetakis, K., and Toumazou, C., "A new high-frequency very low output-impedance CMOS buffer," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 1, pp. 485-488, 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ECTI-CON 2005

The 2005 ECTI International Conference



May 12-13, 2005  
 Asia Pattaya Beach Hotel, Pattaya, Choburi, THAILAND



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Rail to Rail CMOS Current Feedback Operational Amplifier

P. Boonyaporn<sup>1</sup>, W. Nakhlo<sup>1</sup>, K. Vichienchom<sup>1</sup>, V. Kasemsuwan<sup>2</sup> and H. K. Ahn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)  
Tel. +66-2-326-9968 Ext. 102, Fax.: +66-2-739-2398

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-701, Konkuk University, Seoul, Korea  
E-Mail: kkvarako@kmitl.ac.th, hkahn@konkuk.ac.kr

## ABSTRACT

A rail to rail CMOS current feedback operational amplifier is presented. The circuit is designed based on the basic CFOA topology using 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS technology and can operate under the supply voltages of  $\pm 1.5$  V. The proposed circuit has power dissipation of 13.6 mW and can drive  $\pm 1.0$  V to 250  $\Omega$  load. The open loop transimpedance gain is 85  $\Omega\text{dB}$ . The slew rates (+/-) are found to be 395/378 V/ $\mu\text{s}$ .

**Keywords:** Current feedback operational amplifier, CMOS analog design.

## 1. INTRODUCTION

The current feedback operational amplifier (CFOA) or transimpedance amplifier is used extensively throughout electronic equipments due to several advantages unobtainable from the conventional voltage feedback operational amplifier (VFOA). These advantages include very high slew rate and less restriction on the gain-bandwidth trade-off. High slew rate of CFOA alleviates the distortion problems in high frequency amplification while gain-bandwidth independency allows the designer to achieve both gain and bandwidth simultaneously.

At present, several approaches have been proposed to implement the current feedback operational amplifier (CFOA) [1-4]. Manetakos et al. [1-2] have proposed a high performance CMOS CFOA. Their circuit shows wide bandwidth with good linearity. The circuits however have limitation on the input/output swings making the circuits inappropriate for low voltage applications. Giustolisi et al. [3] have proposed high drive CMOS CFOA capable of driving load as low as 50 $\Omega$  with the output sinusoidal voltage of 2V<sub>pp</sub> under the supply voltage of 5 V supply. The circuit shows large distortion which is mainly due to the limited slew rate (4 V/ $\mu\text{s}$ ).

This paper presents a rail to rail CMOS current feedback operational amplifier. The circuit shows high slew rate and is capable of handling large input and output voltage swings. The proposed circuit operates under  $\pm 1.5$  V supplies and can drive  $\pm 1.0$  V to the resistive load of 250  $\Omega$ . The open loop transimpedance gain of the circuit is 85  $\Omega\text{dB}$ . The power dissipation is 13.6 mW.

## 2. CIRCUIT DESCRIPTION

A basic CFOA topology is shown in Fig. 1. CFOA basically consists of three stages which are: 1) input voltage

buffer, 2) output voltage buffer and 3) current mirror. The inverting and non-inverting inputs of CFOA correspond to the input and output of the input buffer, respectively. The current mirror consists to be the second stage. This second stage mirrors the current at the inverting terminal ( $I_{inv}$ ) and converts that current into voltage across a high impedance node determining the open loop gain of the CFOA. The output buffer serves two purposes which are: 1) transferring the voltage produced at this high impedance node to the output and 2) driving the output load.

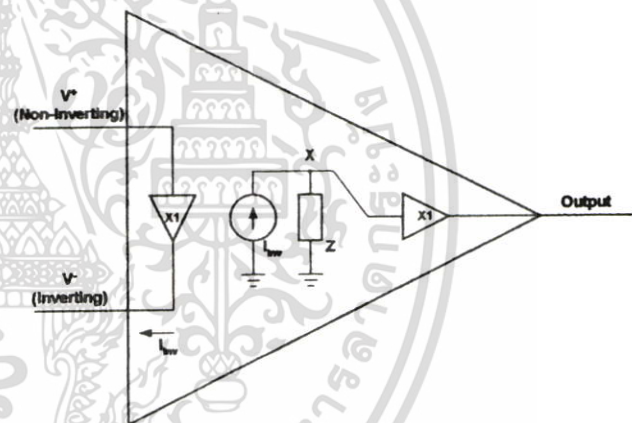


Fig. 1: Basic CFOA topology.

