สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบวงจรออปแอมป์ซีมอส

CMOS OP-AMP DESIGN

โดย

นาย ณัฏฐวุฒิ วังกานนท์

ปริญญานิพนธ์สำหรับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 36889
วัน, เดือน, ปี 29 ส.ค. 2543

ภาควิชาฯ สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรออปแอมป์ซีมอส

CMOS OP-AMP DESIGN

โดย

นาย ณัฏฐวุฒิ วังกานนท์ รหัส 40013168

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.วรากร เกษมสุวรรณ์

ปริญญานิพนธ์สำหรับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2542

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบวงจรออปแอมป์ซีมอส

ผู้จัดทำ นาย ณัฏฐวุฒิ วังกานนท์

วราก เกษมสุวรรณ์ ..... **อาจารย์ที่ปรึกษา**

(ดร.วรากร เกษมสุวรรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรออปแอมป์ซีมอส

นาย ณัฏฐวุฒิ วังกานนท์
อ.วรากร เกษมสุวรรณ์
ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการออกแบบวงจรออปแอมป์ให้มีประสิทธิภาพสูง มีเสถียรภาพและสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า โดยวงจรดังกล่าวจะมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของวงจรที่ถูกออกแบบขึ้นโดยโครงงานการประกวดการออกแบบวงจรรวมแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1 ซึ่งทางศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ(NECTEC) เป็นผู้ริเริ่ม เพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรออปแอมป์ที่ถูกออกแบบนั้นทำงานได้อย่างถูกต้อง และมีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ผู้เสนอโครงงานจะใช้โปรแกรม Pspice ตรวจสอบโดยอาศัยขั้นตอนมาตรฐานในการหาคุณสมบัติทุกตัวของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CMOS OP-AMP DESIGN

Mr. Natthawut Wangkanondh

Adviser. Varakorn Kasemsuwan

1999

Abstract

In this project, the high performance OP-AMP is designed.The CMOS OP-AMP meets the specification requiremen set by the 1st national IC design contest 2000 held by NECTEC.To ensure the overall performance of the OP-AMP if it works according to the specification, the circuit simulator Pspice has been used to simulate the circuit under various types of analysis and the circuit is proven to agree with the specification.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 มอสเฟ็ท	2
2.1 มอสเฟ็ท	2
2.2 รูปแบบจำลองของมอสเฟ็ท	10
บทที่ 3 วงจรขยายทรานซิสเตอร์	15
3.1 การไบอัสเฟ็ท	15
3.2 วงจรขยายคอมมอนซอส	16
3.3 วงจรขยายคอมมอนเกท	18
3.4 วงจรขยายคอมมอนเดรน	20
บทที่ 4 แหล่งจ่ายกระแสแบบมอสเฟ็ท	24
4.1 แหล่งจ่ายกระแสแบบมอสเฟ็ทพื้นฐาน	24
4.2 วงจรสะท้อนกระแส แบบวิลสัน	28
บทที่ 5 วงจรขยายความแตกต่าง	30
5.1 วงจรขยายความแตกต่างพื้นฐาน	30
5.2 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชี่ยลและสัญญาณคอมมอนโหมด	32
5.3 ดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมปลิไฟเออร์	33
5.3.1 ดีซีทรานส์เฟอร์คาแรคเตอริสติค	33
5.3.2 การวิเคราะห์สมอลซิกแนล	37
5.4 วงจรดิฟเฟอเรนเชี่ยลแบบใช้แอคทีฟโหลด	37
บทที่ 6 การออกแบบวงจรออปแอมป์แรงดันต่ำ	39
6.1 บทนำ	39
6.2 สัญญาณแบบเรลทูเรล	39
6.3 วงจรแบบเรลทูเรล	40
6.3.1วงจรภาคอินพุท	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2วงจรภาคเอาท์พุท 44
บทที่ 7 การออกแบบวงจรและการทดลอง 45
7.1 ขั้นตอนการออกแบบ 45
7.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์วงจรโฟลด์คาสโคด 47
7.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์วงจรแรงดันต่ำแบบเรลทูเรล 54
บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 69
ภาคผนวก
กิตติกรรมประกาศ
บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ เอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนท์มอสเฟ็ท	2
รูปที่ 2.2 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ พี-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนท์ มอสเฟ็ท	3
รูปที่ 2.3 การไบอัส เอ็นมอส และ พีมอส a).เอ็นมอส b) พีมอส	4
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของค่า V_{GS} และ V_{DS}	5
รูปที่ 2.5 กราฟ I_D-V_{DS} ที่ค่า V_{GS}คงที่ ($V_{GS} > V_T$)	5
รูปที่ 2.6 กราฟทรานส์เฟอร์ของ มอสเฟ็ท	6
รูปที่ 2.7 รูปและสัญลักษณ์ ของ เอ็น-แชนแนล ดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท	8
รูปที่ 2.8 กราฟ I_D-V_{DS}ที่ค่า V_{GS} คงที่ (V_{GS}-V_P)	8
รูปที่ 2.9 การลดและเพิ่มของแชนแนล	9
รูปที่ 2.10 กราฟทรานส์เฟอร์ของ ดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท	10
รูปที่ 2.11 เอ็นมอสที่มีอินพุทเป็นสัญญาณขนาดเล็ก(Small signal) ;v_{GS} a). สัญญาณ ไฟตรง b). สัญญาณขนาดเล็ก และ ไฟตรง c). สัญญาณขนาดเล็กอย่างเดียว	11
รูปที่ 2.12 รูปแบบจำลองของเอ็น-แชนแนลมอสเฟ็ท	12
รูปที่ 2.13 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก a).สมมูลย์นอร์ตัน b). สมมูลย์เทวินิน	12
รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ และแรงดันเกท-ซอสของเอ็นฮานซ์เมนท์ และดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท	14
รูปที่ 3.1 วงจรไบอัสของมอสเฟ็ท	17
รูปที่ 3.2 คอมมอนซอสแอมปลิไฟเออร์ a). รูปวงจร b).รูปวงจร สมอลซิกแนล c).สมมูลย์ สมอลซิกแนล	18
รูปที่ 3.3 คอมมอนเกทแอมปลิไฟเออร์ a). รูปวงจร b).รูปวงจร สมอลซิกแนล c).สมมูลย์ สมอลซิกแนล	19
รูปที่ 3. 4 คอมมอนเกทพื้นฐานa)วงจรสมอลซิกแนล b)สมมูลย์สมอลซิกแนล c) ผลของการเพิ่มแหล่งจ่ายกระแสอนุกรมที่เหมือนกัน d)ต่อโหนดใหม่ลงกราวน์ e). วงจรสมมูลย์อีกรูปแบบหนึ่ง	21
รูปที่ 3.5วงจรที่ใช้ค่าความต้านทานเอาท์พุท	22
รูปที่ 3.6 คอมมอนเดรนแอมปลิไฟเออร์ a). รูปวงจร b).รูปวงจร สมอลซิกแนล	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c). สมอลซิกแนล แบบ ไอซี d).สมมูลย์ สมอลซิกแนล
e) วงจรใช้หาค่าความต้านทานเอาท์พุท
รูปที่ 4.1 a).วงจรสะท้อนกระแสแบบมอส b).การทำงานของวงจรรูป a) 24
รูปที่ 4.2 a).วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด b).การทำงานของวงจรรูป a) 27
รูปที่ 4.3 โมเดล สมอลซิกแนล รูป 4.2 a) 28
รูปที่ 4.4 a).วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน b).การทำงานของวงจรรูป a) 29
รูปที่ 5.1 วงจร มอสเฟทอินเวอร์เตอร์ แบบมีฟีดแบค 30
รูปที่ 5.2 แนวคิดเบื้องต้นของดิฟเฟอร์เรนเชียลแอมปลิไฟเออร์ 31
รูปที่ 5.3 วงจรถูกขับด้วยอินพุท 2 ข้าง พร้อมๆกัน 32
รูปที่ 5.4 วงจรมอสเฟ็ทดิฟเฟอเรนเชี่ยล 33
รูปที่ 5.5 กราฟทรานส์เฟอร์ไฟตรงของ มอสเฟ็ทแบบนอร์มอลไลซ์ 36
รูปที่ 5.6 วงจรดิฟเฟอร์เรนเชี่ยลแอมปลิไฟเออร์ 38
รูปที่ 5.7 สมมูลย์ สมอลซิกแนล ของ ซีมอส แอมปลิไฟเออร์ 38
รูปที่ 6.1 a).ลักษณะวงจรภาคเอาท์พุทแบบธรรมดา
b). ลักษณะวงจรภาคเอาท์พุทแบบเรลทูเรล 40
รูปที่ 6.2 ลักษณะวงจรภาคอินพุทแบบเรลทูเรล 41
รูปที่ 6.3 วงจรโฟลด์แคสโคดแบบเรลทูเรล 42
รูปที่ 6.4 ออปแอมป์แบบ 2 ภาค(เอาท์พุทแบบคลาสเอ) 42
รูปที่ 6.5 วงจรควบคุมทรานส์คอนดัคแตนซ์แบบมัลติเพิ้ลอินพุท 43
รูปที่ 6.6 วงจรภาคเอาท์พุทแบบเรลทูเรลคลาสเอบี 44
รูปที่ 7.1 กราฟตอบสนองความถี่ 46
รูปที่ 7.2 วงจรโฟลด์คาสโคดที่ใช้ในการออกแบบ 48
รูปที่ 7.3 วงจรแรงดันต่ำแบบเรลทูเรลที่ใช้ในการออกแบบ 55
รูปที่ 7.4 วงจรจ่ายกระแส 56
รูปที่ 7.5 วงจรเอาท์พุท 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 3.1	15
ตารางที่ 7.1 ผลการทดลองวงจรโฟลด์คาสโคด	54
ตารางที่ 7.2 ผลการทดลองวงจรแรงดันต่ำ	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ออปแอมป์เป็นวงจรที่มีประโยชน์และใช้กันอย่างแพร่หลายมากวงจรหนึ่ง ประเทศไทยยังขาดผู้มีความชำนาญในการออกแบบวงจรออปแอมป์ทั้งออปแอมป์ที่ใช้งานเฉพาะทางและออปแอมป์สำหรับใช้งานทั่วไปเหล่านี้ การศึกษาถึงการออกแบบวงจรจึงเป็นประโยชน์อย่างมากเพื่อที่เราจะสามารถผลิตออปแอมป์มาใช้งานเองได้

รายงานนี้จึงเป็นการนำเสนอการศึกษาและแนวทางการออกแบบวงจรออปแอมป์ ซึ่งเนื้อหาจะกล่าวถึง รายละเอียดของวงจรต่างๆที่นำมาประกอบกันเป็นออปแอมป์ คือ วงจรขยายพื้นฐาน วงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่และวงจรขยายแบบดิฟเฟอเรนเชี่ยล การศึกษาจะมุ่งเน้นไปทางมอสเฟต เนื่องจากข้อดีที่มีมากกว่าไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นจึงได้มีการกล่าวถึงโครงสร้างของมอสเฟตเอาไว้ด้วยในบทแรก และในส่วนของการทดลองจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นตัวจำลองวงจรที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้วสามารถทราบผลการทำงานของวงจร และสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เป็นไปตามที่ต้องการได้

<u>วัตถุประสงค์</u>

1.ศึกษาหน้าที่และทำความเข้าใจการทำงานของวงจรภาคต่างๆในออปแอมป์

2.ศึกษาความแตกต่าง, ข้อดี, ข้อเสีย ของวงจรลักษณะต่างๆ

3.เข้าใจความคิดแนวทางในการพัฒนาวงจร

4.สามารถออกแบบออปแอมป์ให้มีค่าการทำงานที่ต้องการได้

<u>หัวข้อในการออกแบบ</u>

1.การออกแบบวงจรประเภทซีมอส

2.การออกแบบออปแอมป์แบบทั่วไป

3.การออกแบบออปแอมป์แรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
มอสเฟ็ท (MOSFET)

2.1 มอสเฟ็ท (MOSFET)

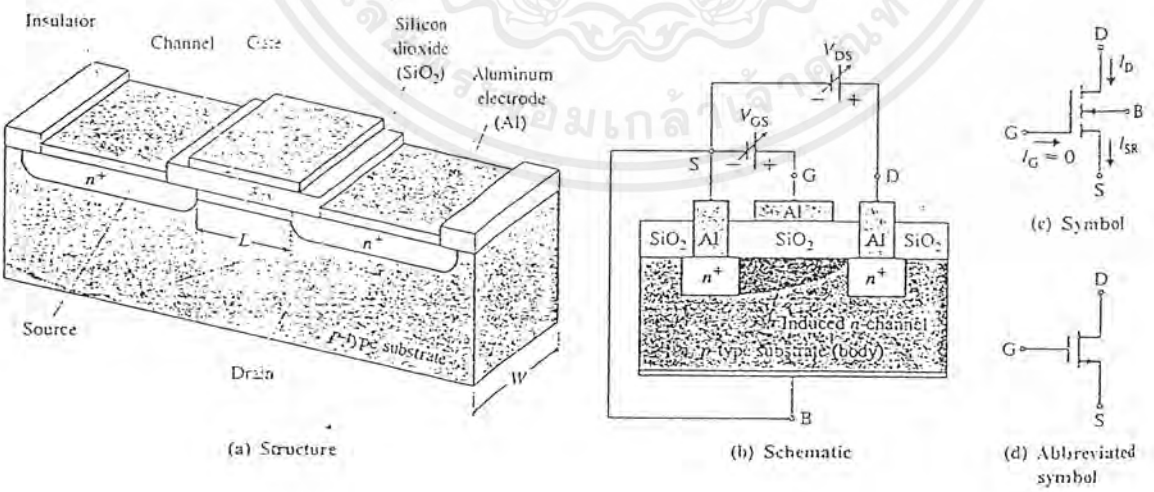
ไบโพลาร์ทรานส์ซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยกระแส ค่ากระแสเอาท์พุทขึ้นอยู่กับกระแสเบส ค่า ค.ต.ท อินพุทเป็นค่าผกผันกับกระแส I_C (25.8 mv / I_C) ซึ่งมีค่าต่ำ กระแสที่ไหลในไบโพลาร์ทรานส์ซิสเตอร์ เกิดขึ้นจากทั้งพาหะส่วนมากและส่วนน้อย

ในทางตรงข้าม กระแสที่ไหลใน มอสเฟ็ท จะเกิดจากพาหะชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น กระแสเอาท์พุทของมอสเฟ็ทจะควบคุมได้โดยสนามไฟฟ้าที่ขึ้นกับแรงดันที่ควบคุมไว้ มอสเฟ็ทเป็นอุปกรณ์ยูนิโพลาร์และควบคุมด้วยแรงดัน การเปิด/ปิดแรงดันนั้นง่ายกว่าการเปิด/ปิดกระแส โดยเฉพาะถ้ามีอุปกรณ์สะสมพลังงาน เช่น คาปาซิเตอร์

มอสเฟ็ท แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

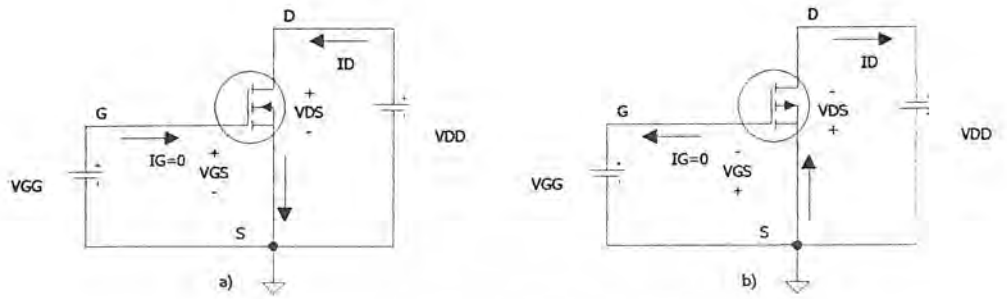
1. เอ็นฮานซ์เมนท์ เฟ็ท(Enhancement MOSFET)
2. ดีพลีทชั่น เฟ็ท(Depletion MOSFET)

มอสเฟ็ท เริ่มเป็นที่นิยมมากช่วงปลายปี 1970s ในการทำเป็นวงจรรวม เพราะการผลิตมอสเฟ็ท มีความง่ายกว่าการผลิต ไบโพลาร์ทรานส์ซิสเตอร์ เพราะสามารถสร้างได้เล็กและใช้เนื้อที่น้อยในชิพวงจรรวม



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ เอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนท์มอสเฟ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.3 การไบอัส เอ็นมอส และ พีมอส a).เอ็นมอส b) พีมอส

เอ็นมอส อาจมองได้ว่าเป็นไดโอด 2 ตัวต่อกัน คือ ส่วนของซอสกับซับสเตรท และเดรนกับ ซับสเตรท ดังรูป 2.4 (a) ไดโอดต่ออนุกรมกันแบบท้ายต่อท้าย ค่า V_{DS} ที่เป็นบวก จะทำให้ไดโอดตัวขวามือ เป็นไบอัสกลับ, ค่ากระแส I_Dจะมีค่าประมาณศูนย์ ถ้าแรงดัน V_{DS} เป็นศูนย์

ถ้า V_{GS} เป็นบวกจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ซึ่งจะดึงดูดประจุลบจาก พีซับสเตรท และผลักประจุบวกออก ผลก็คือ ส่วนของซับสเตรทที่อยู่ใกล้ๆ กับฉนวนออกไซด์จะเป็น พี น้อยลง เมื่อ V_{GS} เพิ่มมากขึ้น บริเวณฉนวนด้านซับสเตรทก็จะดึงดูดอิเล็กตรอนเข้ามามากขึ้น จนในที่สุดบริเวณนั้นจะเปลี่ยนเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ค่า V_{GS} ที่น้อยที่สุดที่จะทำให้เกิด แชนแนล ได้เรียกว่า แรงดันเทรสโชลด์ : V_t กระแส I_D ที่ V_{GS} มีค่าน้อยๆ จะมีค่าน้อยมาก และจะเพิ่มมากขึ้นได้ เมื่อ $V_{GS} > V_t$ และเพิ่มขึ้นค่าค่อนข้างลิเนียร์กับ V_{DS} ที่ V_{DS} ค่าน้อย ๆ ดังรูป 2.4 (c) ถ้า V_{DS} มีค่าต่ำ (ประมาณ 1 V.) ค่า I_D สามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม ($I_D = v_{DS} / r_{DS}$) ความต้านทานระหว่าง ซอส กับ เดรน หาได้โดย

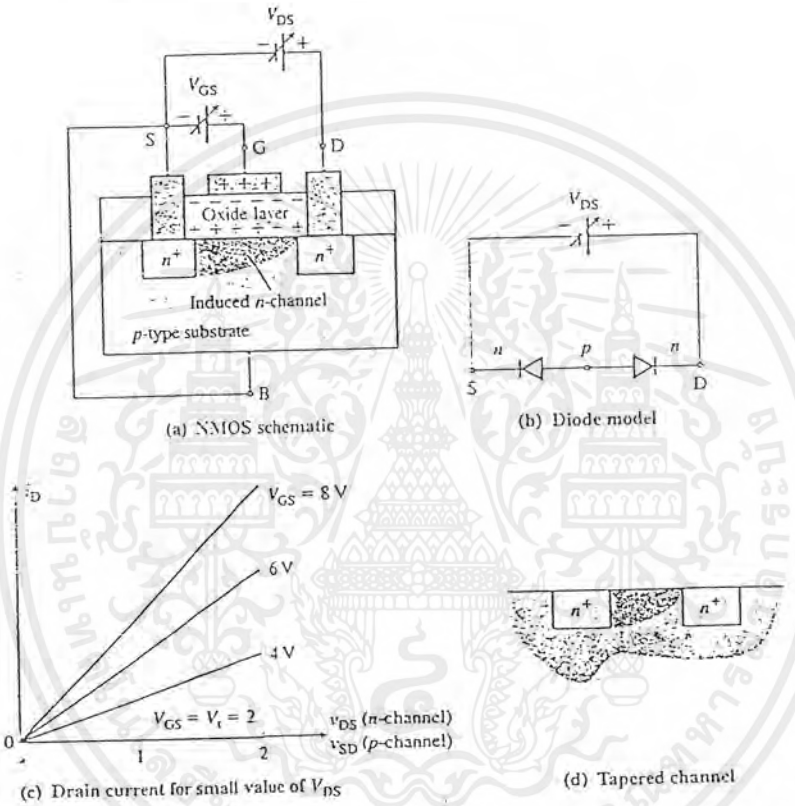
$$R_{DS} = \frac{\ell}{\sigma A}$$; ℓ คือความยาวของ แชนแนล จะ เดรน ถึง ซอส มีหน่วยเป็นเมตร (m)

σ คือ ความนำไฟฟ้า(conductivity) ของ สารเจือเอ็น มีหน่วยเป็น $\Omega^{-1}m^{-1}$

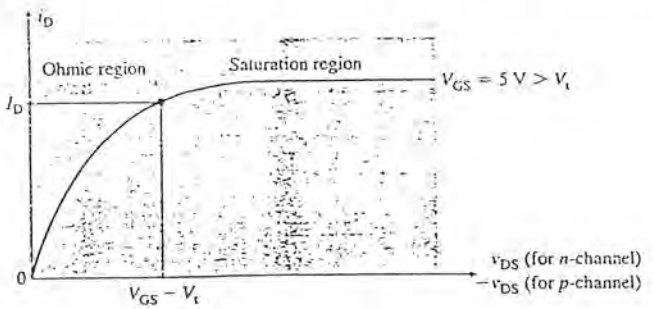
A คือ พื้นที่ตัดขวางเฉลี่ยของ แชนแนล มีหน่วยเป็น m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่ม V_{DS} ไม่ได้ทำให้แชนแนลทางด้านซอสเปลี่ยนไป แต่ความกว้างของแชนแนล ทางด้านเดรนจะลดลง ทำให้แชนแนลแคบขึ้น ดังรูป 2.4 (d) เมื่อ V_{DS} มีค่ามากเพียงพอและ $V_{GD} < V_t$ ($V_{DS} > V_{GS} - V_t$) จะเกิด พิ้นช์ออฟขึ้นที่ด้าน เดรน การเพิ่ม V_{DS} ก็ไม่ให้ I_D เพิ่มขึ้นอีกต่อไป เฟ็ท จะทำงานในย่านอิ่มตัว กราฟคุณสมบัติ $I_D - V_{DS}$ เมื่อค่า V_{GS} คงที่แสดงได้ดังรูป 2.5 ในทางปฏิบัติ I_D จะเพิ่มขึ้นได้ เมื่อ V_{DS} เพิ่มแต่มีค่าน้อยมาก ๆ



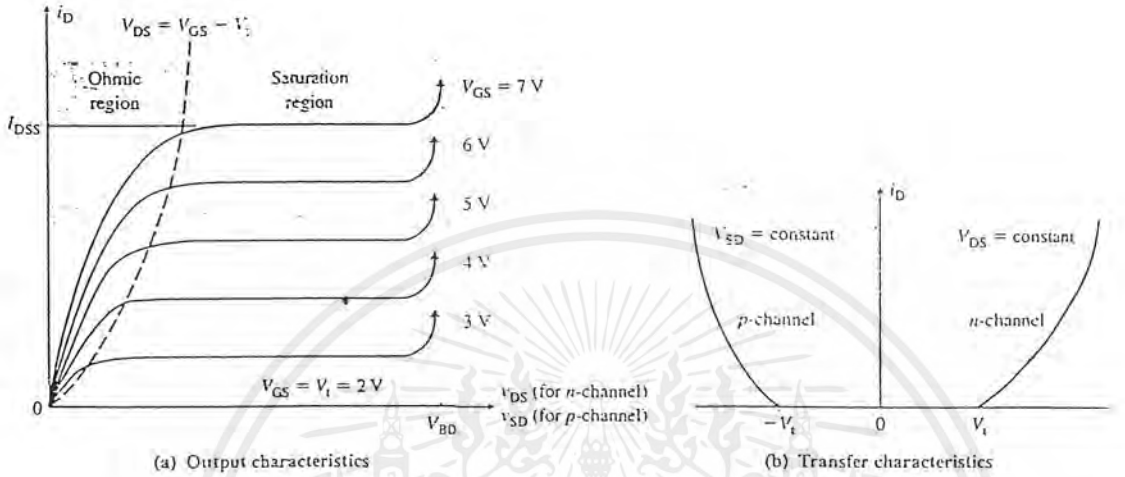
รูป 2.4 ความสัมพันธ์ของค่า V_{GS} และ V_{DS}



รูป 2.5 กราฟ I_D-V_{DS} ที่ค่า V_{GS}คงที่ ($V_{GS} > V_T$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชันของกราฟ I_D - V_{DS} สามารถหาค่าได้ คุณลักษณะ ของ เอ็นมอส แสดงในรูป 2.6 (a) และ ลักษณะสมบัติการถ่ายโอนแสดงในรูป 2.6 (b) เป็นของ เอ็นมอส และ พีมอส



รูป 2.6 กราฟการถ่ายโอนของ มอสเฟ็ท

V_{BD} คือค่าของ V_{DS} ที่เพิ่มมากขึ้นจนเกิดการพังทลาย ทำให้เกิดอวาลานช์ เบรคดาวน์ ขึ้นในแชนแนล กระแส เดรน จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การทำงานในโหมดนี้จะไม่ใช้กันเนื่องจาก เฟ็ท จะเสียหายจากการมีพาวเวอร์ ดิสสิเพชั่น ที่มากเกินไป เนื่องจากแรงดันย้อนกลับมีค่าสูงสุดที่ด้านเดรน ดังนั้นการพังทลายจะเกิดขึ้นที่จุดนี้ก่อน แรงดันพังทลายจะกำหนดมาจากผู้ผลิตมีค่าในช่วง 20-100 V. ค่า V_{GS} ที่มาก ๆ ยังเป็นเหตุให้เกิด ไดอิเล็คตริค เบรคดาวน์ ที่ชั้น ออกไซด์ ด้วย

เนื่องจากขาเกทแยกออกมาจากแชนแนลในเอ็นมอส ทำให้ไม่มี I_D ไหล ผลลัพธ์คือความต้านทาน ระหว่าง เกท กับ ซอส มีค่าสูงมาก ๆ ในทางปฏิบัติมีค่าจำกัด แต่ก็สูงมากประมาณ 10^8 M Ω.

ย่านโอมห์มิค คือช่วงที่ $V_{DS} \le (V_{GS} - V_t)$

$$I_D = \frac{K_p}{2}\left[2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2\right]$$

โดย $$K_p = \frac{\mu_n \varepsilon_o \varepsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L = ความยาว แชนแนล (ประมาณ 10 μm) มีหน่วยเป็น m

W = ความกว้าง แชนแนล (ประมาณ 10 μm) มีหน่วยเป็น m

μ_n = ความคล่องตัวที่ผิวหน้า(surface mobility) ของ $\bar{e} = 600\ cm^2/v.s$

t_{ox} = ความหนาของออกไซด์

C_{ox} = มอสเฟ็ท คาปาซิแตนซ์ ต่อหน่วยพื้นที่

ε_o = เปอร์มิตติวิตี้ ของ ฟรี สเปซ = 8.85 x 10^{-14} F/cm

ε_{ox} = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของ ซิลิกอนไดออกไซด์ = 4

ค่าของ $\mu_n Cox/2$ เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต มีค่าประมาณ 10 $\mu A/V^2$ สำหรับ เอ็นมอส มาตรฐาน ที่ออกไซด์มีความหนา 0.1 μm ค่า K_p จะประมาณ 20 $\mu A/V^2$

ย่านอิ่มตัว คือช่วงที่ $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_t)$ จากสมการตัวเดิมแทน V_{DS} ด้วย $V_{GS} - V_t$ นั่นคือ

$$I_D = \frac{K_p (V_{GS} - V_t)^2}{2}$$

ย่านคัทออฟ คือช่วงที่แรงดัน V_{GS} น้อยกว่า $V_t (V_{GS} < V_t)$ มอสเฟ็ท จะ ออฟ และ $i_D = 0$

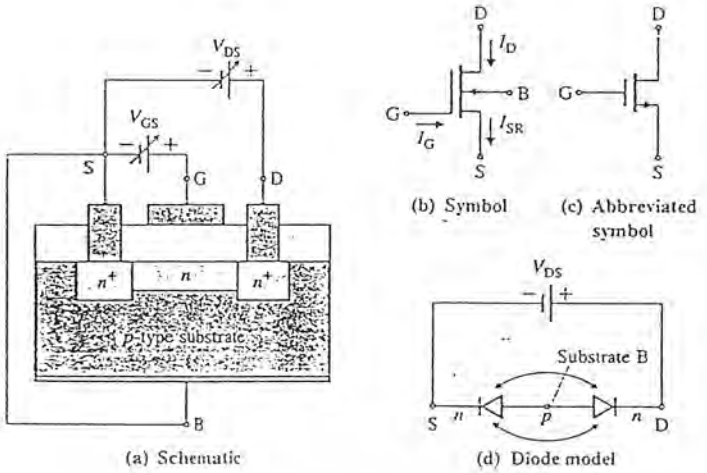
2. ดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท

โครงสร้างของ เอ็น-แชนแนล ดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท คล้ายกับของ เอ็นมอส แชนแนล จะสร้างขึ้นโดยเพิ่มสารเจือชนิด เอ็น ลงไปใน พี-ซับสเตรท ดังรูป 2.7 (a) และสัญลักษณ์แสดงดังรูป (b) ปกติ เฟ็ท จะชนิดนี้จะทำงานด้วยแรงดินแรงดันบวก ระหว่าง เดรน กับ ซอส และแรงดัน ระหว่าง เกท กับ ซอส จะเป็นบวก, ลบ หรือศูนย์ก็ได้

การถ่ายโอน และ ลักษณะสมบัติทางเอาท์พุท

ดีพลีทชัน มอสเฟ็ท สามารถมองได้เป็น ไดโอด 2 ตัวต่อกัน ระหว่าง ซอส กับ ซับสเตรท และ เดรน กับ ซับสเตรท ดังรูป 2.7 (d) เมื่อ $V_{DS} > 0$ ไดโอดตัวของจะถูกไบอัสกลับ และไม่มีกระแสไหลผ่าน ซับสเตรท ถ้าให้ $V_{GS} = 0$ ถ้า V_{DS} เพิ่มขึ้นจากศูนย์เล็กน้อย (≈ 1 V.) กระแสเดรน $I_D = V_{DS}/R_{DS}$ และผกผันตรงกับV_{DS} การเพิ่มค่า V_{DS} ให้มากกว่าค่า $|V_p|$หรือ แรงดันพินช์ออฟ I_D จะไม่เพิ่มขึ้นอีก ย่านที่สูงกว่า พินช์ออฟ เรียกว่า ย่านอิ่มตัว

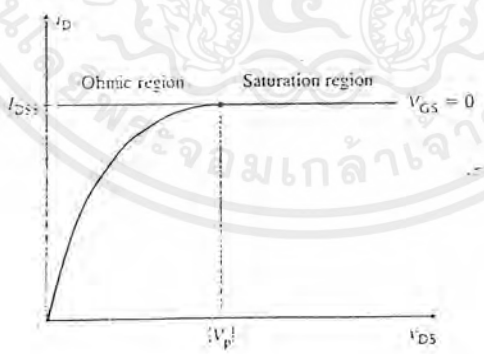
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.7 รูปและสัญลักษณ์ ของ เอ็น-แชนแนล ดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท

ค่า I_D ที่เกิดขึ้นเมื่อ $V_{DS} = |V_p|(V_{GS} = 0)$ คือ เทอมของกระแส I_{DS} อิ่มตัวเรียกว่า I_{DSS} รูปกราฟ $I_D - V_{DS}$ เมื่อ $V_{GS} = 0$ แสดงในรูป 2.8 ในทางปฏิบัติ I_D จะเพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อ V_{DS} เพิ่มขึ้นมากกว่า $|V_p|$ และความชันของกราฟ $I_D - V_{DS}$ มีค่าจำกัดการอิ่มตัวจะเกิดที่ค่าของ V_{DS} ซึ่งแรงดันเดรนกับ แชนแนล เท่ากับ V_p นั่นคือ

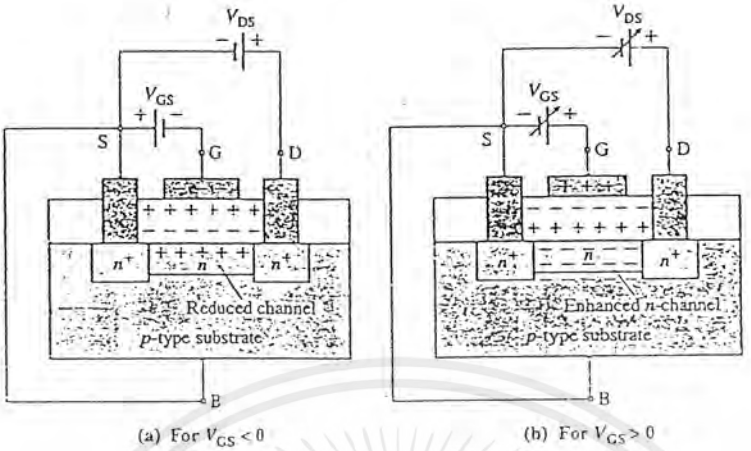
$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} = V_p \text{ หรือ } V_{DS} = V_{GS} - V_p$$



รูป 2.8 กราฟ I_D-V_{DS}ที่ค่า V_{GS} คงที่ (V_{GS}-V_P)

ถ้า V_{GS} เป็นลบ อิเล็กตรอนบางส่วนใน เอ็น-แชนแนล จะถูกผลักออกจาก แชนแนล ทำให้ดีพลีทชั่น รีเจียน แคบขึ้น เมื่อ $V_{GS} > 0$ ชัน ซับสเตรท ใกล้ เอ็น-แชนแนลจะเป็น พี น้อยลง ทำให้ความนำมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูป 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.9 การลดและเพิ่มของแชนแนล

รูปกราฟคุณลักษณะ $I_D - V_{DS}$ เมื่อ V_{GS} มีค่าต่าง ๆ แสดงดังรูป 2.10 (a) และ ลักษณะสมบัติการถ่ายโอน แสดงในรูป 2.10(b) ทั้ง เอ็น และ พี แชนแนล รูปกราฟสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนเช่นเดียวกัน คือ ย่าน โอมห์มิค, อิ่มตัว และคัทออฟ

ย่านโอมห์มิค คือ ย่านที่ V_{DS} มีค่าต่ำและ แชนแนล ไม่เกิด พินช์ออฟ

$$I_D = \frac{K_p}{2}\left[2(V_{GS} - V_p)V_{DS} - V_{DS}^2\right] \text{ เมื่อ } 0 < V_{DS} \le (V_{DS} - V_p)$$

ซึ่งค่า V_{DS} น้อยกว่า $(V_{DS} << |V_p|)$ สามารถลดรูปได้

$$I_D = \frac{K_p}{2}\left[2(V_{GS} - V_p)V_{DS}\right];\ K_p = I_{DSS}/V_p^2$$

ย่านอิ่มตัว คือ $V_{DS} \ge (V_{GS} - V_p)$ ค่า I_D จะค่อนข้างเป็นอิสระจาก V_{DS} จากสมการ I_D เดิมแทน V_{DS} ด้วย $V_{GS} - V_p$

$$I_D = \frac{K_p}{2}\left[V_{GS} - V_p\right]^2$$

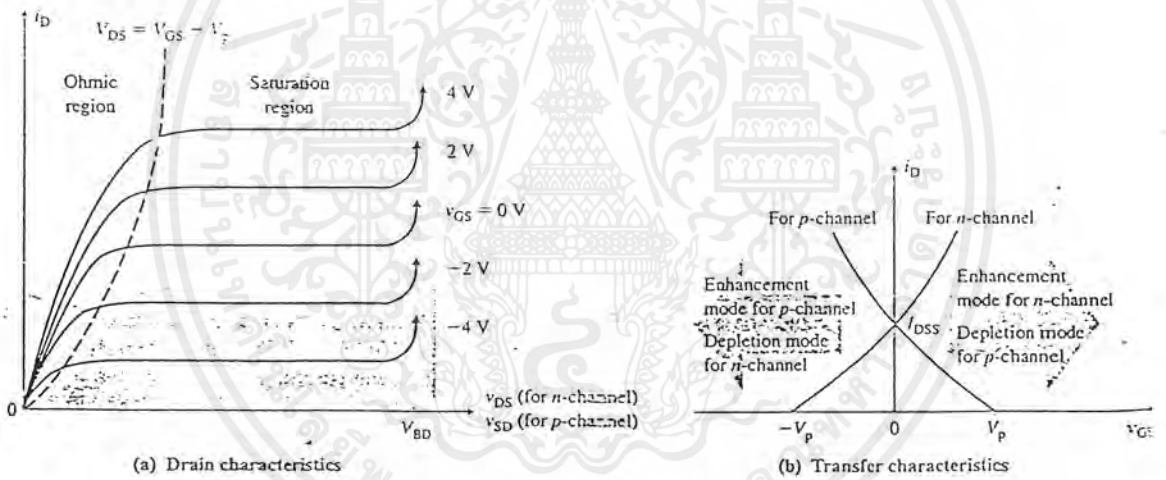
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้แสดง ลักษณะสมบัติการถ่ายโอน ดังรูป 2.10 (b) ของทั้ง เอ็น และ พี แชนแนล ถ้าแก้สมการหาค่า V_{GS} จะมีค่า 2 ค่า คือ $V_{GS} > V_p$ สำหรับ เอ็น-แชนแนล และ $V_{GS}<V_p$ สำหรับ พี-แชนแนล

และเส้น พิ้นช์ออฟโลคัส เป็นขอบเขตระหว่าง โอมห์มิค และ อิ่มตัว หาได้โดยการแทน $V_{GS} = V_{DS} + V_p$

$$I_D = K_p(V_{DS} + V_p - V_p)^2 = K_p(V_{DS})^2$$

ย่านคัทออฟ คือย่านที่ $V_{GS} < V_p$ สำหรับ เอ็น-แชนแนล และตรงข้ามสำหรับ พี-แชนแนล ซึ่ง $I_D = 0$



รูปที่2.10 กราฟการถ่ายโอนของ ดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท

2.2 รูปแบบจำลองของมอสเฟ็ท(FET Model)

เนื่องจาก มอสเฟ็ทเป็นอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน วงจร เอ็นมอส ซึ่งไบอัสใช้ทำงานในย่านอิ่มตัว แสดงดังรูป 2.11(a) เมื่อใช้ KVL รอบลูป เดรน-ซอส จะได้

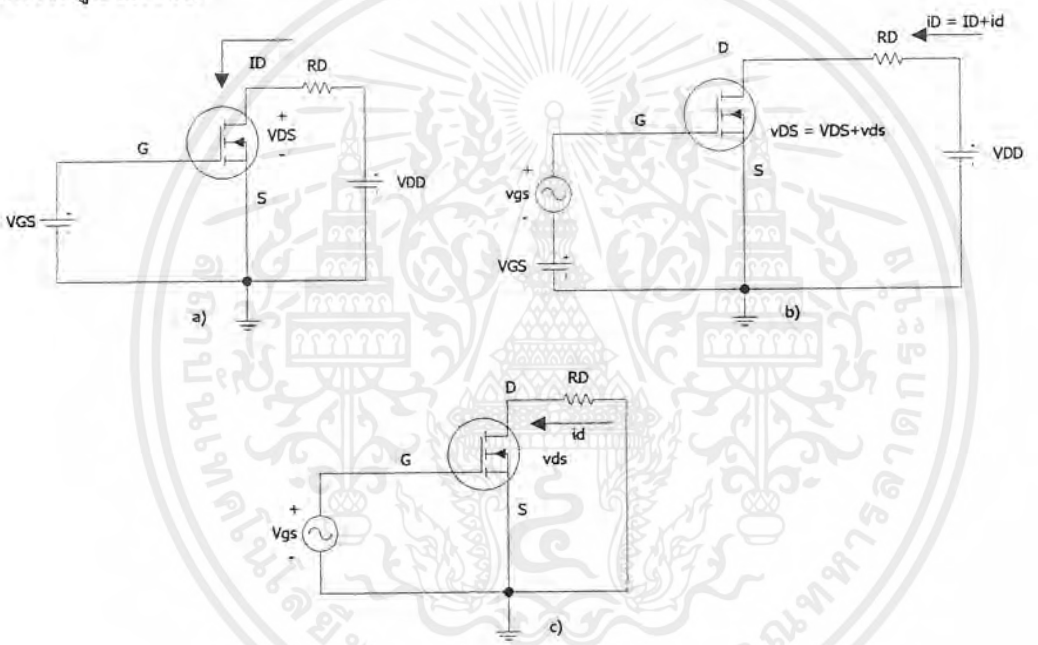
$$V_{DD} = V_{DS} + R_D I_D$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} - \frac{V_{DS}}{R_D}$$ ซึ่งเป็นตัวอธิบายโหลดลายน์

ถ้าสมมติว่ากระแสเดรน, แรงดันคร่อมเดรน-ซอสและแรงดันคร่อมเกท-ซอสมีค่าเริ่มต้นอยู่ค่าหนึ่ง คือ I_D, V_{DS} และ V_{GS} ตามลำดับในวงจร เฟ็ท แอมปลิฟายเออร์ สัญญาณอินพุทไฟสลับ จะปรากฏซ้อนอยู่ที่แรงดันเกท ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_{DS} และ I_D นั่นคือถ้าแรงดันเกท-ซอส มีการเปลี่ยนไปเล็กน้อย

$v_{GS} = V_{GS} + v_{gs}$ จะทำให้เกิด $v_{DS} = V_{DS} + v_{ds}$ และ $i_D = I_D + i_d$ สถานะดังกล่าวนี้แสดงในรูป 2.11 (b)

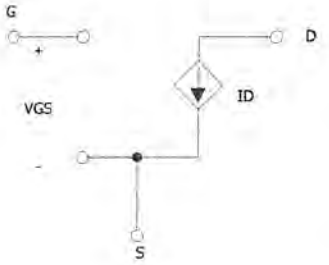


รูป 2.11 เอ็นมอสที่มีอินพุทเป็นสัญญาณขนาดเล็ก(Small signal) ;v_{GS}
a). สัญญาณไฟตรง b). สัญญาณขนาดเล็ก และ ไฟตรง c). สัญญาณขนาดเล็กอย่างเดียว

ถ้าค่าของ i_d, v_{ds} และ v_{gs} มีค่าน้อย รูป 2.10(b) สามารถแทนได้ด้วย วงจรสมอลซิกแนล ดังรูป 2.11 (c) เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมี รูปแบบจำลอง 2 แบบ คือ รูปแบบจำลองดีซี และ รูปแบบจำลองเอซี

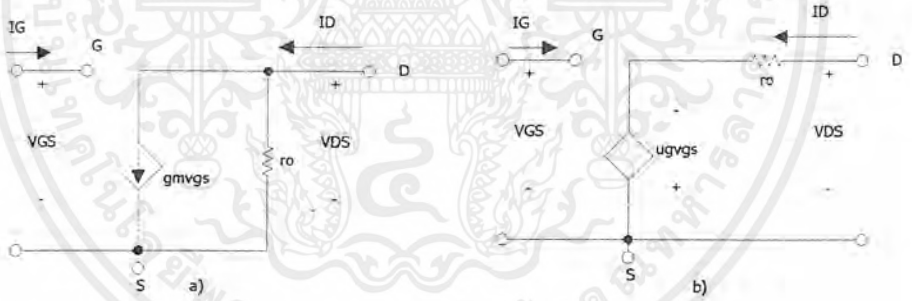
รูปแบบจำลองดีซี สัญญาณขนาดใหญ่ของเฟ็ทไม่ลิเนียร์ รูปกราฟความสัมพันธ์เป็นของ I_D, V_{DS} และ V_{GS} ที่ค่า V_{GS} ต่าง ๆ กัน ใช้อธิบาย สัญญาณขนาดใหญ่ของ เฟ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.12 รูปแบบจำลองของเอ็น-แชนแนลมอสเฟ็ท

รูปแบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก พฤติกรรมของมอสเฟ็ท ในรูป 2.12 ต่อ สมอลซิกแนล สามารถแทนได้โดย วงจรสมมูลย์สมอลซิกแนลเอซี ประกอบด้วย $V_{cc}, g_m v_{gs}$ ในลักษณะขนานกับ ความต้านทาน เอาท์พุท r_o (ความชันของกราฟ $i_D - v_{DS}$) วงจรนี้แสดงได้ดังรูป 2.13 (a) เนื่องจากกระแสเกท i_g ของ เฟ็ท มีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้นปลายเกท-ซอส จึงเหมือนเปิดวงจร



รูป 2.13 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก a).สมมูลย์นอร์ตัน b). สมมูลย์เทวินิน

ใช้ความสัมพันธ์ของเทวินินและนอร์ตัน จะสามารถเปลี่ยนแหล่งจ่ายกระแสเป็นแรงดันได้ดังรูป 2.13 (b) โดย

$$v_{ds} = i_d r_o - r_o g_m v_{gs} = i_d r_o - \mu_g v_{gs}$$

μ_g คือ เกนของแรงดันเปิดวงจรของ เฟ็ท มีค่าเท่ากับ $r_o g_m$

g_m คือ ค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์เกนของ เฟ็ท ค่าทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับ จุดทำงาน (V_D, I_D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานสมอลซิกแนลทางเอาท์พุท ; r_0 คือส่วนกลับของความชันในกราฟ $i_D - v_{DS}$ ในช่วง พิ้นช์ออฟ หรือ ย่านอิ่มตัว ค่า r_0 สามารถหาได้โดยประมาณเท่ากับ

$$r_o \approx \left|\frac{V_M}{I_D}\right| = \frac{1}{\lambda I_D}$$

V_M คือ แรงดันแชนแนลมอดูเลชั่น(channel modulation voltage) = $\frac{1}{\lambda}$

λ คือ ความยาวแชนแนลมอดูเลชั่น(channel modulation length)

ค่า V_M เป็นบวกสำหรับ พี-แชนแนลและเป็นลบสำหรับเอ็น-แชนแนล ค่าโดยทั่วไป 100 V.

ทรานส์คอนดัคแตนซ์ ; g_m คือ ความชันของลักษณะสมบัติการถ่ายโอน $(i_D - v_{GS})$

$$g_m = \frac{\delta i_D}{\delta v_{GS}}\Big|_{v_{DS}=const\tan t}$$

สมมติว่า $i_d = I_D, v_{GS} = V_{GS}, v_{DS} = V_{DS}$

$$g_m = K_p(V_{GS} - V_t) = g_{mo}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_t}\right)$$; สำหรับ เอ็นฮานซ์เมนท์ มอสเฟ็ท

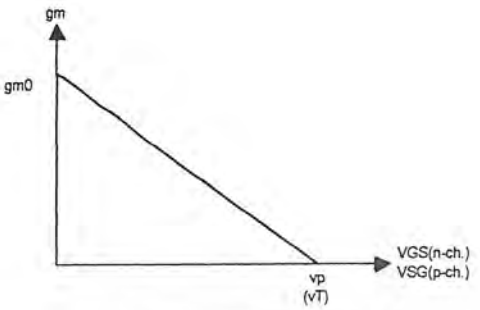
ส่วนดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท

$$g_m = 2K_p(V_{GS} - V_p) = g_{mo}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)$$

; $$g_{mo} = -2K_pV_p = -\frac{2I_{DSS}}{V_p}$$

ค่า g_{mo} คือค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ เมื่อ $v_{GS} = 0$ และเปลี่ยนแปลงอย่างคงที่กับ v_{GS} ดัง รูป 2.14 โดยค่า $V_p = V_t$ สำหรับ เอ็นฮานซ์เมนท์ มอสเฟ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์และแรงดันเกท-ซอสของเอ็นฮานซ์เมนท์และดีพลีทชั่น มอสเฟ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3

วงจรขยายทรานส์ซิสเตอร์(TRANSISTOR AMPLIFIER)

ทรานซิสเตอร์สามารถนำมาต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เป็นวงจรขยายให้มีเกนแรงดันหรือค่าความต้านทานเอาท์พุท/อินพุทที่สูงหรือต่ำได้ ตามรูปแบบการต่อวงจร วงจรขยายพื้นฐานมีอยู่ 3 แบบด้วยกันคือ 1.คอมมอนซอส 3.คอมมอนเดรน 3.คอมมอนเกท ซึ่งชื่อก็เป็นไปตามความสัมพันธ์ของพอร์ตอินพุท/เอาท์พุท สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา คือ เกนการขยาย, ความต้านทานอินพุท และความต้านทานเอาท์พุท

3.1 การไบอัสเฟ็ท

ความจำเป็นในการไบอัส เฟ็ท ให้มีจุดทำงานที่คงที่เพื่อจุดไบอัสจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อพารามิเตอร์ของ เฟ็ท เปลี่ยนไป เมื่อกำหนดให้ v_{GS} คงที่ ๆ ค่าหนึ่ง จะทำให้ i_D คงที่ด้วย ค่า v_{DS} นั้นขึ้นอยู่กับค่า i_D ตาราง 3.1 แสดงพารามิเตอร์และทรานส์เฟอร์คาแรคเตอริสติคของเฟ็ท ต่าง ๆ

	n-channel			*p*-channel		
	Enhancement MOSFET	Depletion MOSFET	JFET	Enhancement MOSFET	Depletion MOSFET	JFET
K_p	$\frac{\mu_n C_{ox} W}{L}$	$\frac{\mu_n C_{ox} W}{L}$	$\frac{I_{DSS}}{V_p^2}$	$\frac{\mu_n C_{ox} W}{L}$	$\frac{\mu_n C_{ox} W}{L}$	$\frac{I_{DSS}}{V_p^2}$
V_t	+	−	−	−	+	+
v_{GS}	$>V_t$	$>V_p$	$>V_p$	$<V_t$	$<V_p$	$<V_p$
v_{DS}	+	÷	+	−	−	−
i_D	+	÷	÷	−	+	÷
V_{DD}	+	÷	÷	−	−	−
$\lambda = 1/V_M$	+	−	÷	−	−	−

In the ohmic (or triode) region, $i_D = K_p[2(v_{GS} - V_t)v_{DS} - v_{DS}^2]$, where $v_{DS} < (v_{GS} - V_t)$ for *n* channel and $v_{DS} > (v_{GS} - V_t)$ for *p* channel.
In the saturation region, $i_D = K_p(v_{GS} - V_t)^2$, where $v_{DS} \geq (v_{GS} - V_t)$ for *n* channel and $v_{DS} \leq (v_{GS} - V_t)$ for *p* channel. Note: $V_p = V_t$.

ตาราง 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรที่แสดงในรูป 3.1 (a) ความต่างศักย์ที่ซอสเปลี่ยนเป็นสัดส่วนกับ i_D และศักย์ที่ v_G ถูกกำหนดที่ค่า ๆ หนึ่ง โดย R_1 และ R_2 เนื่องจาก i_G มีค่าน้อยมาก $(i_G \approx 0)$ ดังนั้น

$$v_{GS} = v_G - R_G i_G - R_{sr} i_D = v_G - R_{sr} i_D$$

; R_{sr} คือ ความต้านทาน ด้านซอสของ เฟ็ท

จุดตัดของโหลดลายน์กับกราฟทรานส์เฟอร์ คือจุดทำงาน ดังรูป 3.1(b) การออกแบบบางประเภทเส้นโหลดลายน์ สามารถถูกทำให้เกือบจะเป็นแนวนอน และการเปลี่ยนแปลงของ i_D เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง ลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ก็จะถูกทำให้ต่ำลง

จากรูป 3.1 (c)

$$v_G = \left(\frac{V_{DD} R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$R_G = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

สำหรับ เอ็นมอส ทั้ง i_D และ v_{GS} เป็นบวก ซึ่ง v_{GS} จะเป็นบวกถ้า

$$v_{GS} < i_D R_{sr} \qquad \text{ทำให้}$$

$$\frac{V_{DD}}{1 + R_1 / R_2} < i_D R_{sr}$$

ถ้า R_2 มีค่ามากและ $R_2 \to \infty$ ก็สามารถละ R_2 ออกได้ และรูปวงจรจะถูกแปลงเป็นรูป 3.1 (d)

3.2 วงจรขยายคอมมอนซอส(Common Source Amplifier)

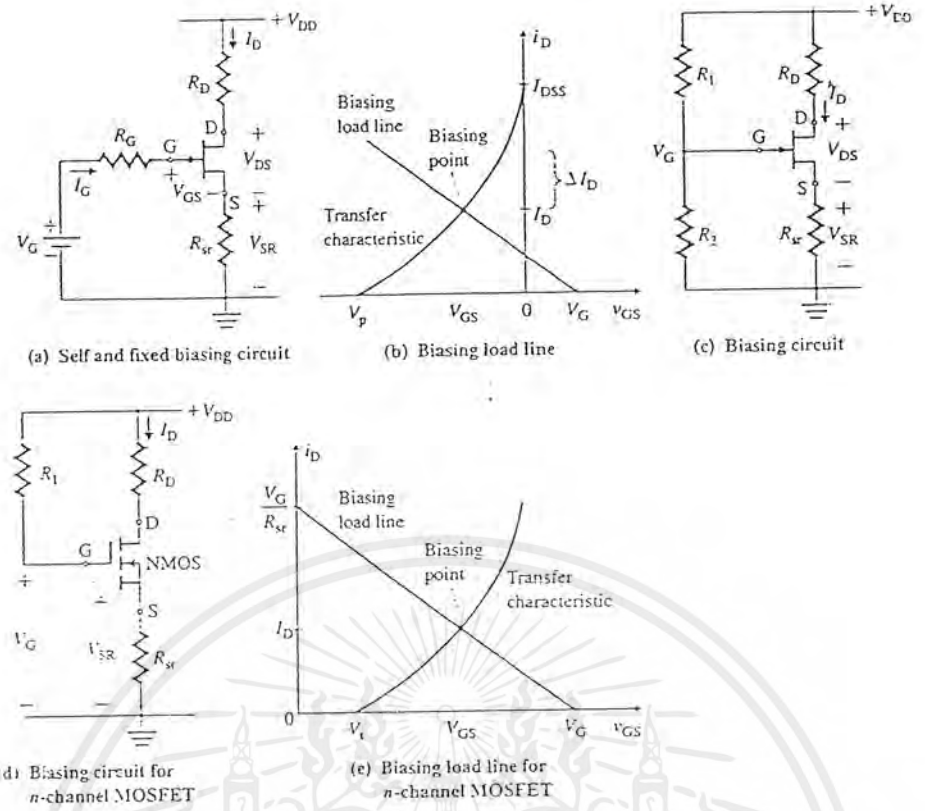
วงจรคอมมอนซอสให้ค่าเกนของแรงดันและกระแสสูง มีการกลับเฟสและค่าค.ต.ท.อินพุต, เอาท์พุทมีค่าปานกลาง ดังรูป 3.2(a) เป็นตัวอย่างที่มีค่า k = 0.5×10^{-3} A/V3 และ V_t = 3 V

รูป 3.2(b) และ (c) เป็นวงจรสำหรับสมอลซิกแนลและวงจรเสมือน ซึ่งแสดงไว้ว่า ซอสถูกทำเป็นคอมมอนต่ออินพุทและเอาท์พุทโดยบายพาสคาปาซิเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับ คอมมอนอิมิตเตอร์ วงจรเสมือนจะมีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งเป็นผลต่อสมการของเกน, ค่า ค.ต.ท. อินพุท/เอาท์พุทด้วย

โดย $\qquad A_v = (-gmR_L)\frac{R_D}{R_D + R_L}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูป 3.1 วงจรไบอัสของมอสเฟ็ท

และ $A_i = (-gmR_\rho)\dfrac{R_D}{R_D + R_L}$ ค่า gmR_ρ คือเกนกระแส

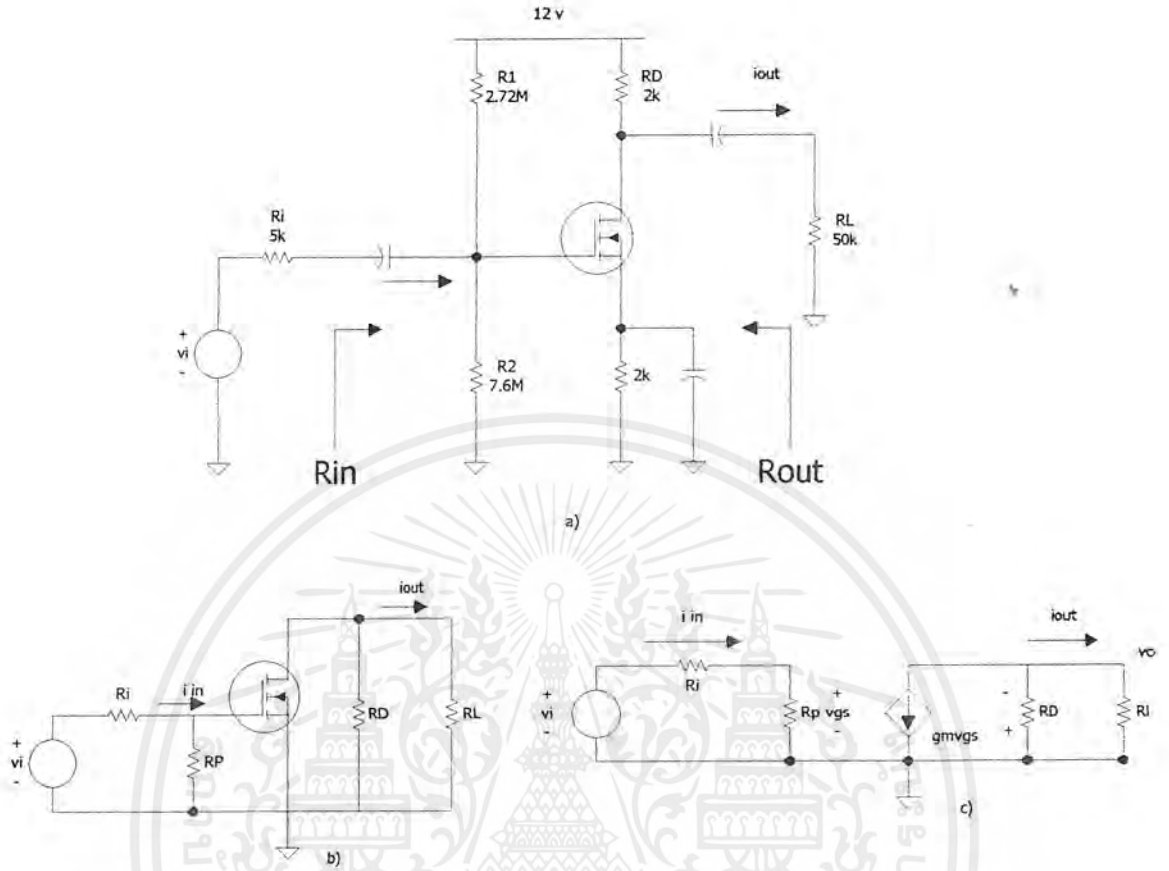
เนื่องจาก ค.ต.ท. อินพุทของมอสเฟ็ทเป็นอนันต์ ดังนั้นเกนกระแสของวงจรจึงเป็นอนันต์ด้วย จากสมการเกนกระแสพบว่าจะถูกจำกัดด้วยค่า R_ρ เนื่องจากการจัดไบอัส ทำให้ $R_{in} = R_\rho$ ส่วน ค.ต.ท. เอาท์พุท $R_{out} = r_o \,||\, R_D$; $R_{out} \approx R_D$ ถ้าให้ $r_o \to \infty$

รูป 3.2(b) และ (c) เป็นวงจรสำหรับ สมอลซิกแนล และวงจรเสมือน ซึ่งแสดงไว้ว่า ซอสถูกทำเป็นคอมมอนต่ออินพุทและเอาท์พุท โดยบายพาสคาปาซิเตอร์ ซึ่งเป็นผลต่อสมการของเกน,ค่าค.ต.ท. อินพุท/เอาท์พุท ด้วย