Fig. 2 shows our proposed CFOA current feedback operational amplifier (CFOA). The design is based on the topology described in Fig. 1. The transistor Mi1-Mi18 work as unity gain input buffer. Mi4,14,8,18 and Mc1-Mc12 form the regulated cascaded current mirrors [5] which are used to copy the current from the inverting terminal. The mirrored current is transformed to the voltage at the high impedance node X. The impedance at node X is large due to the regulated cascade current mirror by Mc1 to Mc12. Transistors Mi1, Mi3, Mi5 and Mi7 work as two stage common drain stage and are biased by current mirrors implemented by both NMOS (Mi2-Mi4) and PMOS (Mi6-Mi8) with a transfer current ratio of  $\alpha_i$  (see Fig.2). Since Mi1 has the same drain current as Mi2 and Mi3 has the same drain current as Mi4, the gate-source voltages of Mi1 and Mi3 are then nearly equal provided that all NMOS have the same dimensions and all PMOS have the same dimensions. This gate-source voltage matching approach is also applied to the upper follower (Mi5-Mi8). As a result, the offset voltage of the voltage follower can be minimized [6].

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

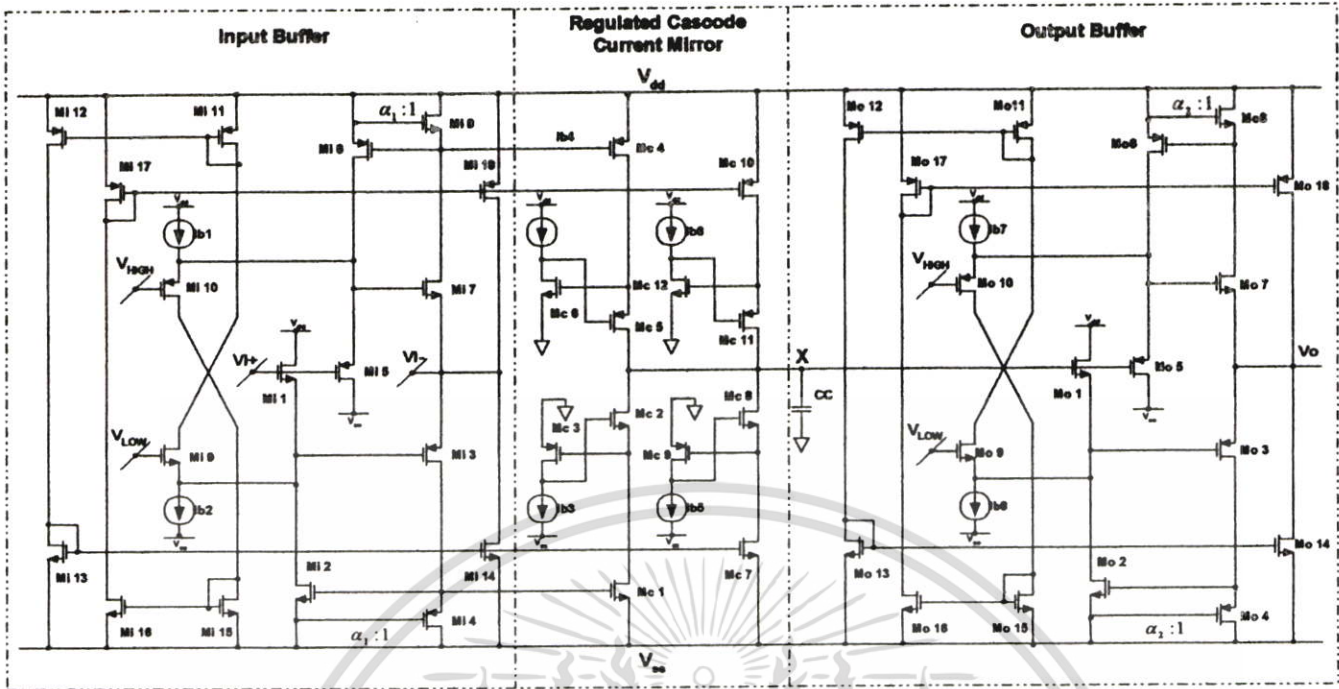


Fig.2: The proposed current feedback operational amplifier (CFOA)