โดย $A_v = (-gmR_L)\dfrac{R_D}{R_D + R_L}$

เนื่องจาก มอสเฟ็ท มีค่า ค.ต.ท. อินพุทสูงทำให้เป็นผลดีจากการเกิด อินพุทโหลดดิ้ง

36889
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



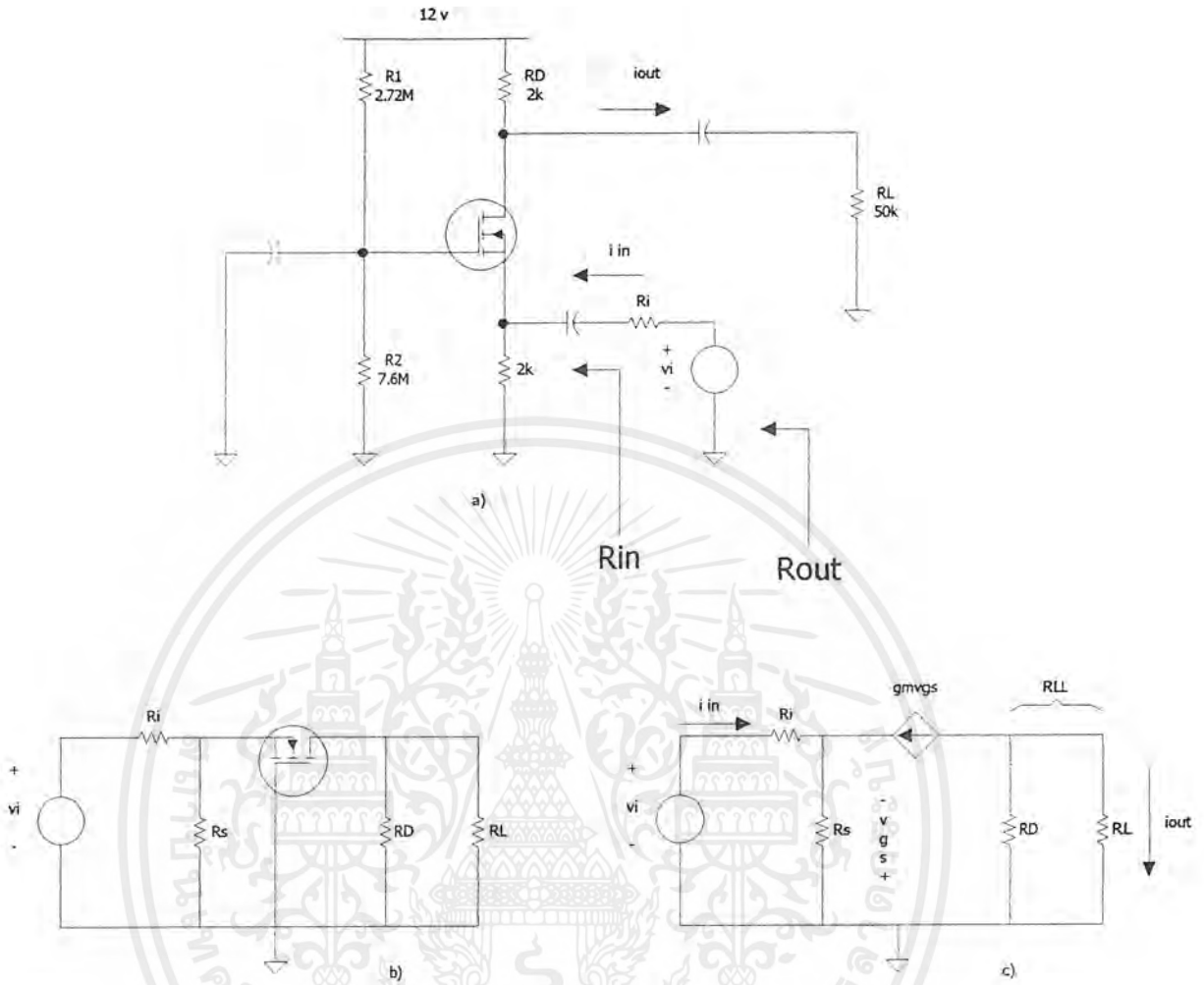
รูปที่ 3.2คอมมอนซอสแอมปลิไฟเออร์

a). รูปวงจร b).รูปวงจร สมอลซิกแนล c).สมมูลย์ สมอลซิกแนล

3.3 วงจรขยายคอมมอนเกท

จากการจัดไบอัสให้วงจรคอมมอนเกทดังรูป 3.3(a) จะมีบายพาสคาปาซิเตอร์ต่อจากเกทไปยังกราวนด์ สัญญาณ v_i ผ่านคับปลิ้งคาปาซิเตอร์เข้าสู่ขาซอส และยังโหลด R_L ต่อเข้ากับขาเดรน สำหรับ สมอลซิกแนล เราจะแทนแหล่งจ่าย, บายพาสคาปาซิเตอร์และคับปลิ้งคาปาซิเตอร์ โดยการลัดวงจร ดังรูป 3. 3 (b) และ 3. 3 (c) คือวงจรสมมูลย์ สมอลซิกแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 คอมมอนเกทแอมปลิไฟเออร์

a). รูปวงจร b).รูปวงจร สมอลซิกแนล c).สมมูลย์ สมอลซิกแนล

ในการวิเคราะห์เราจะใช้วงจรในรูป 3. 3 (a) ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติทางด้านไอซี ได้ดีกว่า เราจะสมมติว่าทรานซิสเตอร์ถูกไบอัสให้อยู่ในย่านอิ่มตัว การหาสมการของเกนกระแสและแรงดัน และ ค.ต.ท. อินพุทสามารถหาได้จากรูป 3. 3 (b) แต่เราจะใช้เทคนิคบางประการ ซึ่งเหมาะกับวงจรที่มีความซับซ้อน โดยเปลี่ยนเป็นรูป 3. 3 (d) แทน ซึ่งเหมือนกันทุกประการ จะได้โวลเตจเกนดังนี้

$$A_v = \frac{v_o}{-v_{gs}} = -\frac{(g_m v_{gs})}{-v_{gs}} R_L = g_m R_L$$

ซึ่งเหมือนกันกับ คอมมอนซอส แต่ไม่มีการกลับเฟส ส่วนเกนกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{-g_m v_{gs}}{i_{in}} = \frac{-g_m\left[-i_{in}(1/g_m)\right]}{i_{in}} = 1$$

ค.ต.ท. อินพุท $R_{in} = 1/g_m$ จากรูป 3. 3 (c) พบว่าเป็นลักษณะที่พิเศษของวงจร คอมมอนเกท ซึ่ง ค.ต.ท. ค่าต่ำก็เหมาะสมในบางกรณี

ในการหาค่า ค.ต.ท. เอาท์พุท เราจะคิดรวม r_o ด้วย จากรูป 3.4 เมื่อปิดอินพุท และใช้แรงดันทดสอบที่เอาท์พุทจะได้

$$i_{test} = g_m v_{gs} + \frac{v_{test} - \left(-v_{gs}\right)}{r_o}$$

เนื่องจาก i_{test} ไหลผ่าน R_i, $v_{gs} = -i_{test}R_i$ จะได้ v_{test} / i_{test}

$$R_{out} = r_o(1 + g_m R_i) + R_i \approx r_o(1 + g_m R_i)$$

แสดงว่าค่า มีค่ามากกว่า สรุปว่า วงจรขยายคอมมอนเกท มีโวลเตจเกนสูง และค.ต.ท.เอาท์พุทสูง เกนกระแสเป็นหนึ่งและค.ต.ท.อินพุทต่ำ

3.4 วงจรขยายคอมมอนเดรน

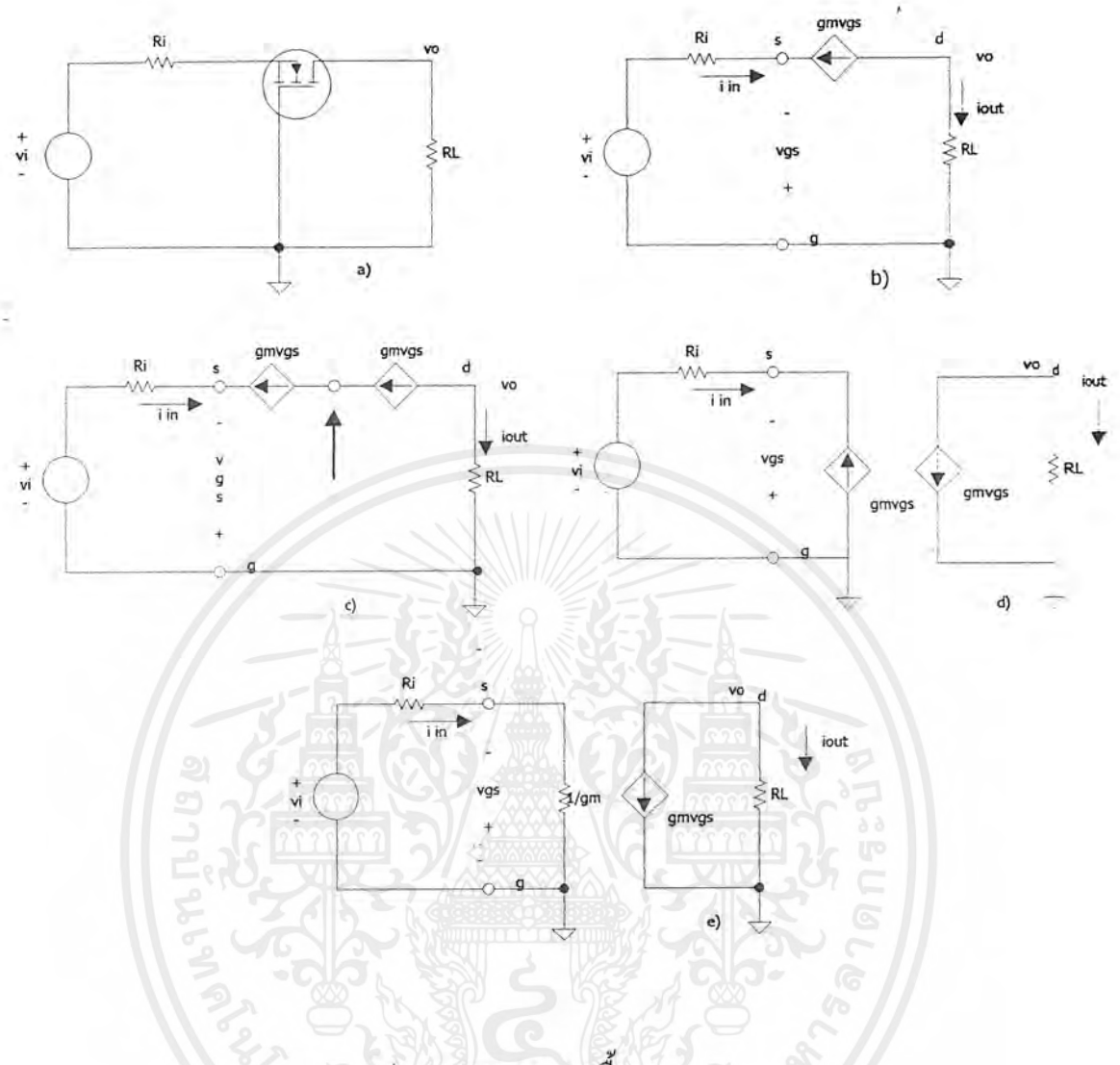
รูปที่ 3.6 (a) เป็นวงจร วงจรขยายคอมมอนเดรนหรือเรียกว่า ซอสฟอลโลเวอร์สัญญาณอินพุทป้อนเข้าที่เกทและเอาท์พุทออกที่ซอส สำหรับสมอลซิกแนลจะแสดงในรูป3.6(b)โดย $R_p = R_1 \,||\, R_2$ โดยเดรนเป็นคอมมอนต่ออินพุทและเอาท์พุท และสมมติว่าทรานซิสเตอร์ทำงานใน ย่านอิ่มตัว จากวงจรในรูป 3.6 (d)

$R_{in} = \infty$ และ $A_i = \infty$

ในการหาโวลเตจเกน สังเกตุว่า $v_o = g_m v_{gs} R_L$ และ $v_{gs} = v_{in} - v_o$ แทนค่า v_{gs} ลงที่ได้

$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{v_o}{v_{gs}} = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L}$$

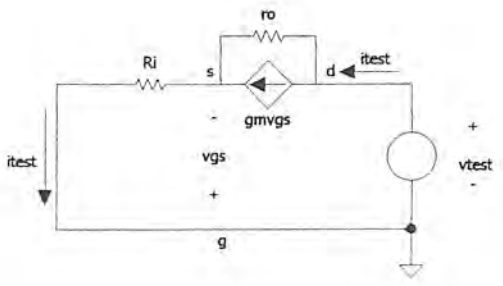
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3. 4 คอมมอนเกทพื้นฐาน

a).วงจรสมอลซิกแนล b)สมมูลย์สมอลซิกแนล c) ผลของการเพิ่มแหล่งจ่ายกระแสอนุกรมที่เหมือนกัน d).ต่อโหนดใหม่ลงกราวน์ e). วงจรสมมูลย์อีกรูปแบบหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.5วงจรที่ใช้ค่าความต้านทานเอาท์พุท

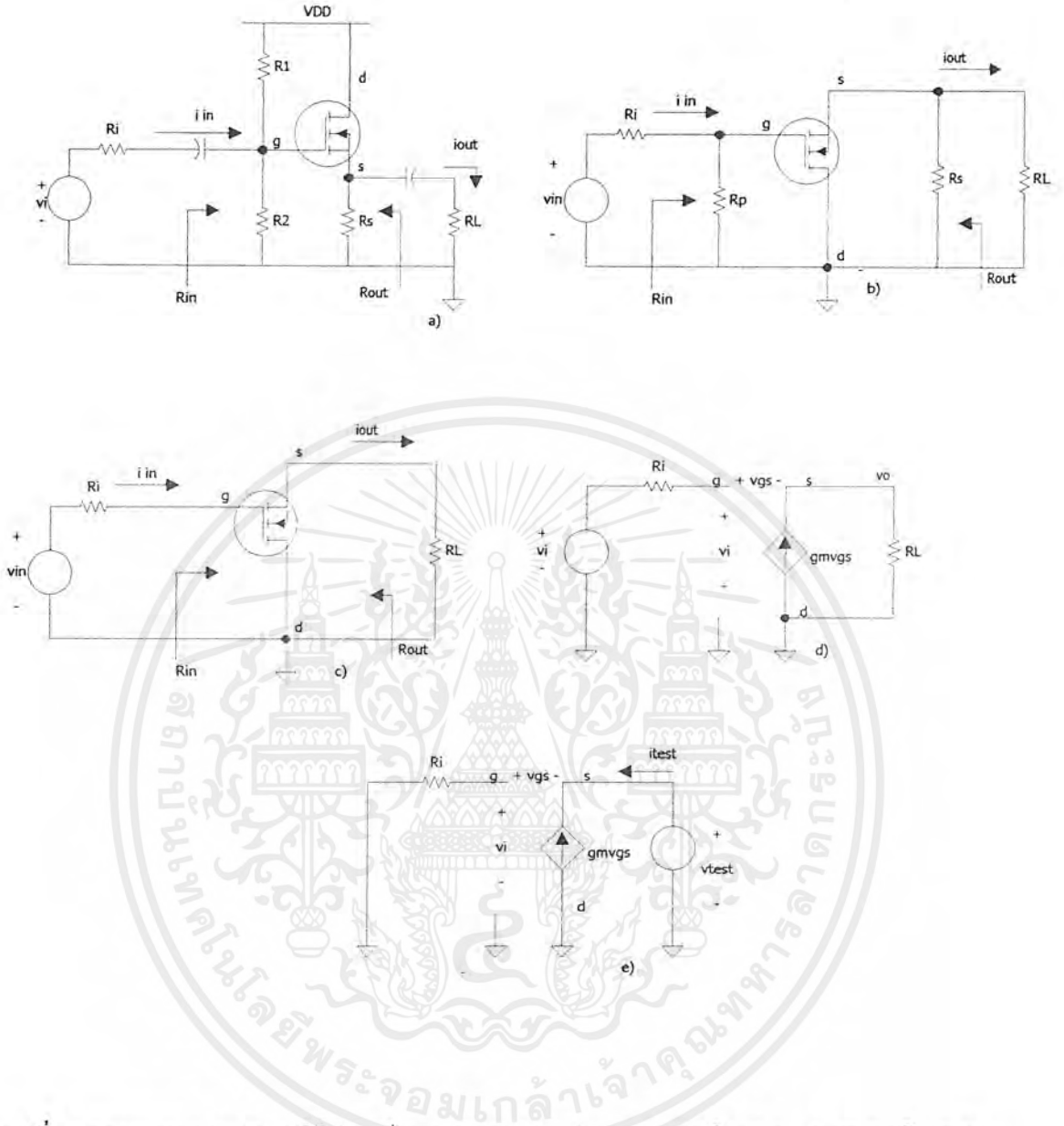
ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับ ค.ต.ท. เอาท์พุท เราจะใช้วงจรในรูป 3.6 (c) ได้

$$i_{test} = -g_m(-v_{test}) \quad \text{หรือ}$$

$r_{out} = \dfrac{1}{g_m}$ ซึ่งมีค่าต่ำและไม่ขึ้นอยู่กับ ค.ต.ท. ที่ซอส ; R_i สังเกตุได้จากรูป 3.6

(b) ว่า $R_{out} = R_s \,||\, \dfrac{1}{g_m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.6 คอมมอนเครนแอมปลิไฟเออร์ a). รูปวงจร b).รูปวงจร สมอลซิกแนล c). สมอลซิกแนล แบบ ไอซี d).สมมูลย์ สมอลซิกแนล e) วงจรใช้หาค่าความต้านทานเอาท์พุท

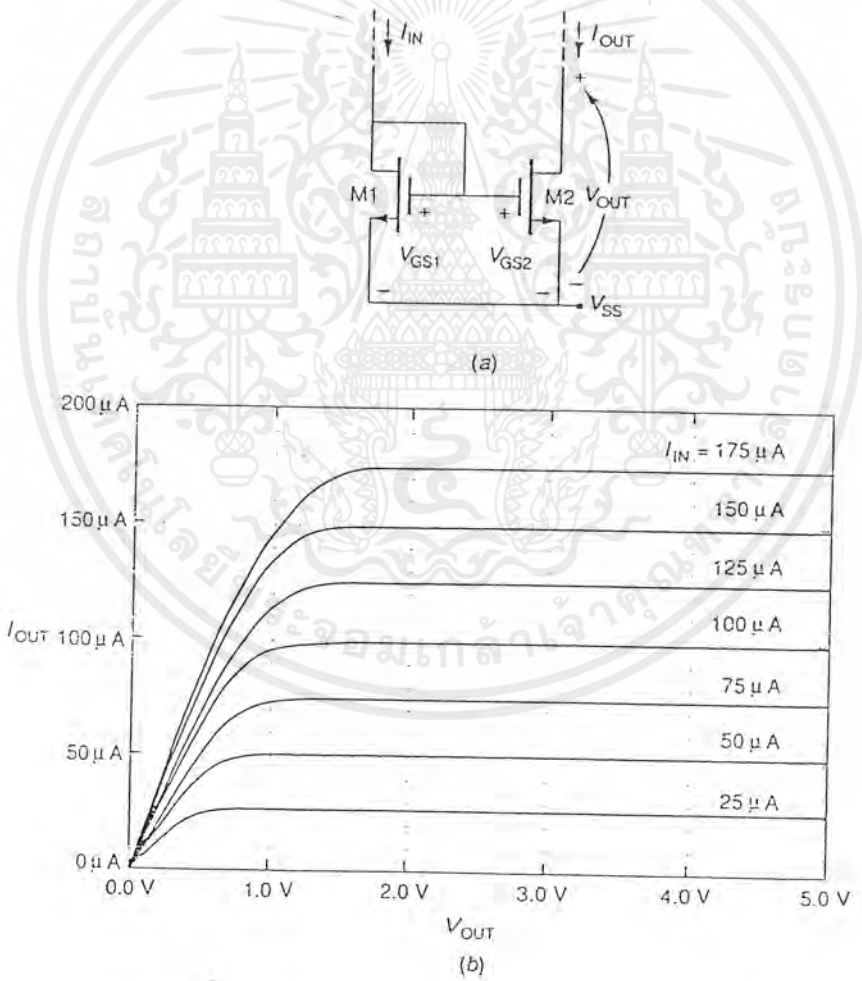
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

แหล่งจ่ายกระแสแบบมอสเฟ็ท(MOSFET Current Source)

4.1 แหล่งจ่ายกระแสแบบมอสเฟ็ทพื้นฐาน

ด้วยหลักการเดียวกันกับ แหล่งจ่ายกระแสแบบไบโพลาร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับมอสได้ในบางกรณีสามารถคำนวณค่าของ มอส ได้ง่ายกว่า เนื่องจากไม่มีกระแสเบสหรือกระแสเกท ดังรูป 4.1a สังเกตุว่าเมื่อ $V_{DS1} \geq V_t$ แล้ว M_1 จะอยู่ในย่านอิ่มตัวเสมอ เนื่องจาก $V_{DG1} = 0$ สมมติว่า V_{DS2} มากกว่า $V_{GS1} \geq V_{t1}$ ก็จะสามารถใช้ รูปแบบจำลองย่านอิ่มตัวแทน อุปกรณ์ทั้ง 2 ตัวได้



รูป 4.1 a).วงจรสะท้อนกระแสแบบมอส b).การทำงานของวงจรรูป a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่า $V_{GS}-V_t$ หาได้จากสมการ I_D

$$V_{GS1}-V_{t1}=\left[\frac{2L_1I_{D1}}{K'_NW_1(1+\lambda_1V_{DS1})}\right]^{1/2}$$

จากรูป เนื่องจาก M_1 และM_2 สมมติให้เหมือนกันทุกประการ จะได้ว่า

$$\frac{I_{out}}{I_{in}}=\frac{I_{D2}}{I_{D1}}=\frac{K'_{N1}W_1L_2(1+\lambda_2V_{DS2})}{K'_{N2}W_2L_1(1+\lambda_1V_{DS1})}$$

จะพบว่า ผลของความยาวแชนแนล(channel length modulation effect) ; λ มีผลต่อ วงจรสะท้อนกระแสแบบมอส และขนาดของ W และ L ของมอส ก็มีผลต่อเกนของ วงจรสะท้อนกระแส ในรูป 4.1b เป็นกราฟคุณลักษณะ $I-V$ ที่ใช้ค่า พารามิเตอร์ ดังนี้
$W=50\mu m, L=10\mu m, V_t=0.75V, K'_N=24\mu A/V^2, Y_N=0.8V^{-1/2}, \lambda=0.01V$ และ ϕ = 0.6V. รูปกราฟนี้แสดงให้เห็นว่าผลของค่า λ มีผลให้ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นและไม่เป็นลักษณะทางอุดมคติค่าความชันนี้ ทำให้สามารถหาค่า ความต้านทานเอาท์พุท ได้โดย

$$r_{out}=\frac{V_{out}}{i_{out}}=r_{ds2}=\frac{1}{\lambda I_{out}}$$

ซึ่งหาก $I_{out}=100\mu A$ ค่า $r_o=1M\Omega$

ถ้าต้องการ วงจรสะท้อนกระแส ที่มี ความต้านทาน เอาท์พุท ค่ามากๆสามารถทำได้โดยใช้วงจรดังรูป 4.2 โดย M_3, M_4 ทำหน้าที่ทำให้ค่า V_{DS1} และ V_{DS2} เท่า ๆ กัน ซึ่งเป็นการกำจัดผลของ λ ได้อย่างมาก M_4 จะเพิ่ม ความต้านทานเอาท์พุท ของวงจรสะท้อนกระแส วงจรนี้เรียกว่า วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด(cascode current mirror) ถ้าไม่คิดผลของ มิสแมทช์(mismatch) ของวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคดหาได้โดย

$$\frac{I_{out}}{I_{in}}=\frac{(W_2/L_2)}{(W_1/L_1)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

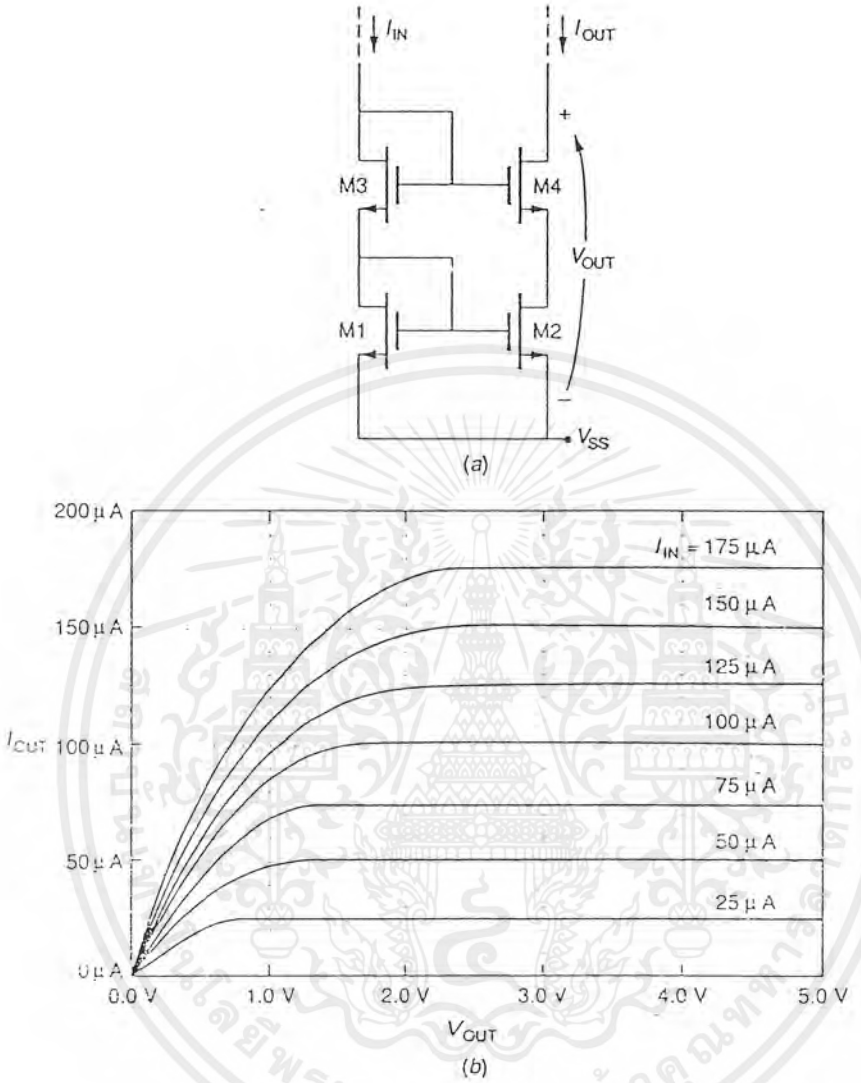
จากรูปกราฟคุณลักษณะ I-V ของวงจรในรูป4.2(a) ถ้าใช้ค่า พารามิเตอร์ต่างๆ เท่ากับ วงจรสะท้อนกระแสธรรมดาจะพบว่าความต้านทานเอาท์พุทของวงจรสะท้อนกระแสแบบมอส คำนวณได้จาก แบบจำลองสมอลซิกแนล ในรูป 4.3 หาได้ดังนี้

$$v_{out} = v_4 + v_2 = r_{ds4}\left[i_{out} + g_{mb4}v_2 - g_{m4}(v_3 + v_1 - v_2)\right] + v_2$$

$$r_{out} = r_{ds2} + r_{ds4} + r_{ds2}r_{ds4}g_{m4}(1+\eta_4) \qquad ; \ \eta_4 = \frac{g_{mb4}}{g_{m4}}$$

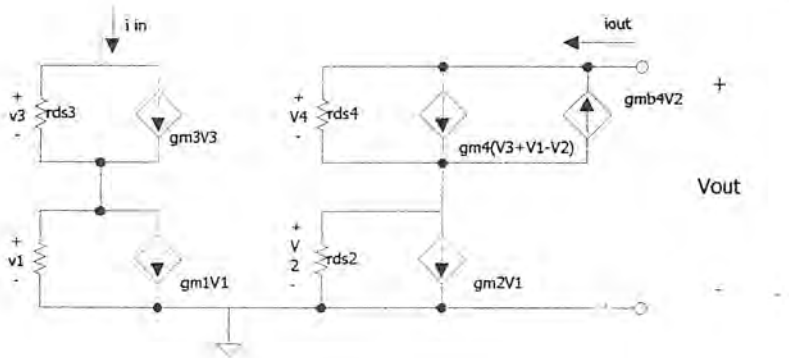
เห็นได้ชัดเจนว่า r_o เพิ่มขึ้นอีก $r_{ds4}g_{m4}(1+\eta_4)$ ซึ่งถ้ากระแสเท่ากับ 100 μA จะให้ค่า $r_o = 155M\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 a).วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด b).การทำงานของวงจรรูป a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.3 โมเดล สมอลซิกแนล รูป 4.2 a)

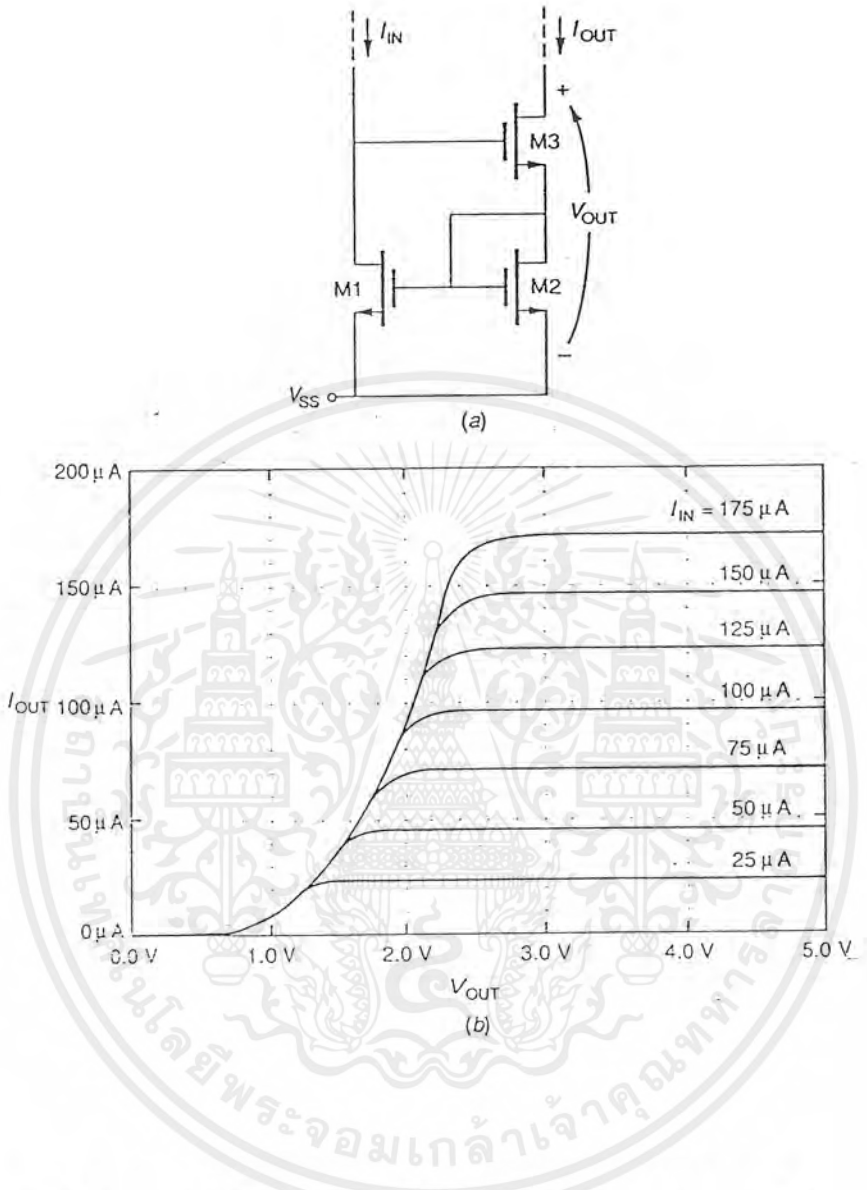
4.2 วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน

เป็นวงจรสะท้อนกระแส อีกแบบหนึ่ง แสดงดังรูป 4.4 สมมติว่าใช้ W/L เท่ากัน สำหรับมอสทุกตัวเท่ากับ $50\mu/10\mu$ เหมือนกับที่ผ่านมา สังเกตุได้ว่าความชัน มีความราบมากกว่า วงจรสะท้อนกระแส ธรรมดา แสดงว่ามีค่า ความต้านทาน เอาท์พุท สูงกว่า แต่ไม่เหมาะกับกระแสขนาดใหญ่ เนื่องจาก$V_{ds2} \neq V_{ds1}$ ทำให้เกิดผลจาก λ ทำให้ $I_{ds2} < I_{ds1}$ ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้ถ้านำเอามอสที่เชื่อมขา เดรน-เกท มาต่อเข้าระหว่างเดรนของ M1 และเกทของ M3 ความต้านทาน ของเอาท์พุท เมื่อหาแล้วจะพบว่า

$$r_0 = r_{ds3} + r_{ds2}\left[\frac{1 + r_{ds}g_{m3}(1+\eta_3) + g_{m1}r_{ds1}g_{m3}r_{ds3}}{1 + g_{m2}r_{ds2}}\right]$$

เห็นได้ว่าทั้ง วงจรสะท้อนกระแส แบบวิลสันและคาสโคด มีค่า r_o สูง แต่เงื่อนไขในการทำงานคือ จะต้องมีแรงดันอย่างน้อย 2 Vt คร่อมที่ อินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.4 a).วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน b).การทำงานของวงจรรูป a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วงจรขยายความแตกต่าง(DIFFERENTIAL AMPLIFIERS)

"Differential Amplifier" พบมากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด รวมทั้งแอมปลิไฟเออร์ทั้งความถี่สูงและต่ำ, อนาลอกมอดูเลเตอร์, ลอจิกเกต ดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมป์บางรูปแบบจะถูกนำไปใช้เป็นภาคอินพุทของไอซีออฟแอมป์ เราทราบกันอยู่แล้วว่า การออกแบบทรานซิสเตอร์ตัวเดียวให้มีเกนมาก ๆ และเสถียรภาพทำได้ยาก ซึ่งถ้าหากใช้ดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมป์แล้วจะได้ทั้งเกนที่มีค่าสูงและเสถียรภาพดี

ดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมป์มีความเหมาะสมที่ใช้ในไอซีเป็นอย่างมาก ในไอซีแล้วการสร้างอุปกรณ์ทั้งหมดสามารถทำได้พร้อม ๆ กัน บนแผ่นสารกึ่งตัวนำเพียงชิ้นเดียว นอกจากนั้นอุปกรณ์ยังมีพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกันมากด้วย ซึ่งอุปกรณ์ที่แมทซ์กันย่อมทำให้ดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมป์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

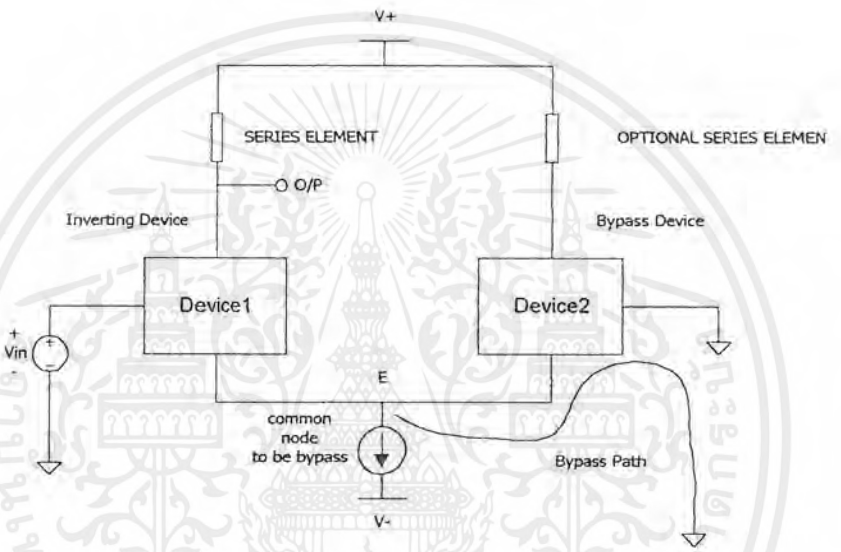
5.1 วงจรขยายความแตกต่างพื้นฐาน

เสถียรภาพการไบอัสของทรานซิสเตอร์ตัวเดียวนั้น ต้องการตัวต้านทานฟีดแบ็คหรืออุปกรณ์อิมพีแดนซ์สูง ใส่เข้าระหว่างโหนดร่วมของอุปกรณ์แอคทีฟกับกราวนด์ ดังรูป 5.1 แต่อย่างไรก็ตามกลไกในการทำให้เสถียรภาพก็จะเป็นตัวจำกัด การตอบสนองต่อสมอลซิกแนล ของแอมป์ด้วย

รูป 5.1 วงจร มอสเฟทอินเวอร์เตอร์ แบบมีฟีดแบค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ปัญหาระหว่างความเสถียรภาพกับเกนสามารถแก้ไขได้โดยใส่บายพาสคาปาซิเตอร์เข้าไป เนื่องจากทาง ดีซี คาปาซิเตอร์เปรียบเสมือน เปิดวงจร ซึ่งไม่ไปเปลี่ยนแปลงไบอัสของวงจรแต่ละบายพาสสัญญาณลงกราวนด์ที่ความถี่สูง วิธีการบายพาสที่ดีกว่านี้ แสดงในรูป 5.2 ซึ่งเป็นการเพิ่มอุปกรณ์แอคทีฟตัวที่สอง ซึ่งใช้โหนดร่วมกับอุปกรณ์ตัวแรก และมีการไบอัสแบบขนานโดยแชร์แหล่งจ่ายระแสตรงร่วมกัน จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ตัวที่สองจะทำให้เกิด เส้นทางบายพาสที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำลงกราวนด์ ซึ่งจะทำให้มีเกนมากได้ โดยไม่จำเป็นต้องมีบายพาสคาปาซิเตอร์



รูป 5.2 แนวคิดเบื้องต้นของดิฟเฟอร์เรนเชียลแอมปลิไฟเออร์

ในรูปที่ 5.2 เป็นวงจรดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมป์พื้นฐาน อุปกรณ์ที่หนึ่งมี "พูลอัพ(pull up)" โหลดต่อแบบอนุกรมอยู่ ทำหน้าที่ให้เป็น อินเวอร์ติ้ง(inverting) ขณะที่อุปกรณ์ตัวที่ 2 ทำหน้าที่บายพาส อุปกรณ์ พูลอัพอีกตัวต่ออนุกรมกับอุปกรณ์ที่ 2 เพื่อให้เกิดความสมดุลย์และไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่บายพาส นอกจากนี้ยังสามารถทำให้วงจรสามารถรับอินพุทได้ 2 ทาง คือ ที่ต่อกับอุปกรณ์ที่ 1 และอุปกรณ์ที่ 2 ความสามารถนี้คือลักษณะเด่นที่สำคัญของดิฟแอมป์ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

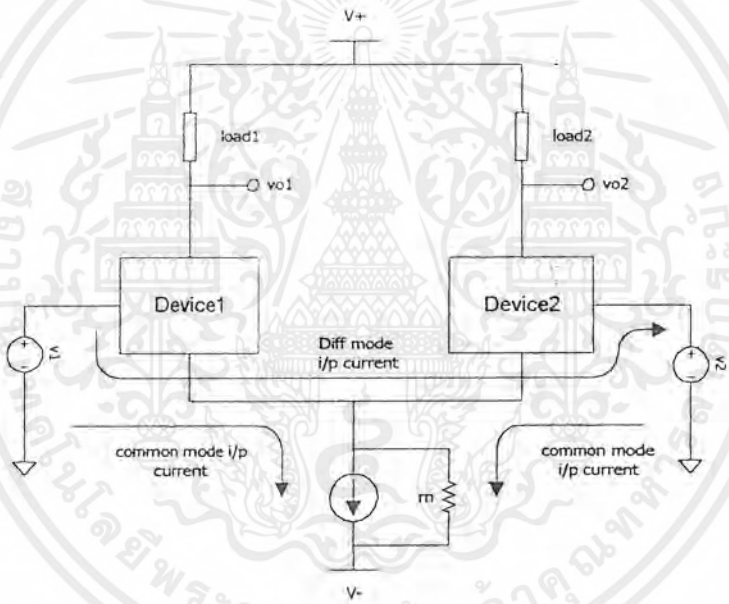
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 สัญญาณดิฟเฟอเรนเชี่ยลและสัญญาณคอมมอนโหมด

วงจรในรูป 5.2 ซึ่งเป็นวงจรสมดุลย์ อุปกรณ์ที่ 1 ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ที่ 2 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์บายพาส เราสามารถสลับหน้าที่ของอุปกรณ์ 2 ตัวนี้ได้ โดยทั่วไปเราสามารถป้อนอินพุทเข้าที่ อุปกรณ์ทั้ง 2 พร้อม ๆ กันได้ดังรูป 5.3

ความแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุท v_1 และ v_2 เรียกว่า ดิฟเฟอเรนเชี่ยลโหมดของอินพุท กำหนดเป็น $v_{idm} = v_1 - v_2$ ส่วนคอมมอนโหมดสามารถกำหนดเป็นค่าเฉลี่ยหรือ $v_{icm} = \frac{v_1 + v_2}{2}$ ซึ่งสามารนำมากำหนดอินพุททั้ง 2 เป็น

$$v_1 = v_{icm} + \frac{v_{idm}}{2} \quad , \quad v_2 = v_{icm} - \frac{v_{idm}}{2}$$



รูป 5.3 วงจรถูกขับด้วยอินพุท 2 ข้าง พร้อมๆกัน

ถ้าแรงดัน v_{o2} ในรูป 5.3 เป็นเอาท์พุทที่ 2 องค์ประกอบ ของ ดิฟเฟอเรนเชี่ยล และ คอมมอนโหมด ของสัญญาณเอาท์พุท จะเป็นดังนี้ $v_{odm} = v_{o1} - v_{o2}$ และ $v_{ocm} = \frac{v_{o1} + v_{o2}}{2}$ ซึ่ง $v_{o1} = v_{ocm} + \frac{v_{odm}}{2}$ และ $v_{o2} = v_{ocm} - \frac{v_{odm}}{2}$

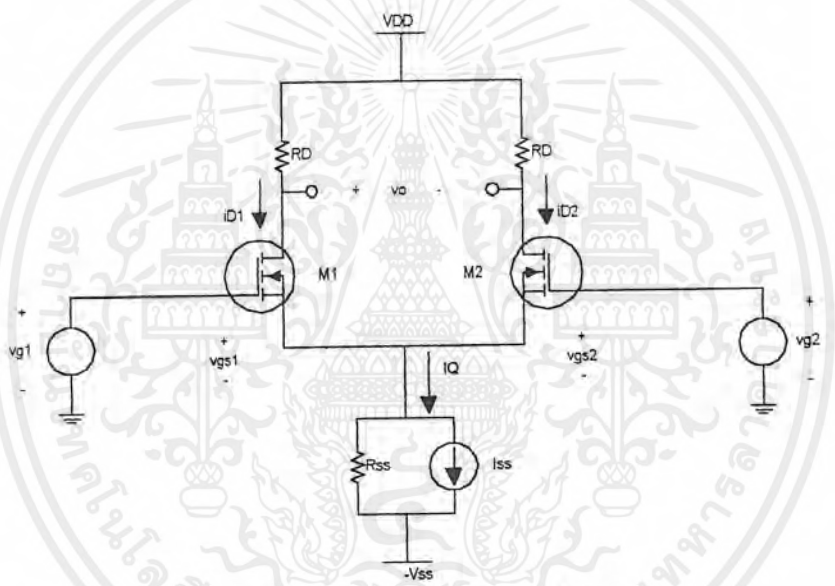
ถ้าแอมปลิไฟเออร์เป็นลิเนียร์ การตอบสนองต่ออินพุท 2 อินพุทที่เกิดขึ้นพร้อมกันสามารถหาได้โดยใช้ ซุเปอร์โพซิชั่น(superposition) โดยเฉพาะเมื่อสัญญาณ เอาท์พุท ประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลบวกของสัญญาณ อินพุท (ดิฟเฟอเรนเชี่ยล โหมด) คูณกับ ดิฟเฟอเรนเชี่ยลโหมดเกน และ สัญญาณ อินพุทคอมมอนโหมดคูณกับ คอมมอนโหมดเกน

5.3 วงจรขยายความแตกต่าง

คู่ เอ็นมอส ดังรูป 5.4 ในการไบอัสปกติจะใช้ วงจรจ่ายกระแสแบบมอส และตัวต้านทาน R_D ก็จะถูกแทนด้วยแอคทีฟโหลด



รูป 5.4 วงจรมอสเฟ็ทดิฟเฟอเรนเชี่ยล

5.3.1 ลักษณะสมบัติการถ่ายโอนไฟตรง

เราใช้ เอ็น-แชนแนล ในการวิเคราะห์ แต่ก็สามารถปรับมาใช้กับ พี-แชนแนล ได้ โดยการเปลี่ยนเครื่องหมายบางตัวเพื่อให้วิเคราะห์ได้ง่ายจะสมมติว่า

1. ค่าความต้านทานทางเอาท์พุทของ มอสเฟ็ท $\rightarrow \infty$; $r_d \rightarrow \infty$

2. มอสเฟ็ท เหมือนกันทุกประการ และทำงานในบ้านอิ่มตัว, ค่า แรงดันขีดเริ่ม มีค่าเท่ากัน ; $V_{t1} = V_{t2} = V_t$ และค่าคงที่ $K_{p1} = K_{p2} = K_p$

3. ค่าความต้านทานเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์ที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส จะเป็นอนันต์ ; $R_{SS} = \infty$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของ I_D กับ V_{GS} ; $I_D = \frac{K_p}{2}(V_{GS} - V_t)^2$

$$\therefore \quad \sqrt{I_{D1}} = \sqrt{\frac{K_p}{2}}(V_{GS1} - V_t)$$

$$\sqrt{I_{D2}} = \sqrt{\frac{K_p}{2}}(V_{GS2} - V_t) \text{ เอา } \sqrt{I_{D1}} - \sqrt{I_{D2}}$$

เพื่อทำให้ค่า $V_{GS1} - V_{GS2} = V_{id}$

$$\sqrt{I_{D1}} - \sqrt{I_{D2}} = \sqrt{\frac{K_p}{2}}(V_{GS1} - V_t) - \sqrt{\frac{K_p}{2}}(V_{GS2} - V_t) = \sqrt{\frac{K_p}{2}}(V_{GS1} - V_{GS2})$$

$$= \sqrt{\frac{K_p}{2}} v_{id}$$

เนื่องจากผลรวมของ $I_{D1} - I_{D2} = I_Q$ จะได้ว่า

$$I_{D1} = \frac{I_Q}{2} + \sqrt{\frac{2K_p}{2} I_Q}\left(\frac{v_{id}}{2}\right)\left[1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(I_Q/K_p)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$I_{D2} = \frac{I_Q}{2} - \sqrt{\frac{2K_p}{2} I_Q}\left(\frac{v_{id}}{2}\right)\left[1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(I_Q/K_p)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

ที่จุด Quiescent ; $v_{id} = 0$ จะได้

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_Q}{2}$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} = V_{GS}$$

$$I_Q = 2I_D = 2K_p(V_{GS} - V_t)^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\sqrt{K_P I_Q}}{2} = K_P (V_{GS} - V_t)^2 / (V_{GS} - V_t) = I_Q / (V_{GS} - V_t)$$

$(I_Q / K_P) = (V_{GS} - V_t)^2$ แทนค่าความสัมพันธ์เหล่านี้ในสมการของ I_{D1} และ I_{D2} เป็น

$$I_{D1} = \frac{I_Q}{2} + \left(\frac{I_Q}{V_{GS} - V_t}\right)\left(\frac{v_{id}}{2}\right)\left[1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(I_Q / K_P)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$I_{D2} = \frac{I_Q}{2} - \left(\frac{I_Q}{V_{GS} - V_t}\right)\left(\frac{v_{id}}{2}\right)\left[1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(I_Q / K_P)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

ถ้า $v_{id}/2 << (V_{GS} - V_t)$, I_{D1} และ I_{D2} จะประมาณได้เป็น

$$I_{D1} = \frac{I_Q}{2} + \left(\frac{I_Q}{V_{GS} - V_t}\right)\left(\frac{v_{id}}{2}\right)$$

$$I_{D2} = \frac{I_Q}{2} - \left(\frac{I_Q}{V_{GS} - V_t}\right)\left(\frac{v_{id}}{2}\right)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนจากค่า $\frac{I_Q}{2}$ คือ

$$\frac{\Delta I_D}{I_Q/2} = \frac{v_{id}}{V_{GS} - V_t} = \frac{v_{id}}{\sqrt{I_Q / 2K_P}}$$

ถ้า v_{id} มีค่ามากพอ กระแสไบอัส I_D ทั้งหมดจะไหลผ่าน มอสเฟ็ท เพียงตัวเดียว ค่า v_{id} ที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้ง2 ตัวนำกระแสหาได้จากสมการนี้ ภายใต้เงื่อนไขว่า $\Delta I_D = I_Q/2$ นั่นคือ

$$v_{id} \le \left(\frac{I_Q}{2K_P}\right)^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้ค่า v_{id} จะมีเงื่อนไขคือกระแส I_Q จะผ่านทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง ดังนั้น บริเวณที่เกินกว่า v_{id} ระแส I_{D1} และ I_{D2} จะเป็นศูนย์หรือไม่ก็ I_Q เมื่อนำกระแสนอร์มอลไลซ์ของ I_{D1} และ I_{D2} มาพล็อตเทียบกับ แรงดันดิฟเฟอเรนเชี่ยล ; v_{id}/v_n ดังรูป5.5โดย $v_n = \sqrt{\frac{I_Q}{K_p}}$ แรงดันเอาท์พุทของคู่ มอสเฟ็ท จะเป็น

$$v_{O1} = V_{DD} - I_{D1}R_D \text{ และ } v_{O2} = V_{DD} - I_{D2}R_D$$

แรงดันเอาท์พุท กระแสตรง คือ

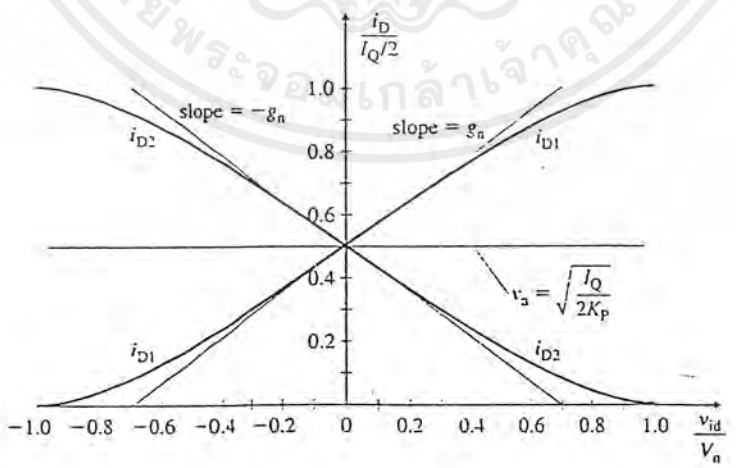
$$v_{od} = v_{O1} - v_{O2} = R_D(I_{D2} - I_{D1}) = -R_D\Delta I_D$$

แทนค่า ΔI_D ลงไป

$$v_{od} = -R_D\left(\frac{I_Q}{V_{GS} - V_t}\right)\left(\frac{v_{id}}{2}\right)$$

$$= -R_D\left(\frac{K_p I_Q}{2}\right)^{1/2} v_{id}$$

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุท v_{od} กับแรงดันผลต่าง v_{id} ถ้า v_{id} เป็นศูนย์, v_{od} ก็เป็นศูนย์ด้วย



รูปที่ 5.5 กราฟการถ่ายโอนไฟตรงของ มอสเฟ็ทแบบนอร์มอลไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 การวิเคราะห์สมอลซิกแนล

$$gm = K_P(V_{GS} - V_t)$$

$$= \sqrt{K_P I_Q}$$

แสดงว่า มอสเฟ็ท ที่ต้องการค่า gm สูง ๆ จะต้องมีกระแสไบอัส I_Q ค่าสูง ๆ ด้วย วงจรครึ่งหนึ่งจะเหมือนกับวงจรอีกครึ่งหนึ่ง (สมมาตร) ดังนั้นโวลเตจเกน ;

$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = -g_m R_D$$

คอมมอนโหมดโวลเตจเกน ; $A_c = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = \frac{-g_m R_D}{1 + g_m 2R_{SS}}$

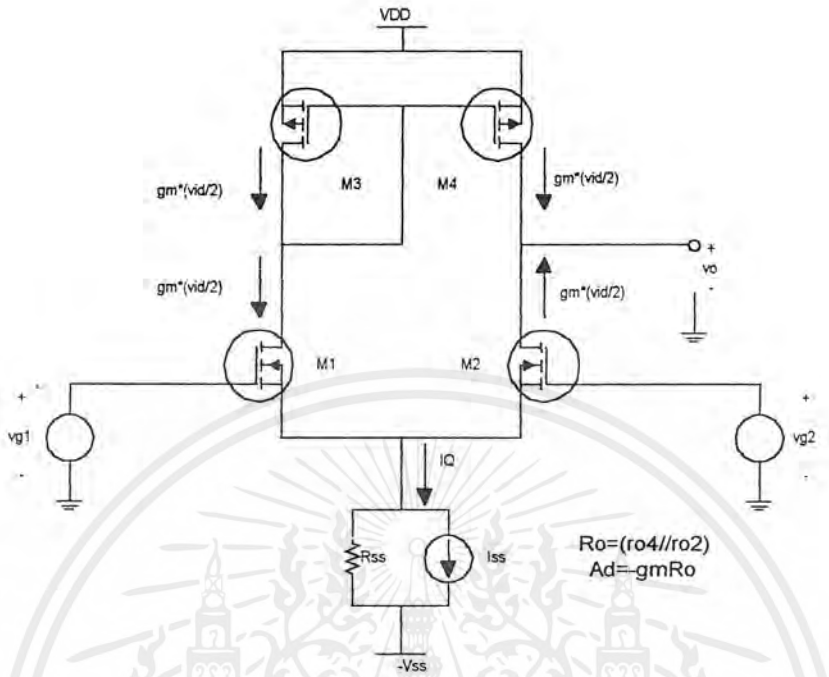
5.4 วงจรขยายความแตกต่างแบบใช้แอคทีฟโหลด

วงจรขยายความแตกต่างโดยปกติจะใช้ วงจรสะท้อนกระแสเป็นแอคทีฟโหลดวงจรแสดงดังรูป 5.6 โดย วงจรสะท้อนกระแส จะประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ M_3 และ M_4 การเพิ่มแรงดันอินพุทให้กับ M_1 เป็น $v_{id}/2$ จะทำให้กระแสเดรนของ M_1 เพิ่มเป็น $g_m v_{id}/2$ ซึ่งจะเพิ่มกระแสที่ M_4 ด้วยค่าเดียวกัน เนื่องจากผลของ วงจรสะท้อนกระแส และจะลดกระแสของ M_2 ลงด้วย เพราะว่า M_1, M_2 เป็น เอ็นมอส ทรานซิสเตอร์ และส่วนประกอบ (M_3, M_4) เป็น พีมอส รูปแบบนี้เราจะเรียกว่า วงจรขยายแบบซีมอส(CMOS Amplifier) วงจรสมมูลย์ทางด้านเอาท์พุทของ ซีมอสแอมป์แสดงในรูป 5.7 ค่าความต้านทานเอาท์พุท R_o คือ $r_{o2} \,||\, r_{o4}$

ซึ่ง $r_{o2} = 2V_M / I_Q$ = ค.ต.ท. เอาท์พุทของ M_2

$r_{o4} = 2V_M / I_Q$ = ค.ต.ท. เอาท์พุทของ M_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

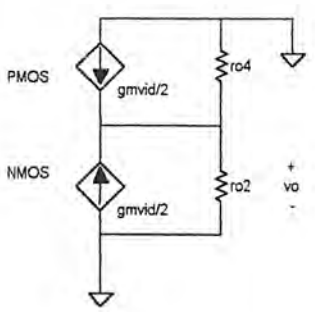


รูป 5.6 วงจรขยายความแตกต่าง

ดิฟเฟอร์เรนเชี่ยล โวลเตจเกน ; $A_d = \frac{V_o}{V_{id}} = -g_m(r_{o2} \,||\, r_{o4})$

ซึ่ง g_m คือค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ของ มอสเฟ็ท M_2 เมื่อแทนค่าของ r_{o4}, r_{o2} และ g_m แล้ว จะได้

$A_d = -\sqrt{\frac{K_p V_M}{I_Q}}$ ซึ่งจะมีค่าสูงเมื่อ I_Q มีค่าต่ำ ๆ



รูปที่ 5.7 สมมูลย์ สมอลซิกแนล ของ ซีมอส แอมปลิไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การออกแบบวงจรออปแอมป์แรงดันต่ำ(Low voltage OpAmp Design)

6.1 บทนำ

ในปัจจุบัน การออกแบบระบบที่กล่าวว่าเป็นระบบแรงดันต่ำ(low voltage)จะเป็นวงจรที่สามารถทำงานได้โดยมีไฟเลี้ยงช่วง 1-5 V. ค่าแรงดันไฟเลี้ยงจะถูกจำกัดโดยค่าของแรงดัน เกท-ซอส และแรงดันอิ่มตัวที่ซ้อนกันอยู่ แต่แรงดันค่าเหล่านี้ไม่ได้เป็นตัวกำหนดลักษณะของวงจร เช่น หากทรานซิสเตอร์มีค่าแรงดันขีดเริ่ม 1V. แรงดันไฟเลี้ยง 3V. แสดงว่าสามารถมีแรงดัน เกท-ซอส ซ้อนกันได้ 2 ค่า ($2V_{GS}$) ถ้าหากทรานซิสเตอร์สามารถทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่า 0.5V. ได้ก็สามารถมีแรงดัน เกท-ซอส ซ้อนกันได้ถึง 5 ค่า ($5V_{GS}$) ดังนั้นอาจแยกชนิดของวงจรแรงดันต่ำได้ตามค่าของแรงดันที่ซ้อนกันอยู่ การออกแบบที่สามารถใช้แรงดันไฟเลี้ยงต่ำที่สุดจะต้องให้ทรานซิสเตอร์ทำงานให้โหมด วีคอินเวอร์ชั่น(weak inversion) เนื่องจากมีแรงดัน เกท-ซอสต่ำที่สุด แต่ในกรณีที่ต้องการสลูว์เรทมาก จำเป็นต้องให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดสตรองอินเวอร์ชั่น(strong inversion)

การแยกประเภทของวงจรแรงดันต่ำ อาจแยกได้เป็น 2 ประเภท

1. วงจรแรงดันต่ำ (low – voltage circuits) วงจรประเภทนี้จะมี แรงดัน เกท-ซอส ซ้อนกันได้ 2 ค่า และแรงดันอิ่มตัว 2 ค่า นั่นคือ

$$V_{sup,\ min} = 2\,(V_{gs}+V_{dsat})$$

2. วงจรแรงดันต่ำมาก(extremely low-Valtage circuits) วงจรนี้ค่าแรงดันไฟเลี้ยงต่ำสุดคือค่าของ แรงดัน เกท-ซอส และแรงดันอิ่มตัวอย่างละค่าเท่านั้น

$$V_{sup,\ min} = V_{gs}+V_{dsat}$$

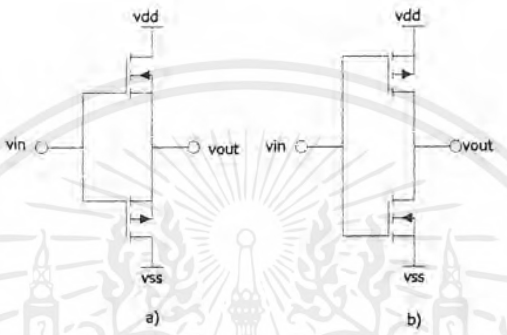
6.2 สัญญาณแบบเรลทูเรล (Rail to rail)

การที่แรงดันไฟเลี้ยงมีค่าต่ำ ย่อมทำให้วงจรมีผลกระทบอย่างมากในเรื่องของ อัตราส่วนซิกแนลทูนอยส์(SNR) เพราะนอกจากสัญญาณมีขนาดเล็กแล้วยังมีนอยส์ ที่เกิดจากกระแสที่มีค่าต่ำๆ ด้วย ดังนั้นการทำให้ อัตราส่วนซิกแนลทูนอยส์มีค่ามากที่สุด ก็คือทำให้สัญญาณมีขนาดใหญ่ที่สุดที่จะทำได้ ซึ่งก็คือสัญญาณแบบเรลทูเรล ทางด้านเอาท์พุท และสัญญาณ คอมมอนโหมด ทางอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 วงจรแบบเรลทูเรล

โดยปกติที่ ภาค เอาท์พุท จะใช้วงจรแบบ คอมมอนเดรน ดังรูป6.1a. แรงดันเอาท์พุทจะถูกจำกัดโดยค่าแรงดัน เกท-ซอส 1 ค่า ดังนั้นการออกแบบแรงดันต่ำจะต้องใช้วงจรแบบคอมมอนซอสแทน ดังรูป6.1b. ซึ่งจะถูกจำกัดเพียงค่าแรงดันอิ่มตัวเท่านั้น