The transconductance of the output MOS transistors is increased by using two compound transistors as suggested in [6] consisting of Mi1-Mi4 and Mi5-Mi8. The transconductance of the lower follower (Mi1-Mi4) and upper follower (Mi5-Mi8) are given by Eqs.(1a) and (1b) as

$$g_{m(LOWER)} = \frac{g_{m1} \cdot g_{m3}}{g_{m1} - \alpha_1 \cdot g_{m3}} \quad (1a)$$

$$g_{m(UPPER)} = \frac{g_{m5} \cdot g_{m7}}{g_{m5} - \alpha_1 \cdot g_{m7}} \quad (1b)$$

respectively.

From Eqs.(1a) and (1b), the transconductance of output transistors can be adjusted through the transfer current ratio  $\alpha_1$ . The simulation shows that proper value of  $\alpha_1$  can result in very high transconductance.

For the input voltage with the amplitude in between  $V_{LOW}$  and  $V_{HIGH}$ , the circuit will operate as a conventional voltage follower with an enhanced transconductance and the reduced gate-source voltage mismatch. By using Eqs.(1a) and (1b), the output impedance of the circuit is given by

$$R_o = \left( \frac{1}{g_{m3}} - \frac{\alpha_1}{g_{m1}} \right) \parallel \left( \frac{1}{g_{m7}} - \frac{\alpha_1}{g_{m5}} \right) \quad (2)$$

If the input voltage is lower than  $V_{LOW}$ , the bias current  $I_{b2}$  for both transistors Mi1 and Mi9, which are connected as a differential amplifier, mostly becomes the drain current of Mi9 and is mirrored by two current

mirrors Mi11-Mi12 and Mi13-Mi14. Large Mi14 will supply a bias current for the upper voltage follower (Mi5-Mi8). It can be seen that the buffer output is capable to swing within one overdrive ( $V_{DSAT14}$ ) of the negative supply with the output impedance  $R_{O(LOW)}$  given by  $1/g_{m7} - \alpha/g_{m5}$ . Similarly, if the input voltage is higher than  $V_{HIGH}$ , the bias current  $I_{b1}$  for transistors M5 and M10, which are connected as a differential amplifier, mostly becomes the drain current of Mi10 and is mirrored by two current mirrors Mi15-Mi16 and Mi17-Mi18. Mi18 acts as bias current for the lower voltage follower (Mi1-Mi4). The output voltage in this case is allowed to swing within one overdrive ( $V_{DSAT18}$ ) of the positive supply with the output impedance  $R_{O(HIGH)}$  given by  $1/g_{m3} - \alpha_1/g_{m1}$ .

The output buffer as shown in Fig. 2 operates in the same manner as that of the input buffer. For voltage amplitude at node X swinging within  $V_{LOW}$  and  $V_{HIGH}$ , Mo1, Mo3, Mo5 and Mo7 operate as unity gain using conventional two stage common drain stage. The bias is via the current mirrors implemented by both NMOS (Mo2 and Mo4) and PMOS transistors (Mo6 and Mo8) with a transfer current ratio of  $\alpha_2$ . Mo2, Mo4 and Mo6, Mo8 forces the gate-source voltages of lower voltage follower (Mo1 and Mo3) and upper follower (Mo5 and Mo7) to be nearly equal to the gate source voltages of Mo5 and Mo7 and thus eliminating the offset voltage. When the signal voltage at high impedance node X is higher and lower than  $V_{HIGH}$  and  $V_{LOW}$ , the upper and lower voltage followers will alternatively operate respectively as explained earlier. It is noted that the input buffer does not need to supply large amount of current while the output buffer has to supply sufficient current to the load to maintain the linearity of the circuit. As a

result, the transistor dimensions of the output buffer are relatively much larger than those of the input buffer.

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

To evaluate the performance of the proposed circuit, the simulation is performed using HSPICE with a standard 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS technology. The power supply voltage and the bias current have been set to  $\pm 1.5$  V and 10  $\mu\text{A}$  respectively. The simulation results show high performance characteristics, i.e., high slew rates, independent gain-bandwidth product, large input and output voltage swings, wide bandwidth and low power dissipation. The aspect ratio of transistors and the performance of the proposed CFOA are summarized in Table 1 and 2 respectively. Fig. 3 illustrates the frequency response of the proposed CFOA, connected in the non-inverting configuration, with different values of gain. As seen, the resulting circuit exhibits less gain bandwidth product dependency. The open loop transimpedance gain is shown in Fig. 4. The open loop gain is 85  $\Omega\text{dB}$ . Fig. 5 shows the transient simulation of the CFOA, connected in the non-inverting configuration, with 20 dB gain at 1 MHz. Fig. 6 shows the step response of CFOA driving a 250 $\Omega$ /10pF load with a gain of 2. The power dissipation of the proposed CFOA is 13.6 mW.