รูปที่6.1

a).ลักษณะวงจรภาคเอาท์พุทแบบธรรมดา

b). ลักษณะวงจรภาคเอาท์พุทแบบเรลทูเรล

6.3.1วงจรภาคอินพุท

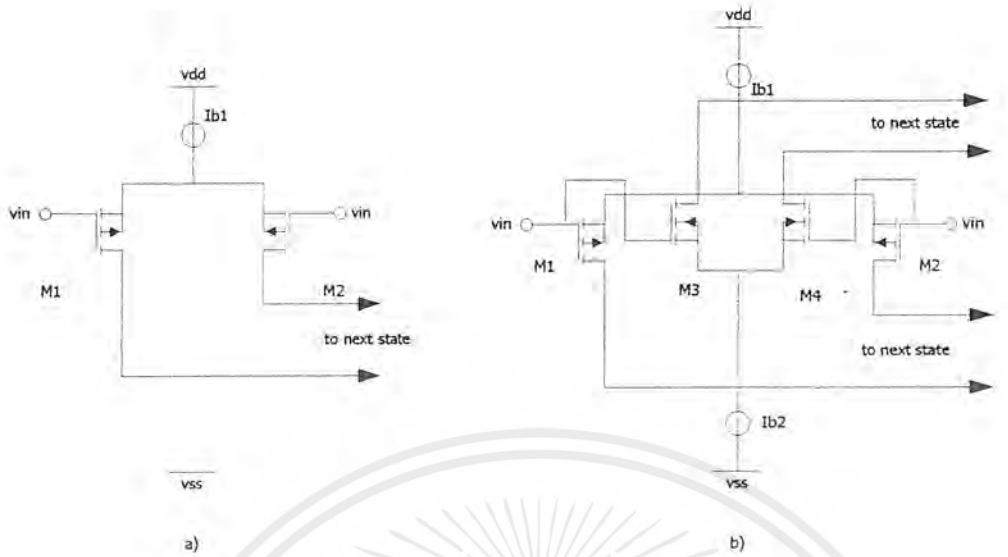
ทางด้านภาค อินพุท ดังรูป6.2a.สัญญาณคอมมอนโหมดจะถูกจำกัดไม่สามารถเรลทูเรล ได้ต้องแทนด้วย คอมพลีเมนทรีอิทพุท ดังรูป6.2 b. ซึ่งประกอบด้วย อินพุทแบบ พีแชนแนล M_1-M_2 และแบบ เอ็นแชนแนล M_3, M_4 ซึ่งจะยอมให้สัญญาณมีค่าได้ถึงแรงดันไฟเลี้ยงลบและบวกตามลำดับ ผลก็คือย่านของคอมมอนโหมดอินพุท ของวงจรแบบนี้สามารถมีค่าได้สูงถึงแรงดันไฟเลี้ยง

$$V_{sup,\,min} = V_{sgp} + 2\,V_{dsat}$$

ถ้าไฟเลี้ยงมีค่าสูงกว่าค่าต่ำสุด ย่านคอมมอนโหมดอินพุทจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. แรงดันคอมมอนโหมดอินพุทค่าต่ำ : พีมอสทำงาน
2. แรงดันคอมมอนโหมดอินพุทส่วนกลาง : ทั้งพีมอสและเอ็นมอสทำงาน
3. แรงดันคอมมอนโหมดอินพุทค่าสูง : เอ็นมอสททำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่6.2 ลักษณะวงจรภาคอินพุทแบบเรลทูเรล

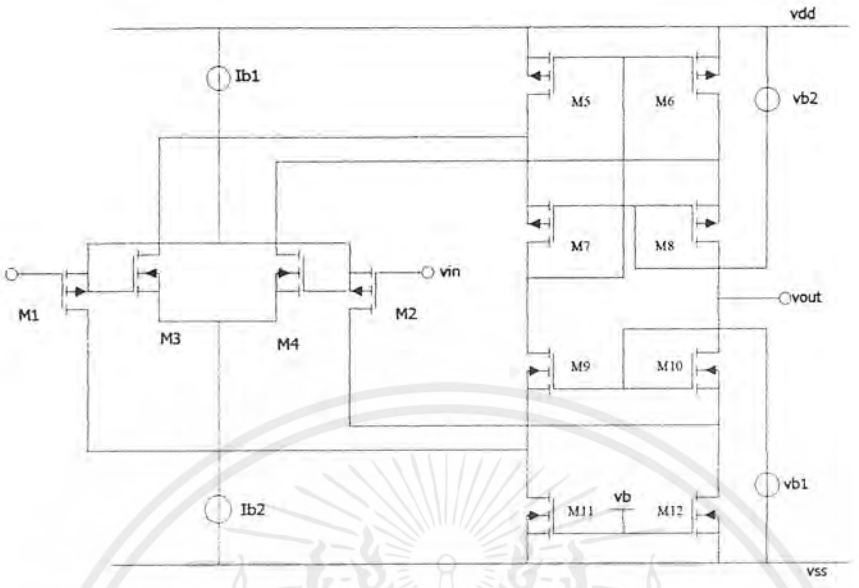
วงจรคอมพลีเมนเทรี่ จะมีความสามารถในการเป็นเรลทูเรลได้โหลดจะต้องเป็นวงจรแบบโฟลด์แคสโคด (folded cascode) ถ้าโหลดด้วยวงจรแบบสะท้อนกระแสจะทำให้ความสามารถของเรลทูเรลลดลง ดังรูป6.3 M_{11}-M_{12} ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งต้องมีค่าเป็น $2I_{ref}$

ถ้าต้องการให้กระแสเอาท์พุทของภาคอินพุทมีค่าสูงสุดที่สำคัญคือการมิสแมทของอุปกรณ์จะทำให้เกิดอ็อฟเซ็ท เช่นค่าของ Vt, ทรานส์คอนดัคแตนซ์แฟคเตอร์ (β) ข้อเสียของวงจรแบบเรลทูเรลคือค่าทรานคอนดัคแตนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงช่วงที่อินพุทอยู่นอกคอมมอนโหมดผลก็คือค่าเกนมีการเปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนแปลงของลูปเกน ; Aβ อาจทำให้เกิดการ ผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ (distortion) ถ้าค่าเกน มีค่าต่ำ

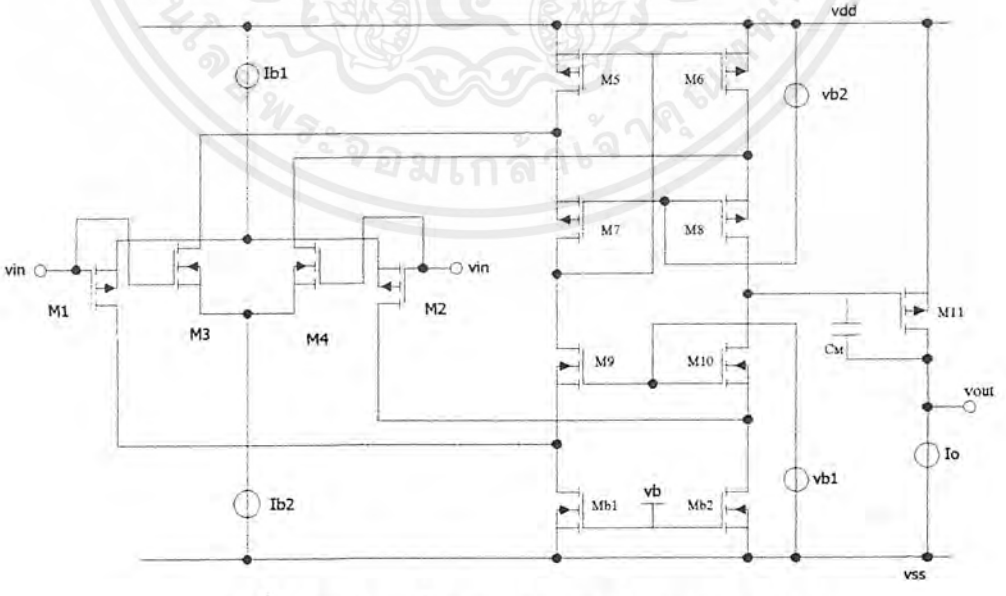
นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ ยังมีผลต่อการชดเชยทางความถี่ (frequency compensation) เช่นวงจรดังรูป6.4 ถ้าต้องการให้ เกน-แบนด์วิด ;ω_u มีค่าอย่างน้อยเป็น ωu_{min} เนื่องจาก $\omega_u = \frac{g_{mi}}{C_M} = \frac{g_{mo}}{2C_L}$ ถ้าค่า g_{mi} เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ค่าของ g_{mo} ต้องมีค่าเป็นเพิ่ม 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่6.3 วงจรโฟลด์แคสโคดแบบเรลทูเรล

เพื่อที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าวงจรจะมีเสถียรภาพในการชดเชยความถี่ซึ่งเป็นการสิ้นเปลือง โดยเปล่าประโยชน์ (กระแสหรือขนาดของทรานซิสเตอร์ต้องมีค่ามากขึ้น) วิธีการแก้ไขคือ การหาวิธีการมาควบคุมค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ ให้มีค่าคงที่ทุกช่วงอินพุท



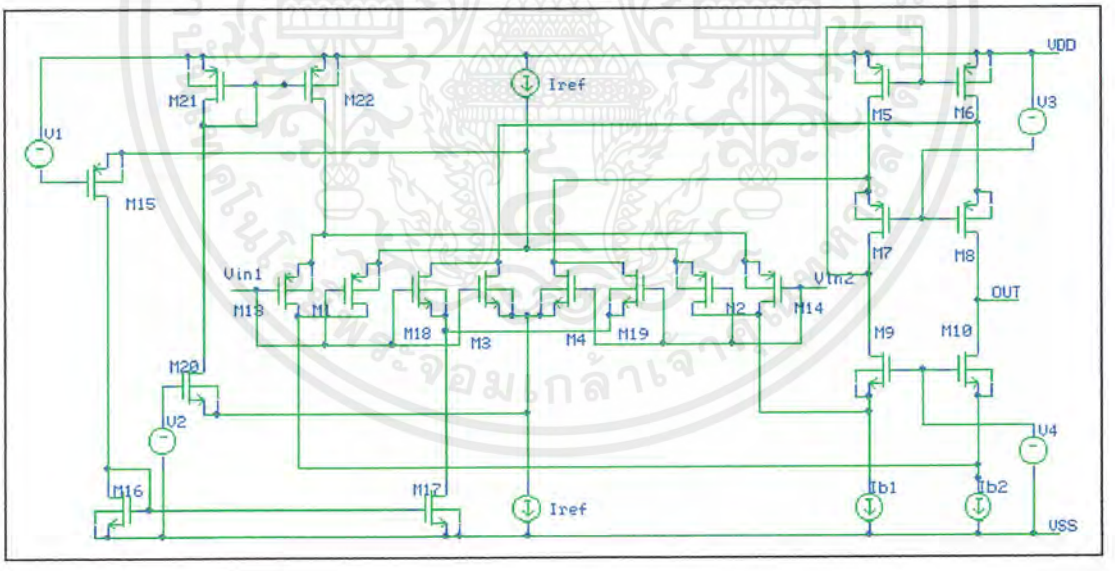
รูปที่6.4 ออปแอมป์แบบ 2 ภาค(เอาท์พุทแบบคลาสเอ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรในรูป6.5 คือวงจรแบบเรลทูเรลที่มีการควบคุมค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์แบบอินพุทโดยใช้มัลติเพิ้ลอินพุท

หลักการของวงจรคือ การให้ค่าคอนดัคแตนซ์ของวงจรมีค่าเป็น 2 เท่าเมื่ออินพุทอยู่นอกย่านคอมมอนโหมด โดยการเพิ่มอินพุทขนานกับอินพุทหลักเดิม วงจรประกอบด้วย คอมพลีเมนทารี่เดิม M_1, M_4 ส่วนควบคุมทรานส์คอนดัคแตนซ์ คือ ส่วนอินพุทที่เพิ่มเติม M_{13}, M_{14} และ M_{18}, M_{19} ส่วนที่เป็นสวิตซ์ M_{15} และ M_{20} ส่วนสะท้อนกระแส M_{16}, M_{17} และ M_{20}, M_{21}

ในช่วงกลางของคอมมอนโหมดอินพุท M_1-M_4 จะถูกไบอัสด้วยกระแสของ I_{ref} ในขณะที่กระแสไบอัสของอินพุทเสริมเป็นศูนย์ ขณะนี้อินพุทจะมีค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์เป็น $2g_{mi}$ ในช่วงล่างของคอมมอนโหมดอินพุท M_{20} จะดึงเอากระแสไบอัสของเอ็นแชนแนลอินพุท M_3, M_4 ไปป้อนผ่านวงจรสะท้อนกระแส M_{21}, M_{22} แล้วกระแสจะไบอัสให้กับ M_{13}, M_{14} ซึ่งต่อขนานอยู่กับ M_1 และ M_2 ผลก็คือ ค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับ 2 g_{mi} ซึ่งมีค่าเท่ากันกับช่วงกลางของคอมมอนโหมด คอมมอนโหมดอินพุทในช่วงบนของคอมมอนโหมดอินพุทก็เกิดเหตุการณ์ลักษณะคล้ายกัน



รูปที่6.5 วงจรควบคุมทรานส์คอนดัคแตนซ์แบบมัลติเพิ้ลอินพุท

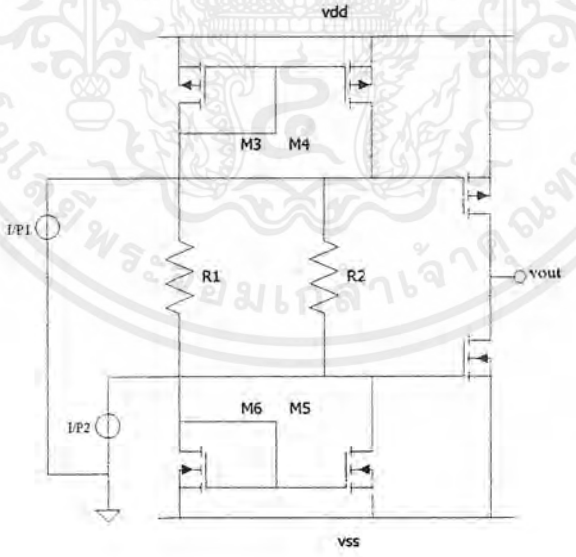
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2 วงจรภาคเอาท์พุท (output stage)

จุดประสงค์ที่มีภาคเอาท์พุท คือ การทำให้ออปแอมป์สามารถส่งสัญญาณที่มีกำลังเพียงพอให้กับโหลดโดยให้เกิดการเพี้ยนต่ำ ๆ (ขนาดที่ยอมรับได้) ในการที่จะทำให้ภาคเอาท์พุทเป็นวงจรแบบเรลทูเรล จะต้องใช้การต่อทรานซิสเตอร์แบบคอมมอนซอส อัตราส่วนของกระแสสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับโหลดต่อกระแสไดวเชนท์ (quiescent) จะต้องมีค่าสูง นั่นคือมีประสิทธิภาพดี ซึ่งก็คือการให้ไบอัสในคลาส เอบี

วงจรคลาสเอบี จะมีการตั้งค่าแรงดันระหว่างเกทของเอาท์พุททรานซิสเตอร์ วิธีหนึ่งที่จะสร้างแรงดันนี้ขึ้นมาคือ วงจรแสดงในรูป6.7 วงจรประกอบด้วยเอาท์พุทแบบเรลทูเรล M_1, M_2 และส่วนสร้างแรงดัน M_3, M_4 และ R_1, R_2 ทรานซิสเตอร์ M_3-M_6 และ R_2 จะสร้างกระแสไบอัส I_{ref} ซึ่งจะถูกป้อนให้กับ R_1 เพื่อให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_1 เป็นการตั้งค่าแรงดันระหว่างเกทของเอาท์พุททรานซิสเตอร์

$$\sqrt{I_{push}} + \sqrt{I_{pull}} = 2\sqrt{I_q} \quad \text{โดย Iq} = \frac{S_1}{S_3} I_{ref}$$



รูปที่6.6 วงจรภาคเอาท์พุทแบบเรลทูเรลคลาสเอบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การออกแบบวงจรและการทดลอง

ออปแอมป์ที่ใช้งานกันโดยทั่วไป จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ 1.ภาคดิฟเฟอร์เรนเชียลแอมป์ 2.ภาคขยายที่2 3.ภาคเอาท์พุทสเตจ โดยภาคแรก ทำหน้าที่เป็นอินพุทขยายสัญญาณความแตกต่าง และจะถูกส่งต่อให้กับภาคขยายที่2 โดยทั่วไปจะเป็น ทรานซิสเตอร์ตัวเดียว เมื่อผ่านจากภาคนี้ สัญญาณที่ได้จะมีขนาดเพียงพอตามที่เราต้องการ แต่หากต้องการนำไปใช้กับวงจรที่มีความต้านทานต่ำ จะมีภาคที่ 3 ด้วยเป็นภาคขยายกำลัง ให้สามารถขับกระแสให้กับโหลดได้ และยังลดค่าความต้านทานที่เอาท์พุทด้วย

วงจรที่ใช้ออกแบบนี้จะเป็น วงจรที่ใช้งานเฉพาะอย่าง ไม่ได้เป็นวงจรที่ใช้งานกันโดยทั่วไป เนื่องจากมีค่าความต้านทานเอาท์พุทสูงแต่ก็มีข้อดีอื่นๆทดแทน

7.1 ขั้นตอนการออกแบบ

ในการออกแบบวงจร เราสามารถกำหนดขั้นตอนใหญ่ๆได้ดังนี้

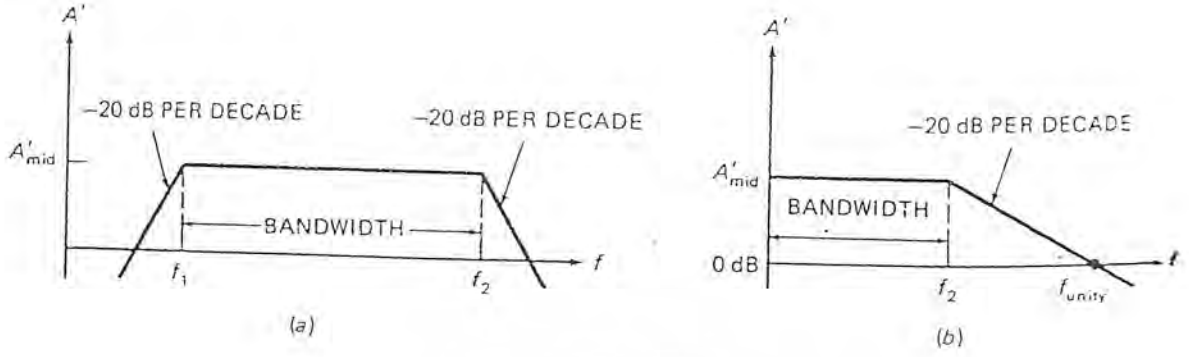
1.เลือกลักษณะของวงจรที่ต้องการใช้งาน แต่ละลักษณะก็จะมีข้อดี และข้อเสียต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความต้องการ

2.กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างของวงจร รวมถึงการเลือกเทคโนโลยีของอุปกรณ์ และการคำนวนด้วยมือ เมื่อได้แล้วจึงนำไป จำลองโดยโปรแกรม เพื่อได้ทำการปรับค่าให้ได้ตามต้องการ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของออปแอมป์ ที่สำคัญคือ เกน, เกนแบนด์วิดท์, เซ็ททลิ่งไทม์, สลูว์เรท, คอมมอนโหมดอินพุทเรนจ์, แรงดันเอาท์พุทที่สามารถเป็นได้, CMRR, PSRR และค่าออฟเซ็ท

ค่าแบนด์วิดท์ ;B ของวงจรขยาย หาได้จากความแตกต่างของค่าความถี่คัทออฟความถี่สูงและความถี่ต่ำ นั่นคือ $B = f_2 - f_1$ ดังรูปที่6.1(a)แต่เนื่องจากออปแอมป์เป็นคับปลิ้งแบบ direct ดังนั้นจะไม่มี ความถี่คัทออฟความถี่ต่ำ ดังรูป6.1(b) เป็นกราฟเกนกระแสที่มีแบนด์วิดท์ $B = f_2$ เช่นออปแอมป์ 741 มีค่า $f_2 = 10Hz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่7.1 กราฟตอบสนองความถี่

ค่าเกนแบนด์วิดท์ :GB หาได้จากการนำค่าเกนของวงจรคูณกับแบนด์วิดท์ของวงจร ค่านี้อาจจะพิจารณาได้ว่าเป็นค่าคงที่สำหรับวงจรนั้นๆ ค่าของ GB มีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์อีกอย่างคือ unity gain frequency ทั้ง 2 ค่านี้ สามารถหาได้จากสมการเดียวกันคือ

$$GB = f_{unity} = A_{cl} * f_{2cl}$$

ดังนั้นจะพบว่าออปแอมป์ที่มี ค่า GB ที่มีค่ามาก หมายความว่ามีเกนมากกว่าออปแอมป์ที่มีค่า GB น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ใช้งานค่าเดียวกัน

ค่าสลูว์เรท คือค่าอัตราความเร็วความเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาท์พุท เกิดจากการที่กระแสสูงสุดผ่านตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็นโวลต์/ไมโครวินาที ค่าของสลูว์เรทจะถูกกำหนด โดยค่ากระแสสูงสุดที่เหมาะสมต่อการทำงาน ค่าอีกค่าหนึ่งคือ settling time เป็นเวลาที่แรงดันเอาท์พุทออปแอมป์เริ่มมีความคงที่

ค่า CMRR คือค่าอัตราส่วนของ differential voltage gain ต่อ common mode voltage gain สามารถเขียนสมการได้เป็น $CMRR = A_{diff}/A_{cm}$ ค่านี้ยิ่งมีค่ามาก จะยิ่งทำให้ ออปแอมป์มีคุณภาพดีตาม

ค่า PSRR คือค่าความสามารถในการกำจัดเปลี่ยนแปลงที่ผ่านทางแหล่งจ่ายแรงดันต่อแรงดันเอาท์พุทซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณภาพอย่างหนึ่งของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าออฟเซท คือ ค่าที่เกิดจากความไม่ สมดุลย์ที่รวมทั้งความไม่สมดุลย์จากการออกแบบ และความไม่สมดุลย์ของอุปกรณ์เอง นั่นคือในสถานะที่ไม่มีอินพุทใดๆ ค่าแรงดันที่เอาท์พุทไม่เป็น ศูนย์ ค่าที่ปรากฏก็คือค่าออฟเซ็ท หรือค่าแรงดันออฟเซ็ทคือ ค่าแรงดันที่จะทำให้เอาท์พุทเป็นศูนย์เมื่อไม่มีอินพุทใดๆ

7.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์วงจรโฟลด์คาสโคด

ออกแบบให้วงจรมีค่าต่างๆดังนี้

1. GB = 3MHz 2. I/P CMR = 3.2v ถึง –5v 3. C_L = 10pF
4. SR = 5v/μsec 5. V_{DD} = 5v 6. V_{SS} = -5v 7.Gain>70dB
8. v_{out} range = 4v ถึง -4v 9. channel length = 10 μm

วิธีการออกแบบ

1. จากค่า GB = $\frac{gm_1}{C_L}$ สามารถหาค่า gm_1 ได้
2. เมื่อทราบค่า gm1 นำไปหาค่า S_1 (S = W/L) = $\frac{gm_1^2}{2KI_{D1}}$ และหาค่า V_{SG1} ได้
3. $V_{SD5}(sat.) = V_{DD}-Vin_{max}-V_{SG1}$ นำค่า $V_{SD5}(sat.)$ ไปหาค่า S_5 = $\frac{2I_{D5}}{K(V_{DS}{}^2{}_{(sat.)})}$
4. หาค่า S_6 เช่นเดียวกับ S_5 แล้วสามารถหาค่า V_{GS6} ได้
5. หาค่า S_{2C} เช่นเดียวกับ S_6 โดยต้องพิจารณา output swing ด้วย
6. หาค่า S_{4C} เหมือนกับ S_{2C} ซึ่งค่า S_{4C} จะกำหนดให้เท่ากับ S_4

ค่าขนาดของ MOSFET และลักษณะวงจรที่ใช้เป็นดังนี้

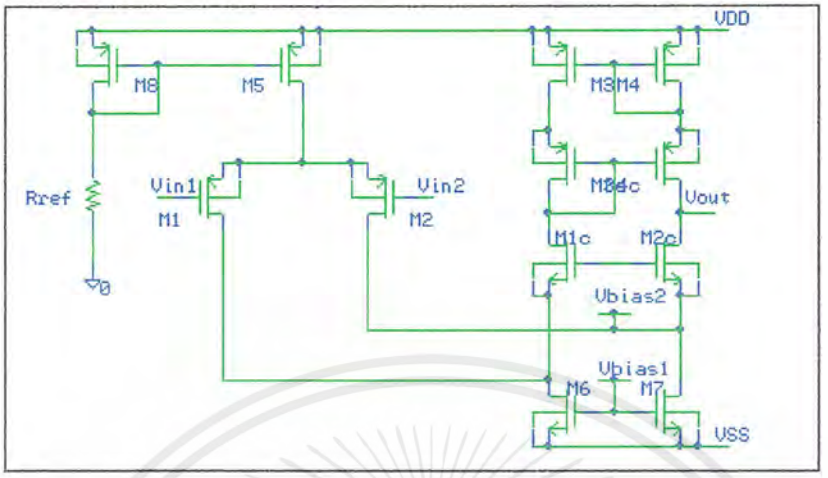
$S_1 = S_2 = 71$ $S_5 = S_8 = 35$

$S_6 = S_7 = 5$ $S_1c = S_2c = 10$

$S_4 = S_4c = S_3 = S_3c = 80$

S_9- $S_{18} = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 วงจรโฟลด์คาสโคดที่ใช้ในการออกแบบ

การจำลองโดยโปรแกรม

ผลการทดลองโดยโปรแกรม P-spice (LEVEL = 1)

1.การทดลองหาค่าแรงดันอินพุทออฟเซ็ท

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

(1) -5.0000 (2) -4.5011 (3) -4.0015 (4) -3.5017

(5) -3.0017 (6) -2.5016 (7) -2.0014 (8) -1.5012

(9) -1.0008 (10) -.5004 ($N_0001) -3.8380

($N_0002) 2.5749 ($N_0003) 1.2298

($N_0004) -3.8421 ($N_0005) 3.5332

($N_0006) 5.0000 ($N_0007) 3.7861

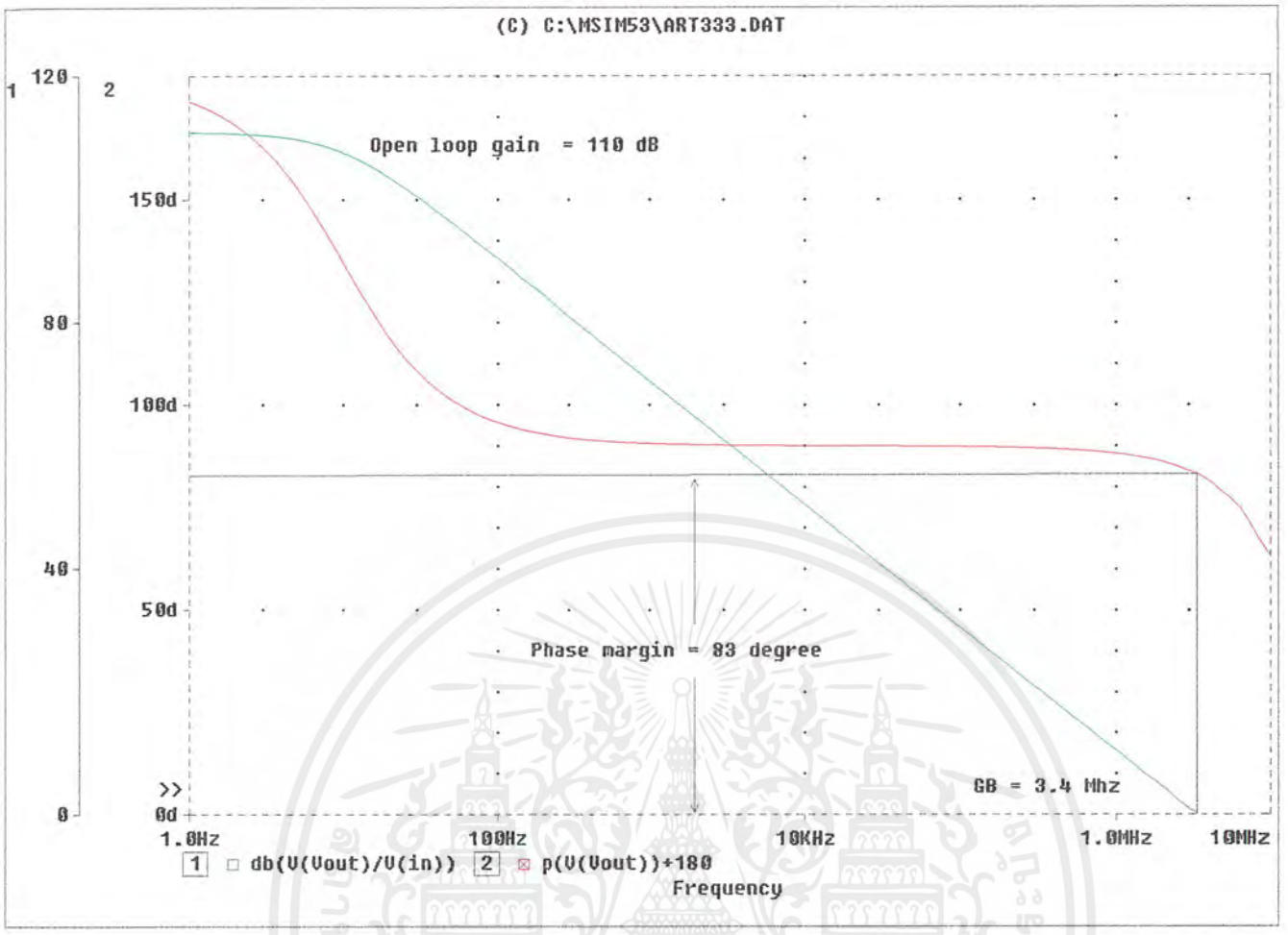
($N_0008) 3.7888 (Voffset) 7.382E-06

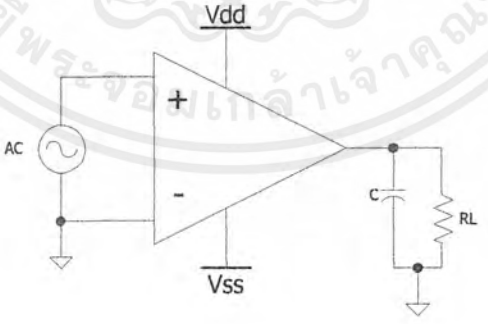
2.การทดลองหาค่า Unity gain frequency = 3.35MHz

3.การทดลองหาค่า Open loop gain = 110.8 dB

4.การทดลองหาค่า Input CMR = 4,-4 v

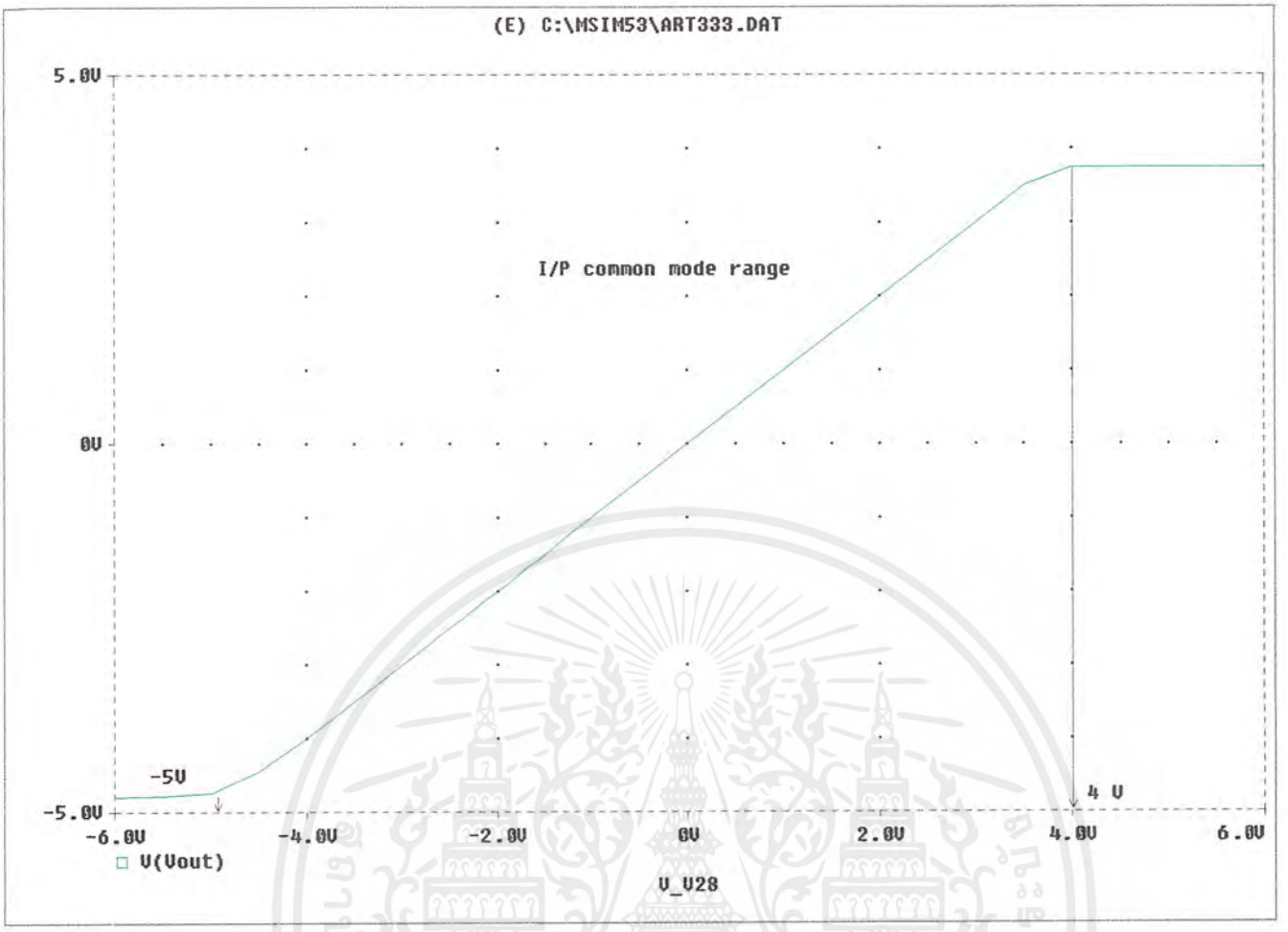
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

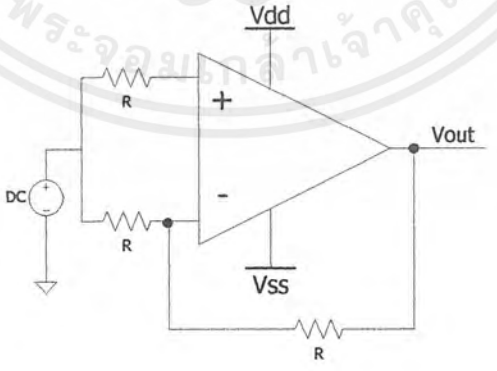




การทดลองหาค่าอัตราการขยายโอเพ่นลูปและเฟสมาร์จิ้น

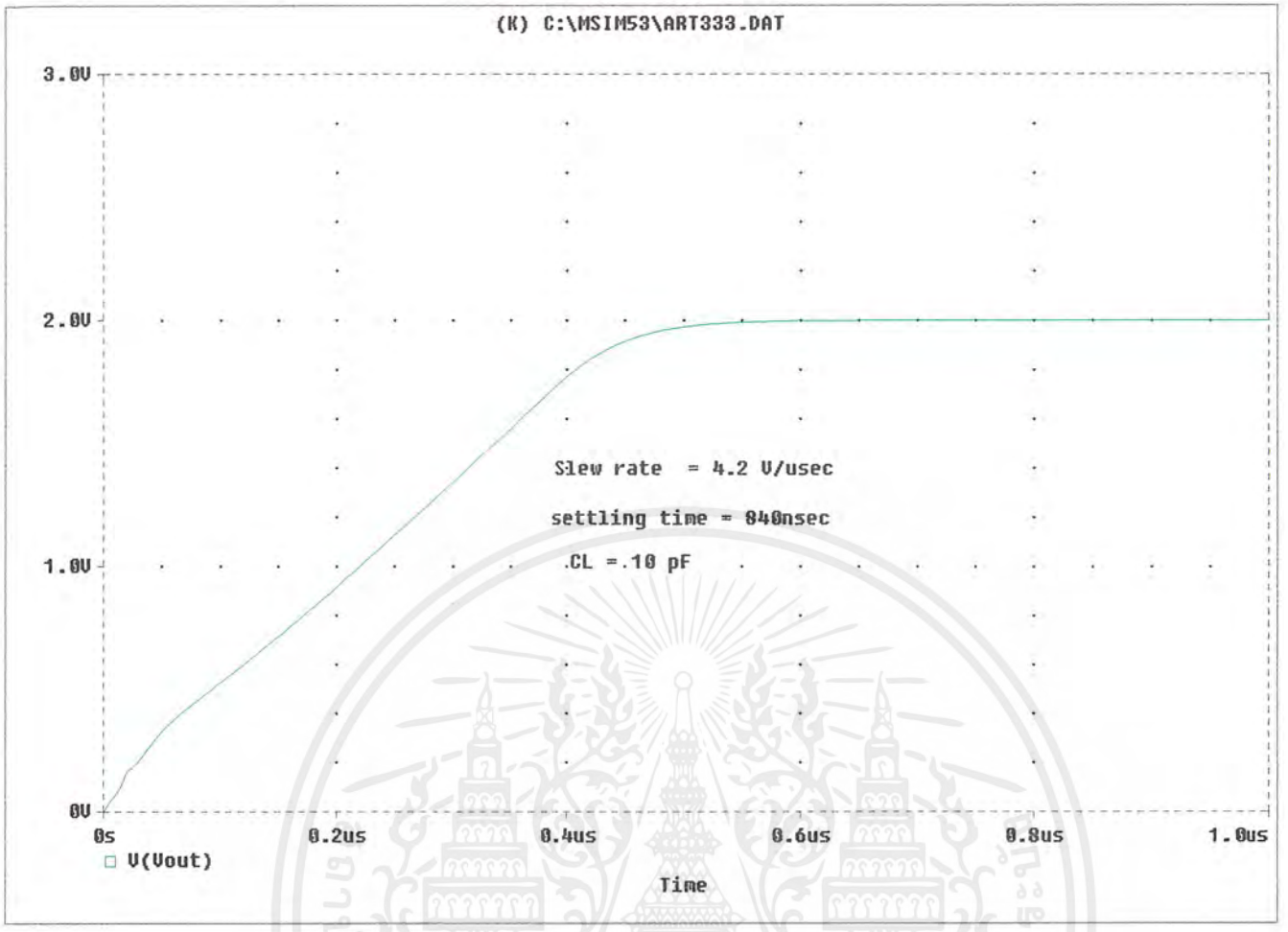
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

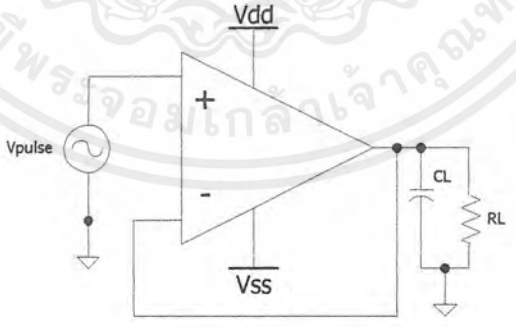




การทดลองหาค่าอินพุทคอมมอนโหมด

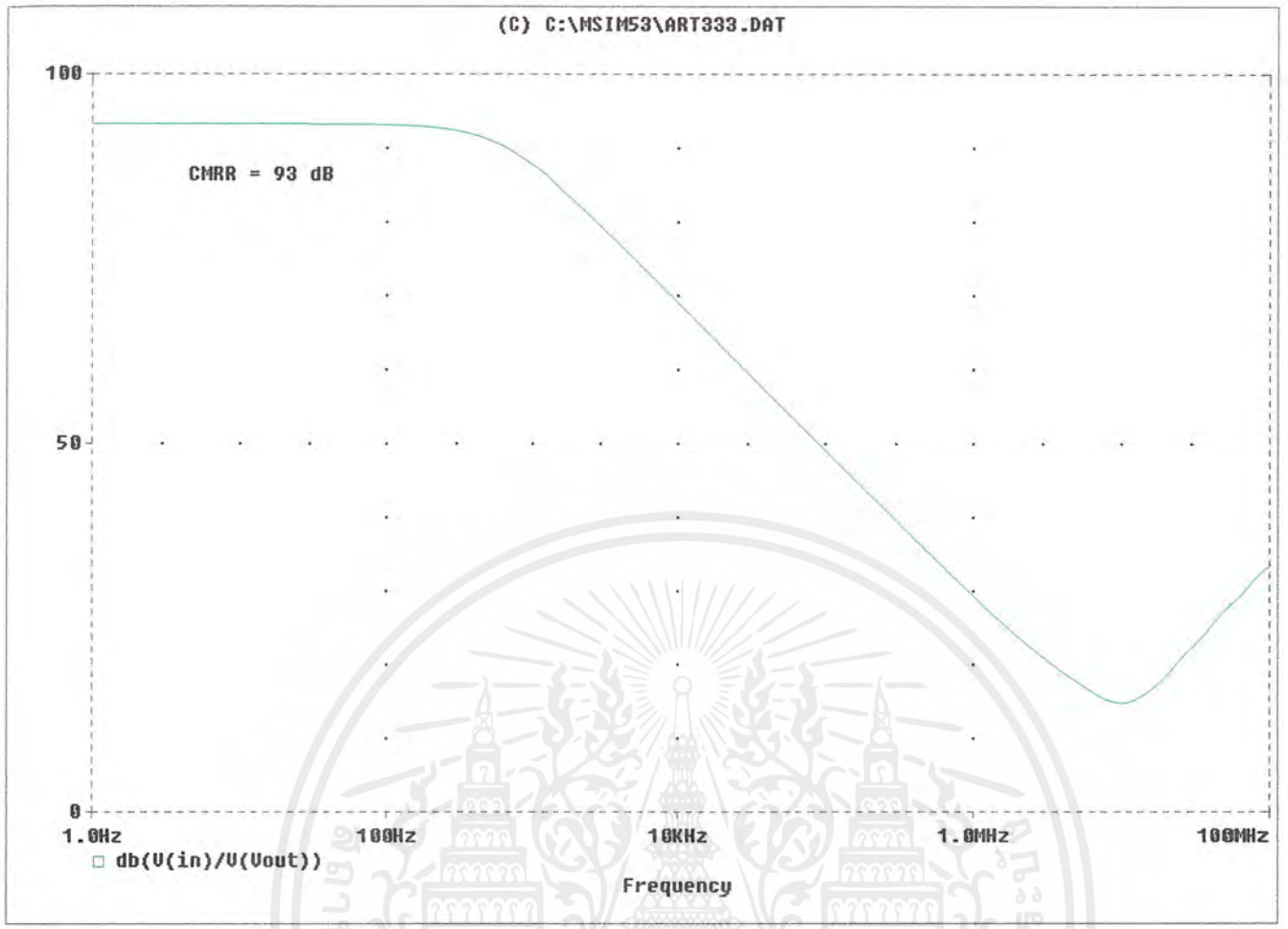
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

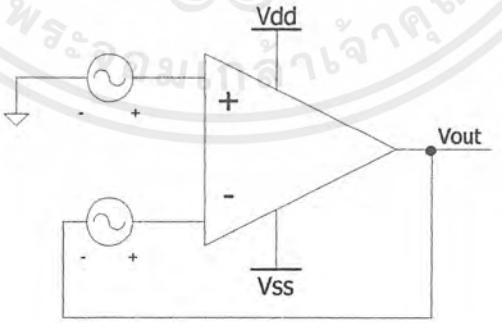




การทดลองหาค่าสลูว์เรทและเซ็ททลิ่งไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





การทดลองหาค่าอัตราคอมมอนดหมดรีเจ็คชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.การทดลองหาค่า

slew rate = 4.2 v/usec

settling time = 840 nsec

6.การทดลองหาค่า PSRR

PSRR (+) = 117.4 dB

PSRR (-) = 110.8 dB

7.การทดลองหาค่า Phase Margin = 83 $^{\circ}$

8.การทดลองหาค่า CMRR = 93 dB

ตารางผลการทดลองวงจรโฟลด์คาสโคด

Parameter	การทดลอง	Specification	หน่วย
Gain	110.8	>70	dB
GB	3.35	3	MHz
I/P CMR	+5,-4	3.2,-5	V
CL	10	10	pF
SR	4.2	5	v/μsec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

O/P Swing	-3.7,3.78	4.-4	v
PSRR	110.83	-	dB
CMRR	93	-	dB

ตารางที่ 7.1

7.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์วงจรแรงดันต่ำแบบเรลทูเรล

ออกแบบให้วงจรมีค่าต่างๆดังนี้

1. GB = 1MHz 2. $V_{DD} = -V_{SS} = 2.5v$ 3. เฟสมาร์จิ้น > 60 องศา

4.เวลาเซ็ททลิ่ง (ที่โหลดคาปาซิเตอร์ 10 พิโคฟาหรัด และความต้านทาน 1 กิโลโอมห์) <1.2μsec

5. SR = 5v/μsec 6.Gain>65dB 7.ค่าน้อยส์ 200nV ที่100 เฮิรตซ์และ 30nV ที่10 กิโลเฮิรตซ์

8. เอาท์พุทสวิง $= \pm 1$ V. 9. channel length = 1 μm

วิธีการออกแบบ

<u>ส่วนภาคอินพุท</u>

1.หาค่า Gm_i โดยมีค่าเท่ากับ $GB \times C_L$

2.หาขนาดของ M1 จากค่า $gm_1 = \frac{Gm_i}{2}$ โดย $S_1 = \frac{(gm_1)^2}{2KI_{D1}}$,

$(S_1 = S_2 = S_{13} = S_{14} = 2S_3 = 2S_4 = 2S_{18} = 2S_{19})$

3.หาค่า $V_{GS1} = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{KS_1}} + V_t$ เพื่อนำไปหาค่า $V_{Db3(sat)}$

4. $V_{Db3(sat)} = V_{DD} - Vin_{max} - V_{GS1}$

5.นำค่า $V_{Db3(sat)}$ ไปหาขนาด M_{b3} โดย $S_{b3} = \frac{2I_{Db3}}{K \times V_{D33(sat)}}$,$(S_{b3} = S_{b4} = 2S_{b5} = 2S_{b6})$

<u>ส่วนวงจรสะท้อนกระแส</u>

1.หาขนาดของ M_{22} โดยวิธีเดียวกับการหาขนาดของ M_{b3},$(S_{22} = S_{21} = 2S_{16} = 2S_{17})$

2.หาขนาดของสวิตช์ M_{15} จาก $S_{15} = \frac{2I_{D15}}{K \times V_{D15(sat)}}$,$(S_{15} = 2S_{20})$

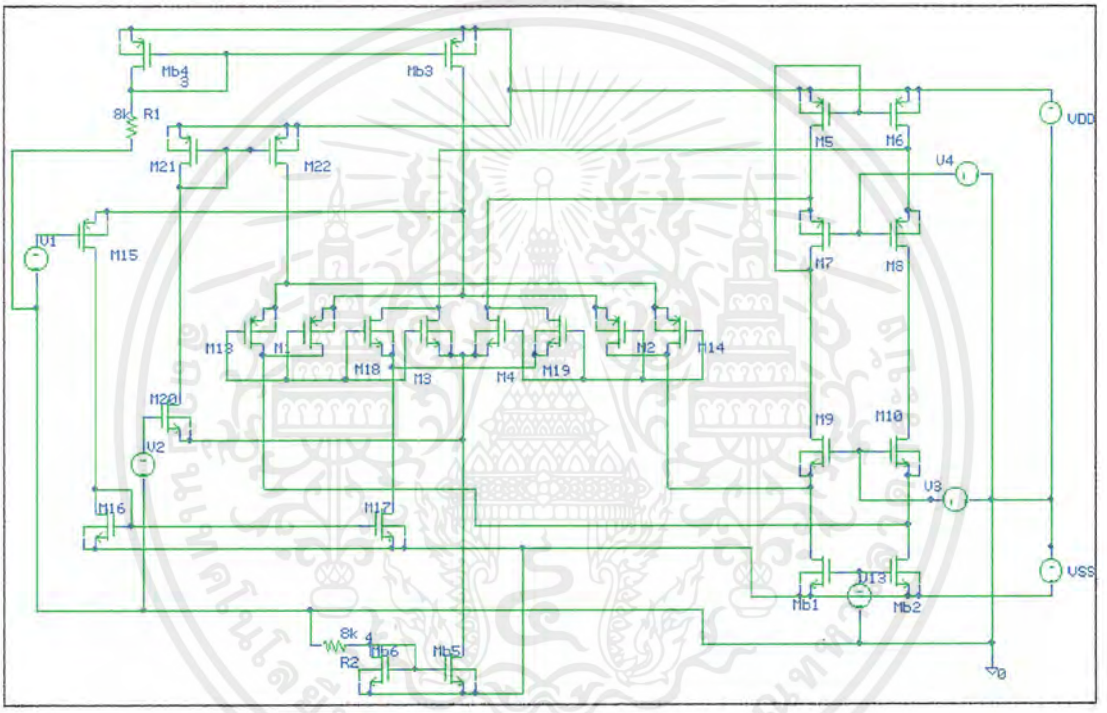
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ส่วนวงจรรวมกระแส</u>

1.หาค่า $V_{DMb1(sat)} = (Vin^{-}_{min}+V_t)-V_{SS}$ นำไปหาขนาดของ M_{b1} โดย $S_{b1} = \frac{2I_{Db1}}{K \times V_{Db1(sat)}}$,

$(S_{b1} = S_{b2} = 2S_5 = 2S_6)$

2.หาขนาดของ M_9 โดย $S_9 = \frac{2I_{D9}}{K \times V_{D9(sat)}}$,$(S_9 = S_{10} = 2S_7 = 2S_8)$



รูปที่ 7.3 วงจรแรงดันต่ำแบบเรลทูเรลที่ใช้ในการออกแบบ

<u>ส่วนวงจรไบอัสกระแสคงที่</u>

1.กำหนดค่าแรงดันเกท-ซอส เพื่อหาขนาดของM111โดย

$S_{111} = \frac{2I_{111}}{K(V_{Dsat})^2}$,$(2S_{111} = 2S_{666} = S333 = S_{444})$

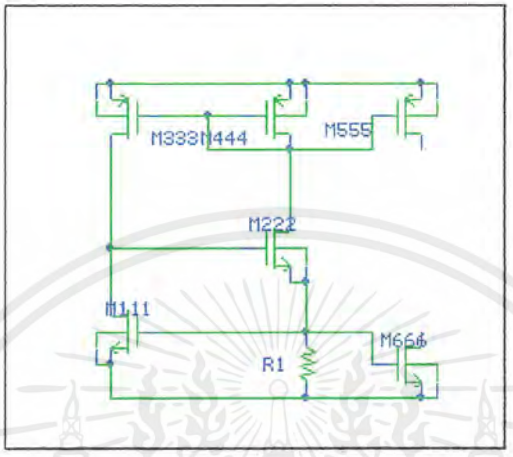
2.หาค่าความต้านทานอ้างอิงจาก

$IR = V_{GS1} \quad \therefore R = \frac{V_{GS1}}{I_1}$

3.หาขนาดของ S_{222} จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{222} = \frac{2I_{222}}{K(V_{Dsat})^2}$$



รูปที่ 7.4 วงจรจ่ายกระแส

<u>ภาคเอาท์พุท</u>

1.หาขนาดของ S_{500} โดย $S_{500} = \frac{2I_{max}}{K(V_{D500sat})^2}$

จากนั้นหาค่าแรงดันเกทซอส ของ S_{500} ขณะนำกระแสด้วยค่าไอเดิ้ล(Idling current)โดย

$$V_{GS} = \frac{2I_{idle}}{KS_{500}} + V_t$$

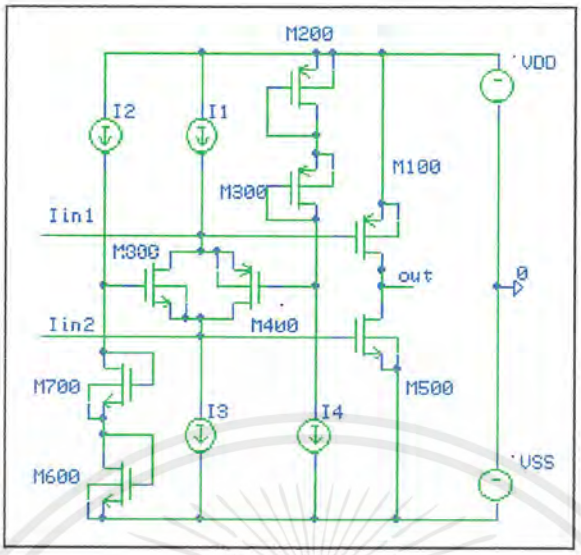
2.จากความสัมพันธ์ $V_{GS500} = V_{GS600}$ จะได้ว่า $I_q = \frac{S_5}{S_6} I_6$ นำมาหาค่าขนาด S_6

3. จากความสัมพันธ์ $V_{GS500} + V_{GS800} = V_{GS600} + V_{GS700}$ จะได้ว่า $\frac{I_{700}}{I_{800}} = \frac{S_{700}}{S_{800}}$

นำค่าอัตราส่วนไปหาค่าขนาด S_{700} และ S_{800}

$(2S_{500} = S_{100}, 2S_{800} = S_{400}, 2S_{700} = S_{300}, 2S_{600} = S_{200})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 วงจรภาคเอาท์พุท

การจำลองโดยโปรแกรม

ผลการทดลอง โดยโปรแกรม P-Spice(LEVEL = 3)

1.การทดลองหาค่าแรงดันอินพุทออฟเซ็ท

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(1)	1.1263	(2)	-1.1245	(3)	.8323	(4)	-.8013
(555)	.8162	(666)	1.3935	(888)	-1.3934	(999)	-1.1612

(offset) 514.3E-06

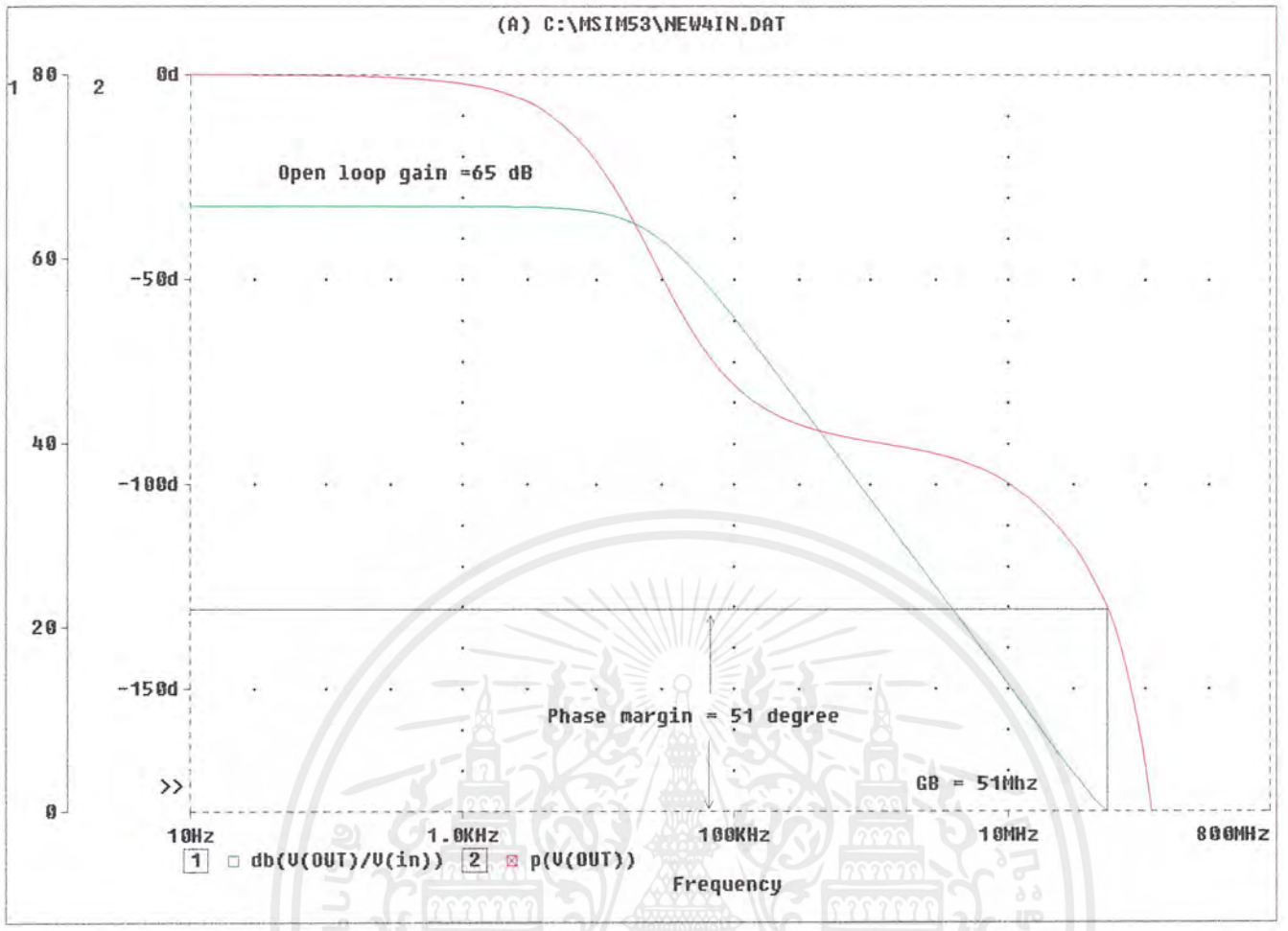
2.การทดลองหาค่า Unity gain frequency = 51MHz

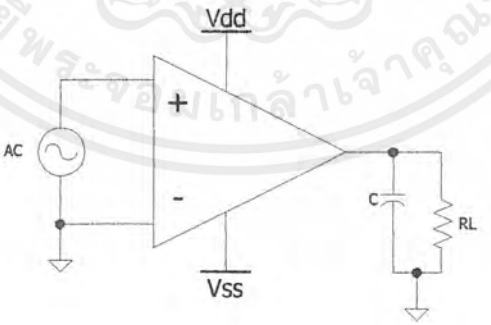
3.การทดลองหาค่า Open loop gain = 65 dB

4.การทดลองหาค่า Input CMR = 2.4V,-2.2V

5. การทดลองหาค่าเอาท์พุทโวลเตจสวิง = 2.4V,-2.2V

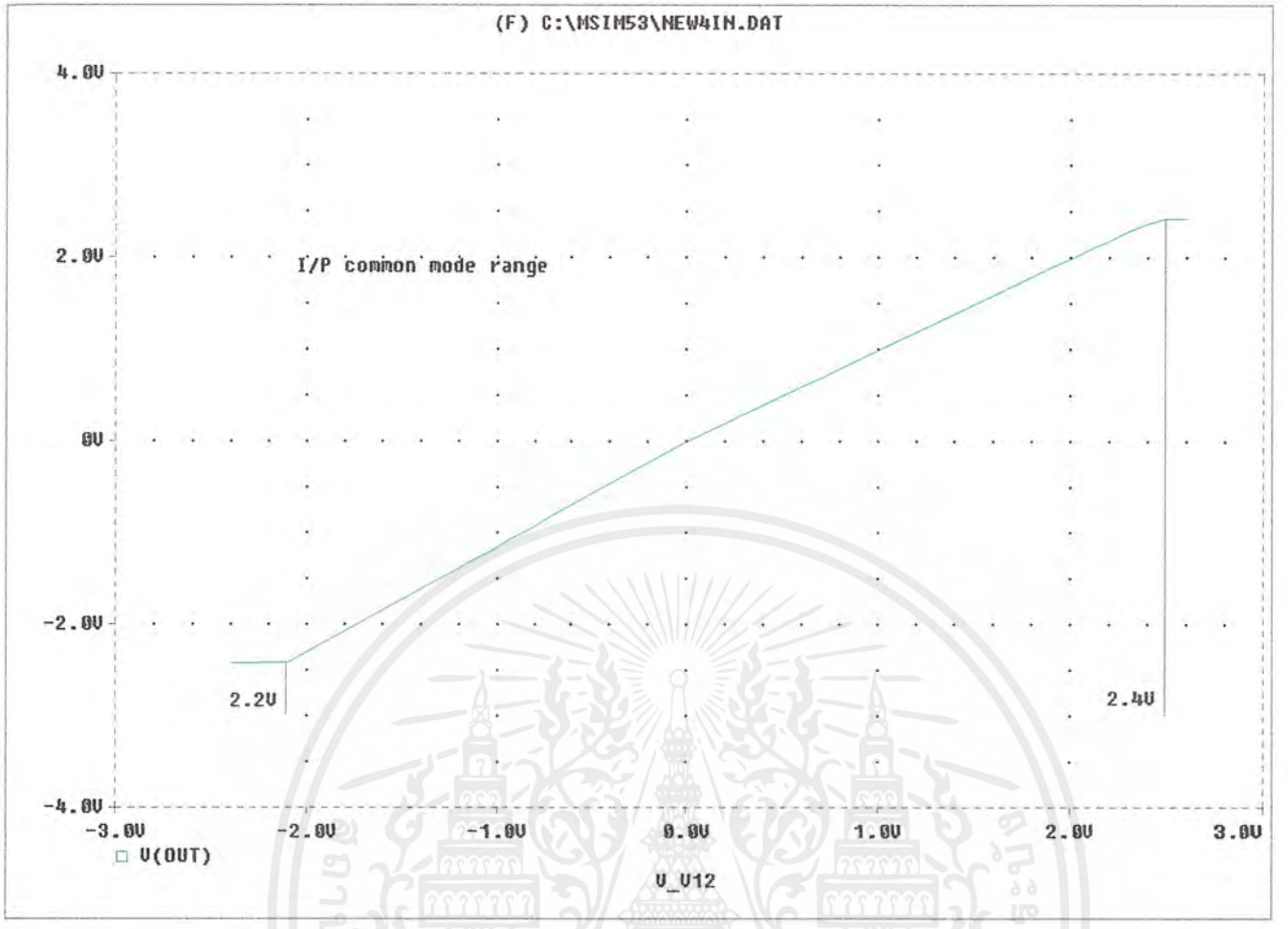
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