Table 1: Aspect ratio of transistors

Transistors	Aspect Ratios (W/L)
Mi1, Mi2, Mi9	12/1
Mi3, Mi4	85/1
Mi5, Mi6, Mi10	40/1
Mi7, Mi8	24/1
Mi11, Mo11	4.5/1
Mi12, Mi17, Mo12, Mo17	43/1
Mi13, Mi16, Mo13, Mo16	11/1
Mi14	30/1
Mi15, Mo15	1.2/1
Mi18	100/1
Mc1	25/1
Mc2	24/1
Mc3	7/1
Mc4	82/1
Mc5	80/1
Mc6	3/1
Mc7	35/1
Mc8	35/1
Mc9	2/1
Mc10	100/1
Mc11	80/1
Mc12	1.5/1
Mo1, Mo2, Mo3	35/1
Mo3, Mo4	530/0.5
Mo5, Mo6, Mo10	120/1
Mo7, Mo8	320/0.5
Mo14	390/0.5
Mo18	1120/0.5

Table 2: Summary of proposed CFOA performance

Power Supply (V)	$\pm 1.5$
Bias Current ( $\mu\text{A}$ )	10
Compensation Capacitance (pF)	1
Output Voltage Swing (V)	$\pm 1.0$
Input Impedance of Inverting Input ( $\Omega$ )	68.8
Output Impedance ( $\Omega$ )	2.8
Slew Rate + (V/ $\mu\text{s}$ )	395
Slew Rate - (V/ $\mu\text{s}$ )	378
Open Loop Transimpedance Gain ( $\Omega\text{dB}$ )	85
Bandwidth (MHz) @ $R_f=2\text{K}\Omega$	125.5
DC Power Dissipation (mW)	13.6

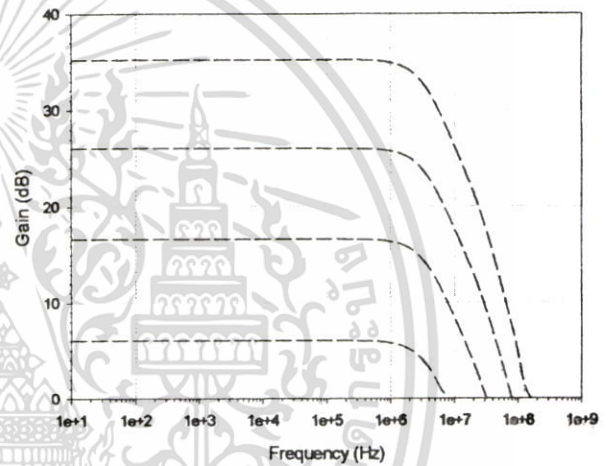


Fig.3: Frequency response of CFOA for different gains

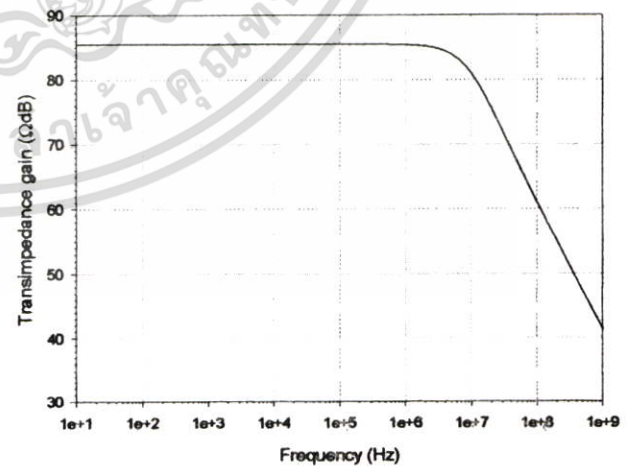


Fig.4: Open loop transimpedance gain of CFOA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