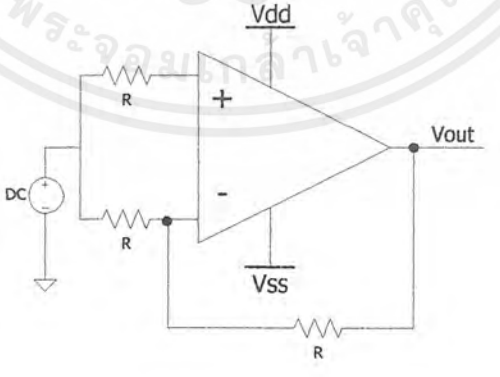




การทดลองหาค่าอัตราการขยายโอเพ่นลูปและเฟสมาร์จิ้น

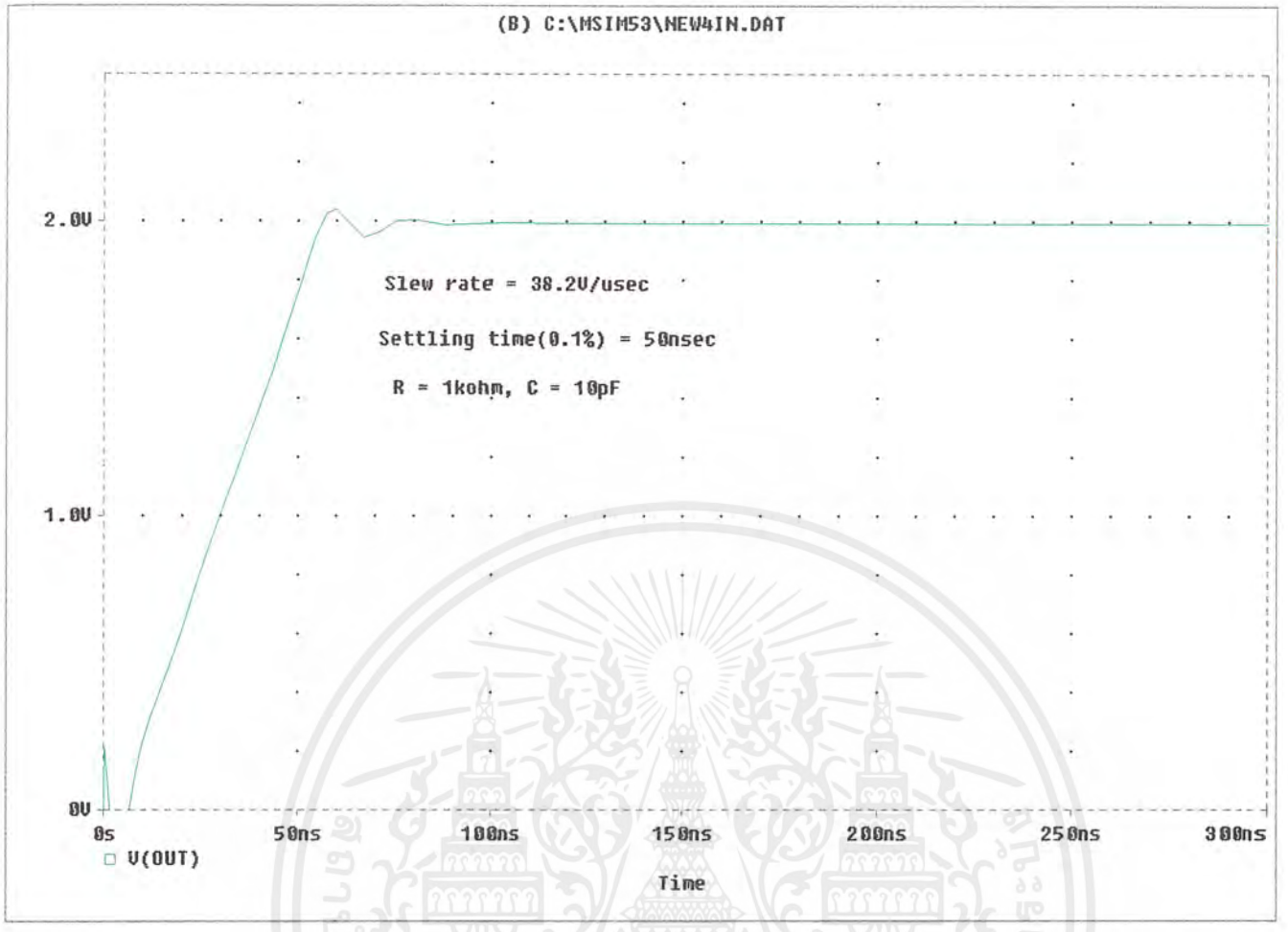
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

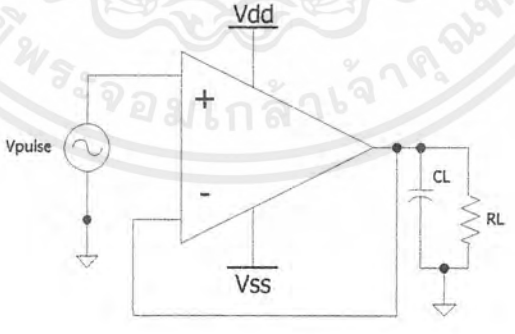




การทดลองหาค่าอินพุทคอมมอนโหมด

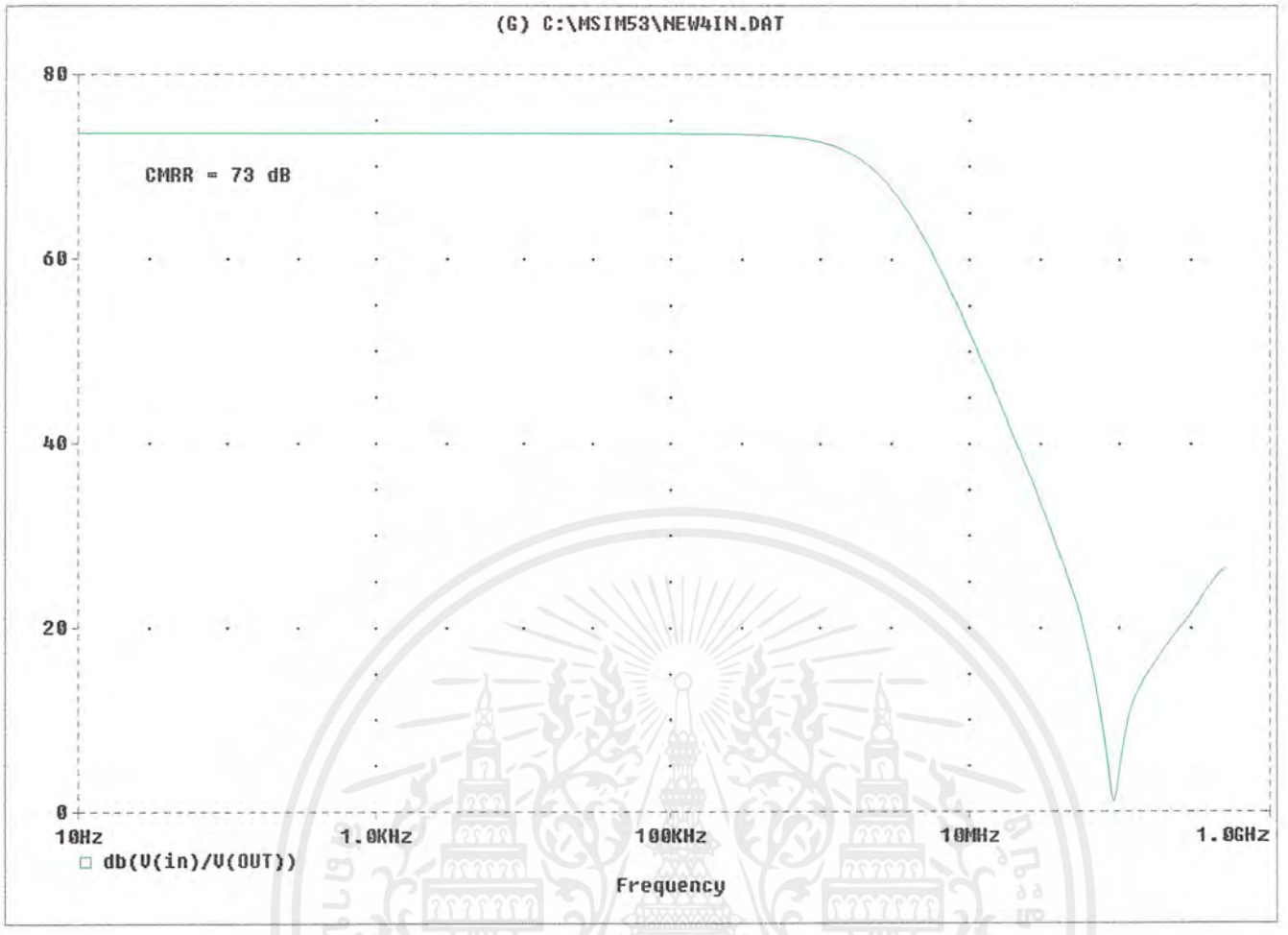
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

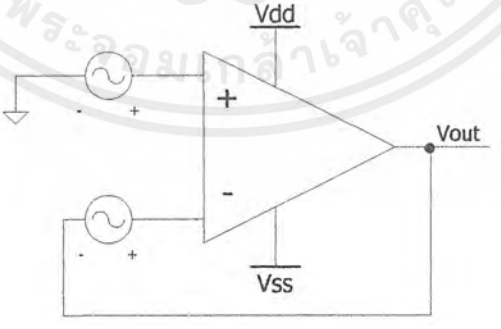




การทดลองหาค่าสลูว์เรทและเซ็ททลิ่งไทม์

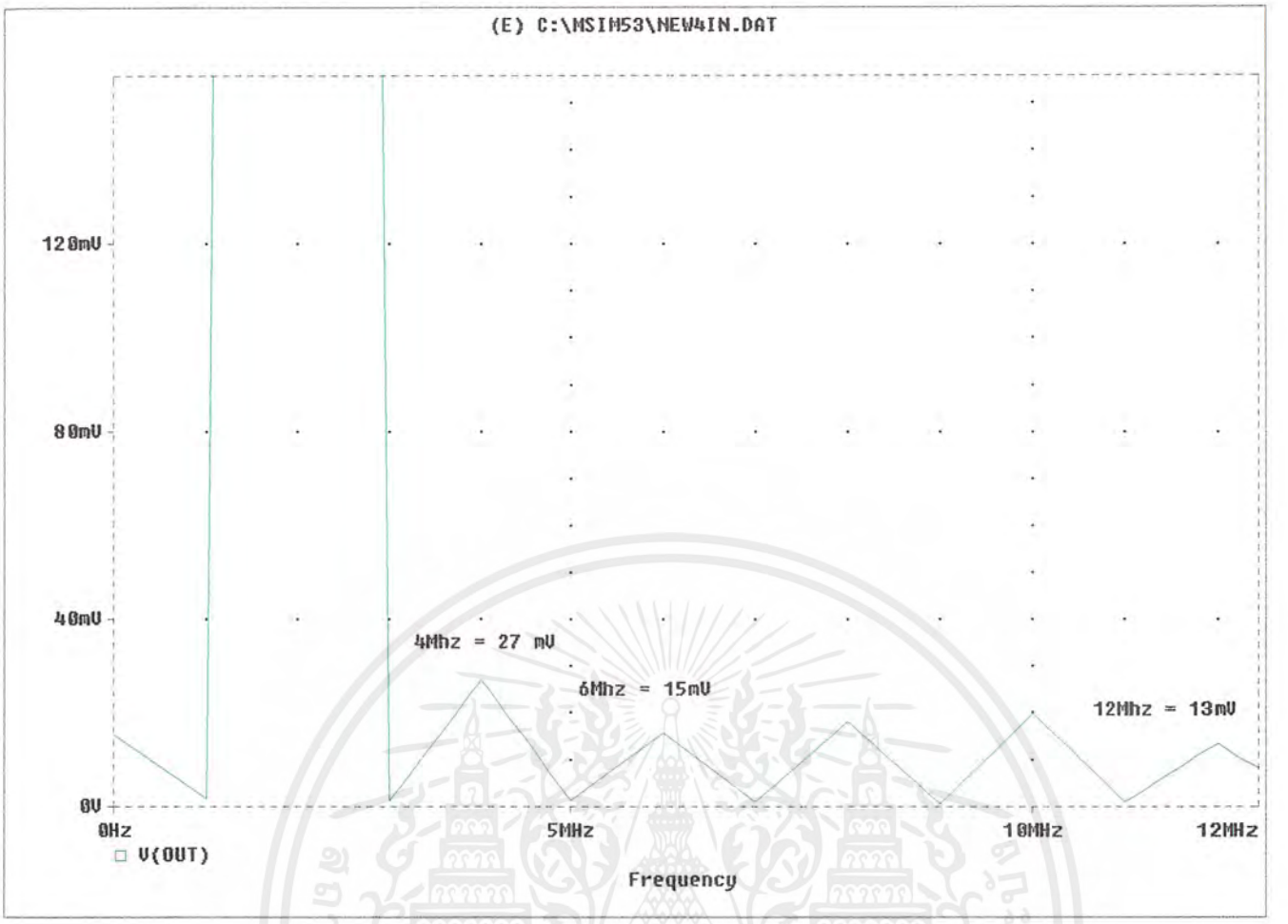
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

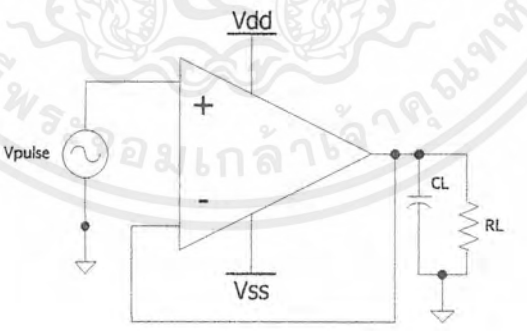




การทดลองหาค่าอัตราคอมมอนดหมดรีเจ็คชั่น

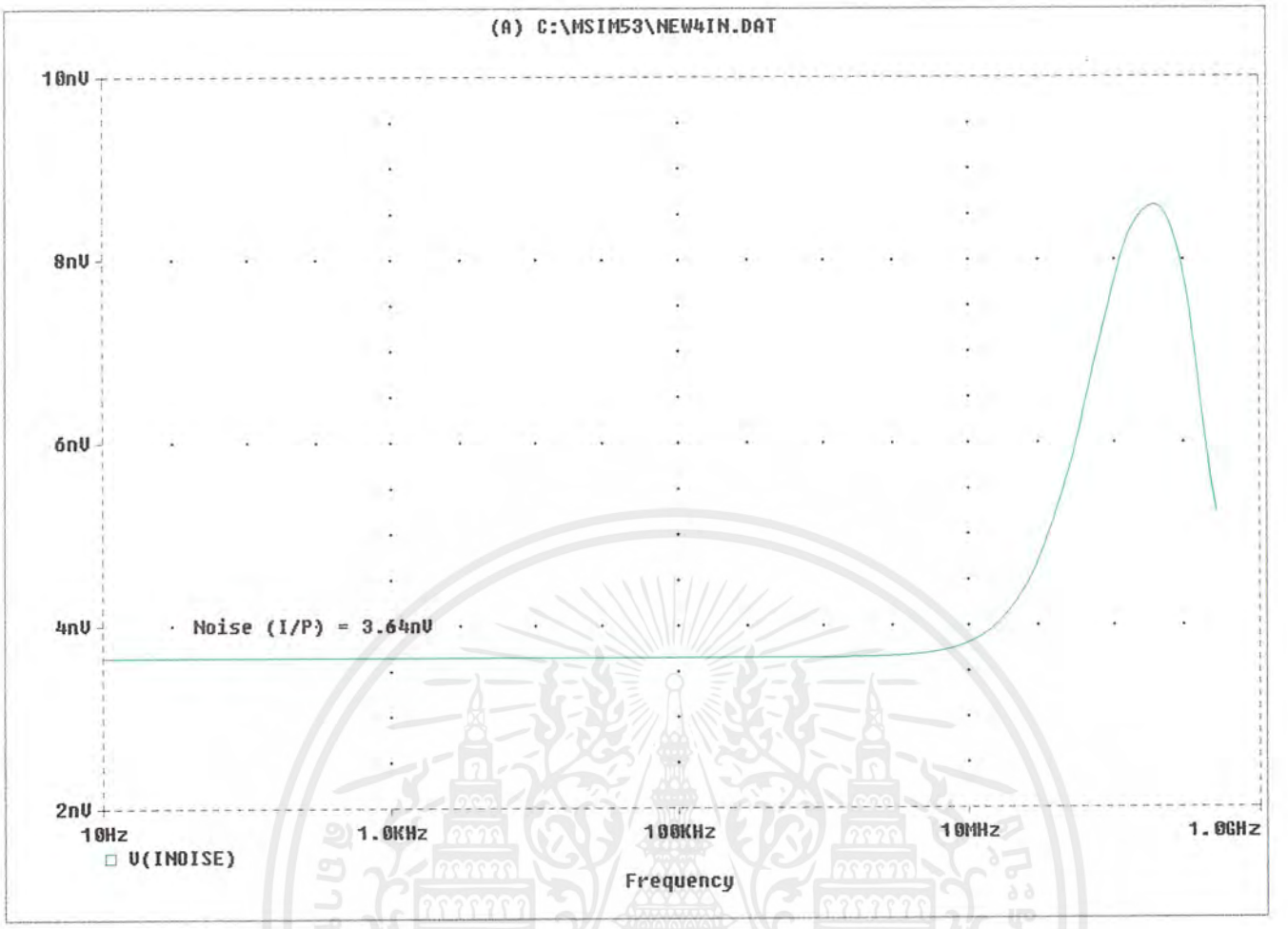
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

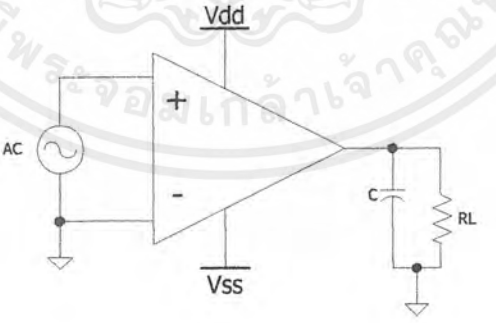




การทดลองหาค่าฮาร์โมนิคส์ดิสทอร์ชั่น

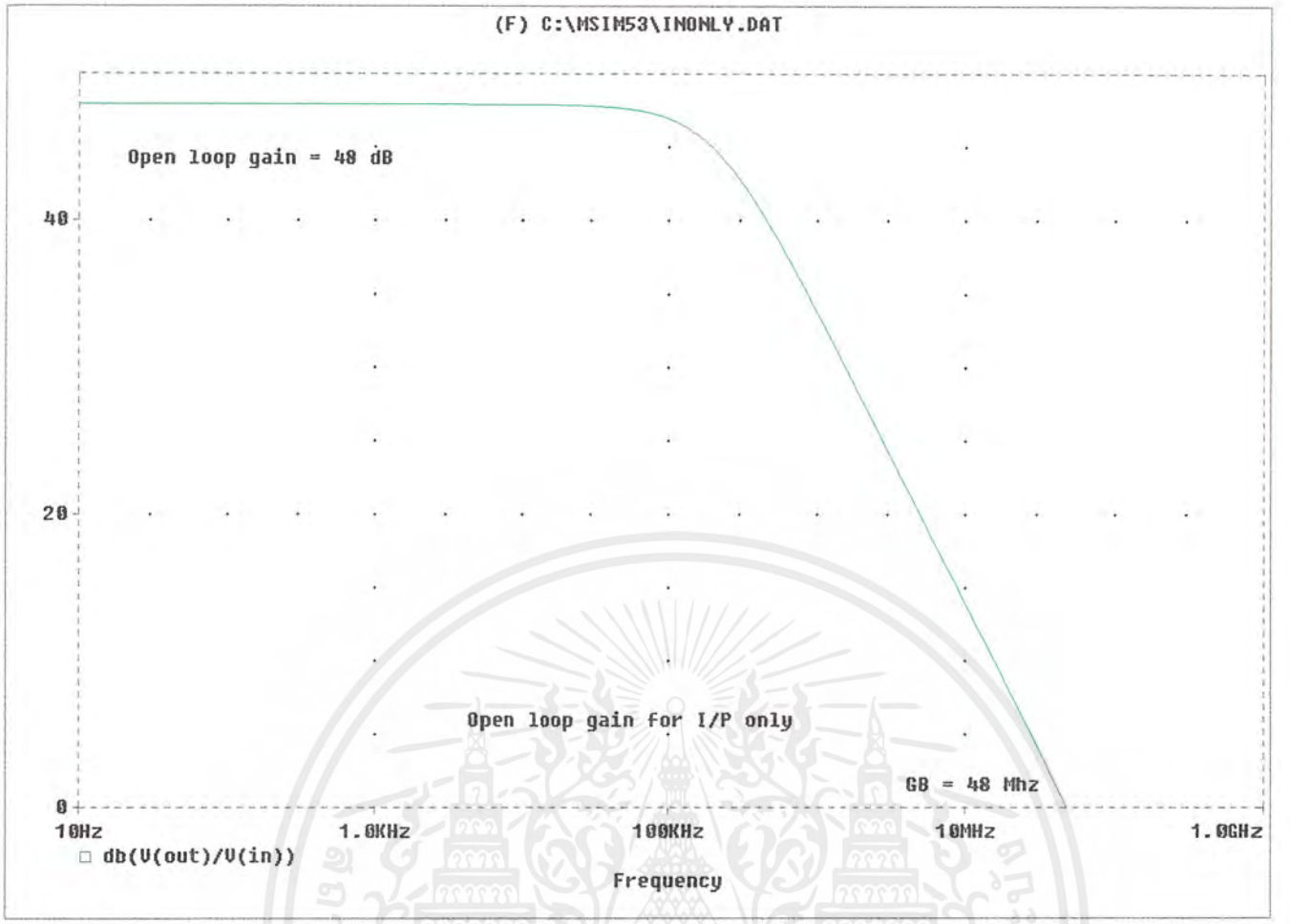
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

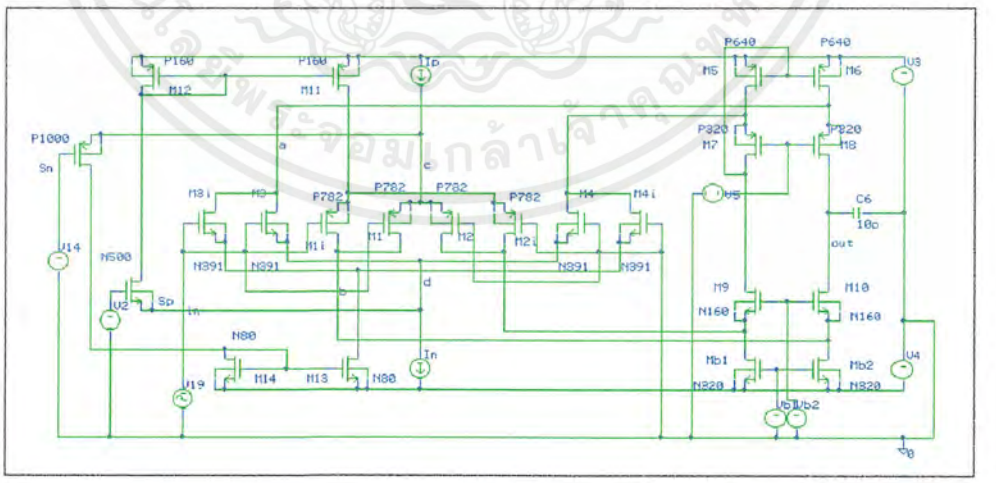




การทดลองหาค่าน้อยซ์ทางอินพุท

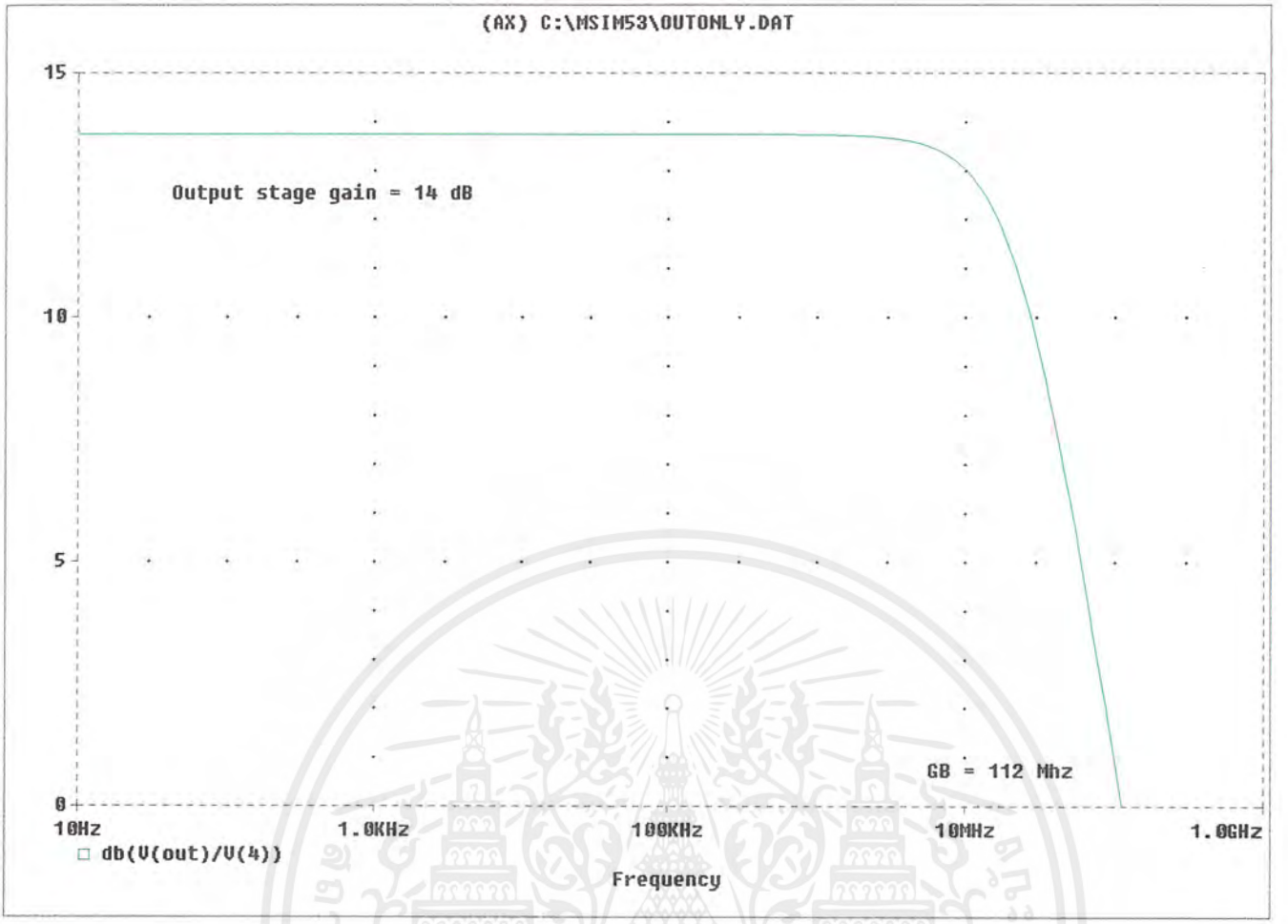
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

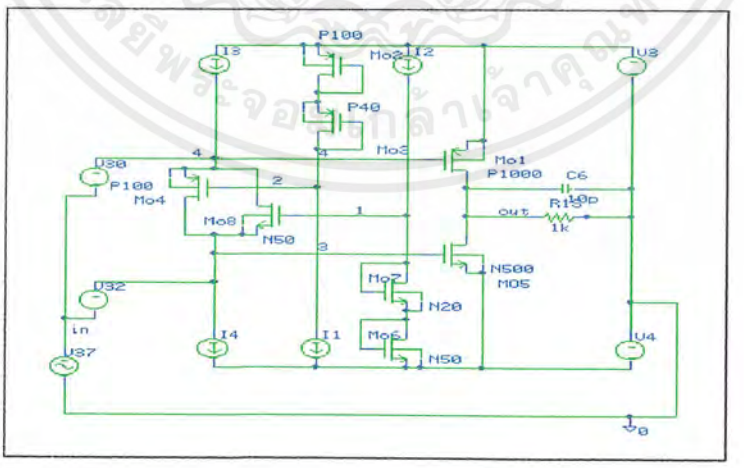




การทดลองหาค่าโอเพ่นลูปเกนภาคอินพุทเพียงอย่างเดียว

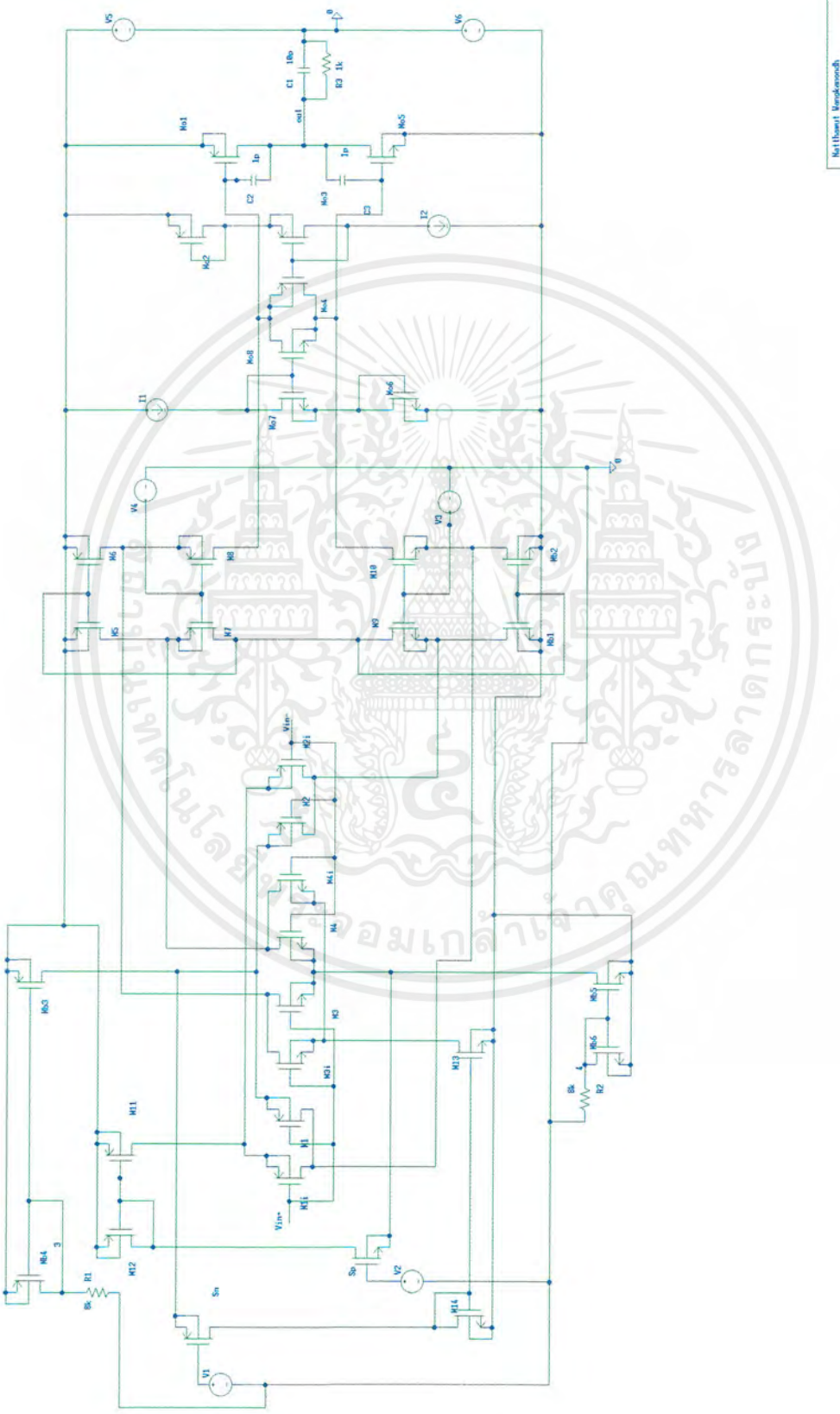
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