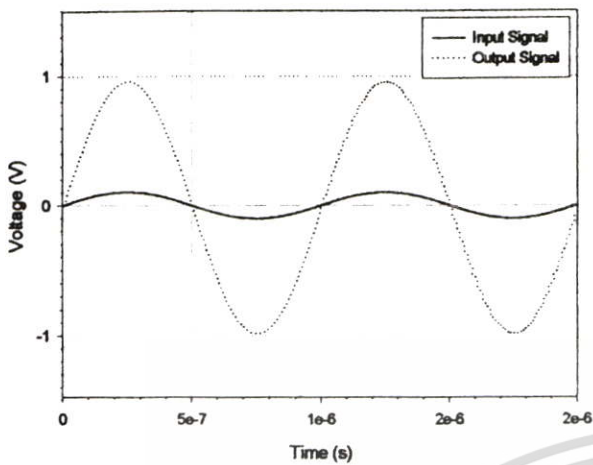


Fig.5: Transient response with a gain of 20 dB

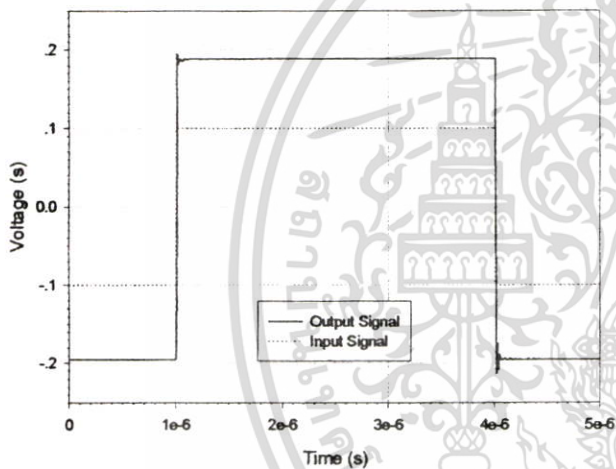


Fig.6: Step response of CFOA (250Ω/10pF load)

#### 4. CONCLUSIONS

A rail to rail CMOS current feedback operational amplifier is presented. The circuit is based on the basic CFOA topology and can operate under supply voltages of  $\pm 1.5$  V. The proposed circuit has power dissipation of 13.6 mW and can drive  $\pm 1.0$  V to 250  $\Omega$  load. The input impedance at inverting input is less than 70  $\Omega$  and output impedance of the proposed CFOA is 2.8  $\Omega$ . The slew rate (+/-) of the proposed CFOA are 395/378 V/ $\mu$ .

#### 5. REFERENCES

- [1] Manetakis, K., Toumazou, C., Papavassiliou, C., "A 120MHz, 12mW CMOS current feedback op-amp" IEEE 1998 Custom Integrated circuits conference, pp. 365-368, 1998
- [2] Manetakis, K., and Toumazou, C., "Current-feedback op-amp suitable for CMOS VLSI technology," Electronics Letters, Vol. 32, No. 12, pp. 1090-1092, Jun. 1996.

- [3] Giustolisi, G., Palmosano, G., Palumbo, G., Pennisi, S., "High-drive CMOS current-feedback op-amp," IEEE, pp.229-232, 1997.
- [4] Kim-Pui, H., Cheong-Fat, C., Chiu-Sing, C., Kong-Pang, P., "A CMOS current feedback operational amplifier with active current mode compensation," IEEE, pp. I-709-712, 2002.
- [5] Likittanapong, P., Worapishet, A., Toumazou, C., "Linear CMOS triode transconductor for low-voltage applications" Electronics Letters, Vol. 34, No.12, pp.1224-1225, Jun. 1998.
- [6] Manetakis, K., and Toumazou, C., "A new high-frequency very low output-impedance CMOS buffer," IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Vol. 1, pp. 485-488, 1996.
- [7] Mahattanakul J., and Toumazou, C., "A theoretical study of the stability of high frequency current feedback op-amp integrators" IEEE Transactions on Circuit and Systems, Vol. 43, No.1, pp. 2-12, Jan. 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายพัฒน์ บุญชากรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 ธันวาคม 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2543

หลังจากจบการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรการผลิต บริษัท โอกิ คาต้า เมนู เฟคเจอร์รี่ (ประเทศไทย) จำกัด และปีพ.ศ. 2547 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรออกแบบ กระบวนการผลิต บริษัท เคซีอี เทคโนโลยี จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้