การทดลองหาค่าอัตราการขยายภาคเอาท์พุทอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.การทดลองหาค่า

slew rate = 38.2 v/usec

settling time = 50 nsec (0.1%)

7.การทดลองหาค่า Phase Margin = 51 °

8.การทดลองหาค่า CMRR = 73 dB

9.การทดลองหาค่า THD = 7.3%

10. การทดลองหาค่าน้อยส์

อินพุท = 3.64 nV/$\sqrt{Hz}$

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+06	1.880E+00	1.000E+00	-2.042E+01	0.000E+00
2	1.000E+07	1.111E-01	5.910E-02	1.953E+01	3.996E+01
3	1.500E+07	7.484E-02	3.982E-02	1.467E+02	1.671E+02
4	2.000E+07	2.086E-02	1.110E-02	1.770E+02	1.974E+02
5	2.500E+07	2.373E-02	1.263E-02	-1.222E+01	8.208E+00

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 7.321617E+00 PERCENT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองวงจรแรงดันต่ำ

พารามิเตอร์	การทดลอง	สเป็คซิฟิเคชั่น	หน่วย
อินพุทออฟเซ็ท	514	-	μVolt
เกนแบนด์วิดท์	51	1	Mhz
อัตราขยายเปิดวงจร	65	60	dB
อินพุทคอมมอนโหมด	2.4 , -2.2	-	Volt
เอาท์พุทสวิง	2.4 , -2.2	±1	Volt
สลูว์เรท	38.2	5	Volt/μsec
เวลาเซ็ทติ่ง	50n	1.2μ	sec
เฟสมาร์จิ้น	51	60	degree
CMRR	73	-	dB
THD	7.3	-	%
น้อยซ์	3.64n	200n	Volt/$\sqrt{Hz}$

ตารางที่7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

วงจรโฟลด์คาสโคดเป็นวงจรประยุกต์มาจาก วงจรขยายความแตกต่างแบบแอคทีฟโหลด ซึ่งมีข้อเสียคือสัญญาณแบบคอมมอนโหมดมีค่าได้ไม่สูง และความต้านทานเอาท์พุทมีค่าไม่สูงมาก แก้ไขโดยการใช้วงจรแบบคาสโคด ซึ่งมีปัญหาตามมาคือเอาท์พุทสวิงมีค่าจำกัดด้วยค่าแรงดันอิ่มตัวที่ซ้อนกันอยู่ วงจรโฟลด์คาสโคดสามารถแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้มีความต้านทานเอาท์พุทสูง และอินพุทคอมมอนโหมดสามารถมีค่ามากได้ถึงเรลใดเรลหนึ่ง

สำหรับวงจรแรงดันต่ำข้อสำคัญคือควรมีความสามารถรับสัญญาณคอมมอนโหมดได้สูงๆ เพราะว่าสัญญาณที่มีขนาดเล็กจะมีปัญหาของการรบกวนจากน้อยส์ได้ง่าย วงจรจึงควรมีความสามารถรองรับสัญญาณได้สูงๆ นั่นคือความสามารถของวงจรแบบเรลทูเรลจะเหมาะสมกับงานประเภทนี้

วงจรแบบเรลทูเรลมีลักษณะเฉพาะเป็นการปรับปรุงจากวงจรโฟลด์คาสโคดที่สามารถรับสัญญาณสูงได้ถึงเพียงเรลเดียว โดยการขนานอินพุทเข้าไปรองรับสัญญาณอีกเรลหนึ่ง แต่วงจรเรลทูเรลมีปัญหาเรื่องความไม่คงที่ของค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ ดังนั้นจะต้องมีวงจรเฉพาะอีกสำหรับควบคุมค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงของสัญญาณ วงจรควบคุมมีด้วยกันหลายชนิด สามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสม ปัญหาอีกประการหนึ่งของวงจรโฟลด์คาสโคดและวงจรแบบเรลทูเรลที่เหมือนกันคือ ไม่สามารถรองรับโหลดความต้านทานได้ โดยปกติวงจรทั้งสองชนิดจะเหมาะกับโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์ ลักษณะเป็นแบบคอมเพนเสทโดยอัตโนมัติเนื่องจากมีจุดที่มีความต้านทานสูงเพียงจุดเดียว ดังนั้นหากต้องการใช้โหลดที่เป็นความต้านทานจึงจำเป็นต้องมีวงจรภาคเอาท์พุทเป็นตัวขับกระแส ผลเสียก็คือจะเกิดโพลขึ้นได้อีกหนึ่งจุดซึ่งอาจสร้างปัญหาการฟีดแบ็กได้

จากการทดลองผลส่วนใหญ่มีค่าที่ได้ตามต้องการ สำหรับพารามิเตอร์บางตัวจะได้ค่าไม่ได้ตามที่ตั้งไว้คือ เฟสมาร์จิ้นซึ่งแก้ปัญหาได้โดยการจัดการชดเชยความถี่ที่เหมาะสมให้กับวงจร ปัญหาที่พบส่วนใหญ่เกิดจากความเข้าใจในวงจรมีน้อย ใช้เวลาศึกษานาน ซึ่งวงจรที่มีลักษณะต่างกันก็มีแนวคิดต่างกัน นอกจากนี้การทดลองในระดับ 3 ต้องการค่าแบบจำลองมากกว่าที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดการผิดพลาดจากการคำนวน ปัญหาอีกประการก็คือโปรแกรมที่ใช้มักมีปัญหาการลู่เข้าของผลลัพธ์ทำให้เสียเวลาในการหาค่าที่เหมาะสมที่จะทำให้มีผลลัพธ์ออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลการรันโปรแกรมหาค่าไบอัสวงจรออปแอมป์แบบโฟลด์คาสโคด

MOSFET MODEL PARAMETERS

P710	P800	N100	N50	
PMOS	PMOS	NMOS	NMOS	
LEVEL	1	1	1	1
TPG	0	0	0	0
L	10.000000E-06	10.000000E-06	10.000000E-06	10.000000E-06
W	710.000000E-06	800.000000E-06	156.000000E-06	41.000000E-06
LD	1.200000E-06	1.200000E-06	1.200000E-06	1.200000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	-1	-1	1	1
KP	10.000000E-06	10.000000E-06	20.000000E-06	20.000000E-06
GAMMA	.4	.4	.4	.4
PHI	.65	.61218	.65	.65
LAMBDA	.01	.01	.01	10.000000E-06
RD	2	2	2	2
RS	2	2	2	2
RG	2	2	2	2
PBSW	.8	.8	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06	227.745700E-06	227.745700E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15	5.000000E+15	5.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	P350	P10
PMOS	PMOS	
LEVEL	1	1
TPG	0	0
L	10.000000E-06	10.000000E-06
W	350.000000E-06	10.000000E-06
LD	1.200000E-06	1.200000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	-1	-1
KP	10.000000E-06	10.000000E-06
GAMMA	.4	.4
PHI	.65	.65
LAMBDA	.01	.01
RD	2	2
RS	2	2
RG	2	2
PBSW	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

(1) -5.0000 (2) -4.5011 (3) -4.0015 (4) -3.5017

(5) -3.0017 (6) -2.5016 (7) -2.0014 (8) -1.5012

(9) -1.0008 (10) -.5004 (11) 5.0000 (Vout) 7.382E-06

(vref) 3.5332 ($N_0001) -3.8380 ($N_0002) 2.5749

($N_0003) 1.2298 ($N_0004) -3.8421

($N_0005) 3.7861 ($N_0006) 3.7888

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME CURRENT

V_V1 -1.506E-04

V_V2 1.002E-04

TOTAL POWER DISSIPATION 1.25E-03 WATTS

OPERATING POINT INFORMATION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOSFETS

NAME	M_M6	M_M1c	M_M2	M_M5	M_M4
MODEL	N50	N100	P710	P350	P800
ID	5.01E-05	2.43E-05	-2.58E-05	-5.16E-05	-2.43E-05
VGS	2.00E+00	1.34E+00	-1.23E+00	-1.47E+00	-1.21E+00
VDS	1.16E+00	6.41E+00	-5.07E+00	-3.77E+00	-1.21E+00
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	1.00E+00	1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00
VDSAT	9.98E-01	3.36E-01	-2.30E-01	-4.67E-01	-2.14E-01
GM	1.00E-04	1.44E-04	2.25E-04	2.21E-04	2.27E-04
GDS	5.01E-10	2.28E-07	2.46E-07	4.97E-07	2.40E-07
GMB	2.49E-05	3.58E-05	5.57E-05	5.49E-05	5.80E-05
CBD	1.00E-19	1.00E-19	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.39E-19	1.39E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	1.58E-14	6.34E-14	2.93E-13	1.44E-13	3.30E-13
CGDOV	1.58E-14	6.34E-14	2.93E-13	1.44E-13	3.30E-13
CGBOV	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15
CGS	6.68E-14	2.68E-13	1.24E-12	6.07E-13	1.39E-12
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

NAME	M_M1	M_M3	M_M4c	M_M3c	M_M2c
MODEL	P710	P800	P800	P800	N100
ID	-2.58E-05	-2.43E-05	-2.43E-05	-2.43E-05	2.43E-05
VGS	-1.23E+00	-1.21E+00	-1.21E+00	-1.21E+00	1.34E+00
VDS	-5.07E+00	-1.21E+00	-3.79E+00	-1.21E+00	3.84E+00
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	1.00E+00
VDSAT	-2.30E-01	-2.14E-01	-2.11E-01	-2.14E-01	3.41E-01
GM	2.25E-04	2.27E-04	2.30E-04	2.27E-04	1.43E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GDS	2.46E-07	2.40E-07	2.34E-07	2.40E-07	2.34E-07
GMB	5.57E-05	5.80E-05	5.88E-05	5.80E-05	3.54E-05
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	1.00E-19
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.39E-19
CGSOV	2.93E-13	3.30E-13	3.30E-13	3.30E-13	6.34E-14
CGDOV	2.93E-13	3.30E-13	3.30E-13	3.30E-13	6.34E-14
CGBOV	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15
CGS	1.24E-12	1.39E-12	1.39E-12	1.39E-12	2.68E-13
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

NAME	M_M7	M_M8	M_M9	M_M10	M_M11
MODEL	N50	P350	P10	P10	P10
ID	5.01E-05	-5.05E-05	-5.10E-13	-5.10E-13	-5.10E-13
VGS	2.00E+00	-1.47E+00	-5.00E-01	-5.00E-01	-5.00E-01
VDS	1.16E+00	-1.47E+00	-5.00E-01	-5.00E-01	-5.00E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00
VDSAT	9.98E-01	-4.67E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
GM	1.00E-04	2.16E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
GDS	5.01E-10	4.97E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
GMB	2.49E-05	5.37E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CBD	1.00E-19	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.39E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	1.58E-14	1.44E-13	2.98E-15	2.98E-15	2.98E-15
CGDOV	1.58E-14	1.44E-13	2.98E-15	2.98E-15	2.98E-15
CGBOV	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CGS	6.68E-14	6.07E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	5.28E-15	5.28E-15	5.28E-15

NAME	M_M12	M_M13	M_M14	M_M15	M_M16
MODEL	P10	P10	P10	P10	P10
ID	-5.10E-13	-5.10E-13	-5.10E-13	-5.10E-13	-5.10E-13
VGS	-5.00E-01	-5.00E-01	-5.00E-01	-5.00E-01	-5.00E-01
VDS	-5.00E-01	-5.00E-01	-5.00E-01	-5.00E-01	-5.00E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00
VDSAT	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
GM	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
GDS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
GMB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	2.98E-15	2.98E-15	2.98E-15	2.98E-15	2.98E-15
CGDOV	2.98E-15	2.98E-15	2.98E-15	2.98E-15	2.98E-15
CGBOV	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15	1.22E-15
CGS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	5.28E-15	5.28E-15	5.28E-15	5.28E-15	5.28E-15

NAME	M_M17	M_M118
MODEL	P10	P10
ID	-5.10E-13	-5.09E-13
VGS	-5.00E-01	-4.99E-01
VDS	-5.00E-01	-4.99E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VTH	-1.00E+00	-1.00E+00
VDSAT	0.00E+00	0.00E+00
GM	0.00E+00	0.00E+00
GDS	0.00E+00	0.00E+00
GMB	0.00E+00	0.00E+00
CBD	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	2.98E-15	2.98E-15
CGDOV	2.98E-15	2.98E-15
CGBOV	1.22E-15	1.22E-15
CGS	0.00E+00	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00
CGB	5.28E-15	5.28E-15

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 2.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการรันโปรแกรมหาค่าไบอัสวงจรออปแอมป์แรงดันต่ำแบบเรลทูเรล

MOSFET MODEL PARAMETERS

	P782	P160	P320	P640
	PMOS	PMOS	PMOS	PMOS
LEVEL	3	3	3	3
TPG	0	0	0	0
L	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06
W	782.000000E-06	160.000000E-06	640.000000E-06	640.000000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	-.8	-.8	-.8	-.8
KP	10.000000E-06	10.000000E-06	10.000000E-06	10.000000E-06
GAMMA	.4	.4	.4	.4
PHI	.65	.65	.65	.65
LAMBDA	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15
RD	2	2	2	2
RG	2	2	2	2
PBSW	.8	.8	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P1000	P40	P100	N391
PMOS	PMOS	PMOS	NMOS
LEVEL 3	3	3	3
TPG 0	0	0	0
L 1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06
W 1.000000E-03	40.000000E-06	100.000000E-06	391.000000E-06
WD 1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO -.8	-.8	-.8	.8
KP 10.000000E-06	10.000000E-06	10.000000E-06	20.000000E-06
GAMMA .4	.4	.4	.4
PHI .65	.65	.65	.65
LAMBDA 646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15
RD 2	2	2	2
RG 2	2	2	2
PBSW .8	.8	.8	.8
CJ 144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06
TT 80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO 414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO 414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO 161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB 2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX 100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N80	N320	N160	N500	
NMOS	NMOS	NMOS	NMOS	
LEVEL	3	3	3	3
TPG	0	0	0	0
L	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06
W	80.000000E-06	320.000000E-06	320.000000E-06	500.000000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	.8	.8	.8	.8
KP	20.000000E-06	20.000000E-06	20.000000E-06	20.000000E-06
GAMMA	.4	.4	.4	.4
PHI	.65	.65	.65	.65
LAMBDA	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15
RD	2	2	2	2
RG	2	2	2	2
PBSW	.8	.8	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N20	N50	
NMOS	NMOS	
LEVEL	3	3
TPG	0	0
L	1.000000E-06	1.000000E-06
W	20.000000E-06	50.000000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	.8	.8
KP	20.000000E-06	20.000000E-06
GAMMA	.4	.4
PHI	.65	.65
LAMBDA	646.578700E-15	646.578700E-15
RD	2	2
RG	2	2
PBSW	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**** 04/18/100 11:54:16 ******** PSpice 5.3 (Jan 1993) ******** ID# 75225 ****

* C:\MSIM53\NEW4IN.SCH

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

(1) -.4244 (3) -1.1786 (4) 1.6249 (OUT) -1.5381

($N_0001) .9133 ($N_0002) -1.6539

($N_0003) .8000 ($N_0004) -1.5977

($N_0005) 1.7000 ($N_0006) 2.5000

($N_0007) 1.1000 ($N_0008) -1.7000

($N_0009) 1.4474 ($N_0010) 1.6741

($N_0011) .6500 ($N_0012) 1.7288

($N_0013) .4384 ($N_0014) 1.5234

($N_0015) -.9127 ($N_0016) -.5364

($N_0017) -1.1000 ($N_0018) -2.5000

($N_0019) -.6500 ($N_0020) -1.4500

($N_0021) -1.5208

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME CURRENT

V_V1 0.000E+00

V_V2 0.000E+00

V_V3 -8.087E-04

V_V4 -2.347E-03

V_Vb2 0.000E+00

V_Vb1 0.000E+00

V_V5 0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 7.89E-03 WATTS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**** 04/18/100 11:54:16 ******** PSpice 5.3 (Jan 1993) ******** ID# 75225 ****

* C:\MSIM53\NEW4IN.SCH

**** OPERATING POINT INFORMATION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

**** MOSFETS

NAME	M_M1	M_M1i	M_M2	M_M2i	M_M12
MODEL	P782	P782	P782	P782	P160
ID	-1.01E-04	-2.46E-12	-9.94E-05	-2.41E-12	-2.67E-12
VGS	-9.13E-01	-8.00E-01	-9.13E-01	-8.00E-01	-8.00E-01
VDS	-2.57E+00	-2.45E+00	-2.51E+00	-2.40E+00	-8.00E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01
VDSAT	-1.01E-01	0.00E+00	-1.01E-01	0.00E+00	-3.77E-05
GM	1.76E-03	0.00E+00	1.74E-03	0.00E+00	8.75E-08
GDS	2.04E-05	0.00E+00	2.06E-05	0.00E+00	5.50E-13
GMB	4.27E-04	0.00E+00	4.22E-04	0.00E+00	2.17E-08
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	3.23E-13	3.23E-13	3.23E-13	3.23E-13	6.51E-14
CGDOV	3.23E-13	3.23E-13	3.23E-13	3.23E-13	6.51E-14
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	1.79E-13	0.00E+00	1.79E-13	0.00E+00	3.62E-14
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	5.35E-14	0.00E+00	5.35E-14	0.00E+00

NAME	M_M11	M_Sn	M_M5	M_M7	M_M8
MODEL	P160	P40	P640	P320	P320
ID	-4.08E-12	-2.62E-12	-2.51E-04	-1.51E-04	-1.46E-04
VGS	-8.00E-01	1.87E-01	-1.05E+00	-1.02E+00	-1.08E+00
VDS	-1.70E+00	-2.61E+00	-8.26E-01	-2.27E-01	-1.04E-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01
VDSAT	-3.77E-05	0.00E+00	-2.25E-01	-1.99E-01	-2.48E-01
GM	1.12E-07	0.00E+00	1.91E-03	1.19E-03	6.61E-04
GDS	6.15E-13	0.00E+00	8.06E-05	1.76E-04	1.03E-03
GMB	2.77E-08	0.00E+00	4.55E-04	2.86E-04	1.61E-04
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.06E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	6.51E-14	1.54E-14	2.64E-13	2.64E-13	2.64E-13
CGDOV	6.51E-14	1.54E-14	2.64E-13	2.64E-13	2.64E-13
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	3.62E-14	0.00E+00	1.47E-13	1.47E-13	1.12E-13
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.04E-13
CGB	0.00E+00	1.28E-14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

NAME	M_M6	M_Mo1	M_Mo3	M_Mo2	M_Mo4
MODEL	P640	P1000	P40	P100	P100
ID	-2.46E-04	-7.18E-05	-2.00E-05	-2.00E-05	-1.46E-04
VGS	-1.05E+00	-8.75E-01	-1.09E+00	-9.77E-01	-1.19E+00
VDS	-7.71E-01	-4.04E+00	-1.09E+00	-9.77E-01	-2.80E+00
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01
VDSAT	-2.25E-01	-6.68E-02	-2.54E-01	-1.57E-01	-3.44E-01
GM	1.88E-03	1.90E-03	1.35E-04	2.21E-04	7.28E-04
GDS	8.16E-05	9.03E-06	5.87E-06	5.89E-06	2.96E-05
GMB	4.46E-04	4.66E-04	3.19E-05	5.33E-05	1.69E-04
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	2.64E-13	4.13E-13	1.54E-14	4.02E-14	4.02E-14
CGDOV	2.64E-13	4.13E-13	1.54E-14	4.02E-14	4.02E-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	1.47E-13	2.30E-13	8.56E-15	2.24E-14	2.24E-14
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

NAME	M_M3	M_M3i	M_M4	M_Mi	M_Sp
MODEL	N391	N391	N391	N391	N20
ID	1.01E-04	2.28E-12	9.95E-05	2.22E-12	2.62E-12
VGS	9.13E-01	5.36E-01	9.13E-01	5.36E-01	-1.87E-01
VDS	2.64E+00	2.27E+00	2.59E+00	2.21E+00	2.61E+00
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01
VDSAT	1.00E-01	0.00E+00	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00
GM	1.77E-03	0.00E+00	1.75E-03	0.00E+00	0.00E+00
GDS	1.98E-05	0.00E+00	2.00E-05	0.00E+00	0.00E+00
GMB	4.30E-04	0.00E+00	4.25E-04	0.00E+00	0.00E+00
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	1.61E-13	1.61E-13	1.61E-13	1.61E-13	7.12E-15
CGDOV	1.61E-13	1.61E-13	1.61E-13	1.61E-13	7.12E-15
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	8.94E-14	0.00E+00	8.94E-14	0.00E+00	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	3.10E-14	0.00E+00	3.10E-14	5.94E-15

NAME	M_M13	M_M14	M_M9	M_Mb1	M_Mb2
MODEL	N80	N80	N160	N320	N320
ID	4.50E-12	2.65E-12	1.51E-04	2.51E-04	2.46E-04
VGS	8.00E-01	8.00E-01	9.48E-01	1.05E+00	1.05E+00
VDS	1.96E+00	8.00E-01	3.05E+00	9.02E-01	8.46E-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01
VDSAT	3.80E-05	3.80E-05	1.31E-01	2.22E-01	2.22E-01
GM	1.18E-07	8.64E-08	2.02E-03	1.94E-03	1.90E-03
GDS	6.42E-13	5.47E-13	2.60E-05	7.77E-05	7.83E-05
GMB	2.93E-08	2.14E-08	4.90E-04	4.61E-04	4.52E-04
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	3.20E-14	3.20E-14	1.31E-13	1.31E-13	1.31E-13
CGDOV	3.20E-14	3.20E-14	1.31E-13	1.31E-13	1.31E-13
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	1.78E-14	1.78E-14	7.30E-14	7.30E-14	7.30E-14
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

NAME	M_M10	M_Mo8	M_MO5	M_Mo7	M_Mo6
MODEL	N160	N50	N500	N20	N50
ID	1.46E-04	2.81E-12	1.61E-03	2.00E-05	2.00E-05
VGS	1.00E+00	7.54E-01	1.32E+00	1.10E+00	9.79E-01
VDS	4.75E-01	2.80E+00	9.62E-01	1.10E+00	9.79E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01
VDSAT	1.81E-01	0.00E+00	4.64E-01	2.64E-01	1.59E-01
GM	1.38E-03	0.00E+00	5.68E-03	1.30E-04	2.18E-04
GDS	6.01E-05	0.00E+00	5.51E-04	5.87E-06	5.89E-06
GMB	3.30E-04	0.00E+00	1.30E-03	3.06E-05	5.24E-05
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	1.31E-13	1.95E-14	2.06E-13	7.12E-15	1.95E-14
CGDOV	1.31E-13	1.95E-14	2.06E-13	7.12E-15	1.95E-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	7.30E-14	0.00E+00	1.14E-13	3.96E-15	1.09E-14
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	3.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ผลการหาค่าไบอัสภาคอินพุทอย่างเดียว

MOSFET MODEL PARAMETERS

	P782 PMOS	P160 PMOS	P320 PMOS	P640 PMOS
LEVEL	3	3	3	3
TPG	0	0	0	0
L	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06
W	782.000000E-06	160.000000E-06	640.000000E-06	640.000000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	-.8	-.8	-.8	-.8
KP	10.000000E-06	10.000000E-06	10.000000E-06	10.000000E-06
GAMMA	.4	.4	.4	.4
PHI	.65	.65	.65	.65
LAMBDA	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15
RD	2	2	2	2
RG	2	2	2	2
PBSW	.8	.8	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09

	N391 NMOS	N500 NMOS	N80 NMOS	N320 NMOS
LEVEL	3	3	3	3
TPG	0	0	0	0
L	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W	391.000000E-06	500.000000E-06	80.000000E-06	320.000000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	.8	.8	.8	.8
KP	20.000000E-06	20.000000E-06	20.000000E-06	20.000000E-06
GAMMA	.4	.4	.4	.4
PHI	.65	.65	.65	.65
LAMBDA	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15
RD	2	2	2	2
RG	2	2	2	2
PBSW	.8	.8	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09

	N160	P1000
	NMOS	PMOS
LEVEL	3	3
TPG	0	0
L	1.000000E-06	1.000000E-06
W	320.000000E-06	1.000000E-03
WD	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	.8	-.8
KP	20.000000E-06	10.000000E-06
GAMMA	.4	.4
PHI	.65	.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LAMBDA	646.578700E-15	646.578700E-15
RD	2	2
RG	2	2
PBSW	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09

SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(a)	1.6737	(b)	-1.5975	(c)	.9137	(d)	-.9130
(in)	0.0000	(out)	1.4474	($N_0001)	.5818		
($N_0002)	-1.5975			($N_0003)	1.7000		
($N_0004)	2.5000			($N_0005)	1.4474		
($N_0006)	1.6737			($N_0007)	.6500		
($N_0008)	-.5400			($N_0009)	-1.1000		
($N_0010)	-2.5000			($N_0011)	-1.7000		
($N_0012)	-.6500			($N_0013)	-1.4500		
($N_0014)	1.1000						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOTAL POWER DISSIPATION 3.51E-03 WATTS

OPERATING POINT INFORMATION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

**** MOSFETS

NAME	M_M1	M_M1i	M_M2	M_M2i	M_M12
MODEL	P782	P782	P782	P782	P160
ID	-1.00E-04	-2.19E-12	-1.00E-04	-2.19E-12	-2.62E-12
VGS	-9.14E-01	-5.82E-01	-9.14E-01	-5.82E-01	-8.00E-01
VDS	-2.51E+00	-2.18E+00	-2.51E+00	-2.18E+00	-8.00E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01
VDSAT	-1.01E-01	0.00E+00	-1.01E-01	0.00E+00	-3.73E-05
GM	1.74E-03	0.00E+00	1.74E-03	0.00E+00	8.65E-08
GDS	2.07E-05	0.00E+00	2.07E-05	0.00E+00	5.37E-13
GMB	4.24E-04	0.00E+00	4.24E-04	0.00E+00	2.14E-08
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	3.23E-13	3.23E-13	3.23E-13	3.23E-13	6.51E-14
CGDOV	3.23E-13	3.23E-13	3.23E-13	3.23E-13	6.51E-14
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	1.79E-13	0.00E+00	1.79E-13	0.00E+00	3.62E-14
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	6.04E-14	0.00E+00	6.04E-14	0.00E+00

NAME	M_M11	M_M5	M_M7	M_M8	M_M6
MODEL	P160	P640	P320	P320	P640
ID	-4.38E-12	-2.51E-04	-1.51E-04	-1.51E-04	-2.51E-04
VGS	-8.00E-01	-1.05E+00	-1.02E+00	-1.02E+00	-1.05E+00
VDS	-1.92E+00	-8.26E-01	-2.26E-01	-2.26E-01	-8.26E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VTH	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01
VDSAT	-3.73E-05	-2.25E-01	-1.99E-01	-1.99E-01	-2.25E-01
GM	1.17E-07	1.91E-03	1.19E-03	1.19E-03	1.91E-03
GDS	6.34E-13	8.06E-05	1.75E-04	1.75E-04	8.06E-05
GMB	2.90E-08	4.55E-04	2.86E-04	2.86E-04	4.55E-04
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	6.51E-14	2.64E-13	2.64E-13	2.64E-13	2.64E-13
CGDOV	6.51E-14	2.64E-13	2.64E-13	2.64E-13	2.64E-13
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	3.62E-14	1.47E-13	1.47E-13	1.47E-13	1.47E-13
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

NAME	M_M3	M_M3i	M_M4	M_M4i	M_Sp
MODEL	N391	N391	N391	N391	N500
ID	1.00E-04	2.22E-12	1.00E-04	2.22E-12	2.62E-12
VGS	9.13E-01	5.40E-01	9.13E-01	5.40E-01	-1.87E-01
VDS	2.59E+00	2.21E+00	2.59E+00	2.21E+00	2.61E+00
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01
VDSAT	1.01E-01	0.00E+00	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00
GM	1.75E-03	0.00E+00	1.75E-03	0.00E+00	0.00E+00
GDS	2.01E-05	0.00E+00	2.01E-05	0.00E+00	0.00E+00
GMB	4.26E-04	0.00E+00	4.26E-04	0.00E+00	0.00E+00
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	1.61E-13	1.61E-13	1.61E-13	1.61E-13	2.06E-13
CGDOV	1.61E-13	1.61E-13	1.61E-13	1.61E-13	2.06E-13
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CGS	8.94E-14	0.00E+00	8.94E-14	0.00E+00	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	3.09E-14	0.00E+00	3.09E-14	1.72E-13

NAME	M_M13	M_M14	M_M9	M_Mb1	M_Mb2
MODEL	N80	N80	N160	N320	N320
ID	4.45E-12	2.62E-12	1.51E-04	2.51E-04	2.51E-04
VGS	8.00E-01	8.00E-01	9.47E-01	1.05E+00	1.05E+00
VDS	1.96E+00	8.00E-01	3.04E+00	9.03E-01	9.03E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01
VDSAT	3.77E-05	3.77E-05	1.31E-01	2.22E-01	2.22E-01
GM	1.17E-07	8.57E-08	2.02E-03	1.94E-03	1.94E-03
GDS	6.32E-13	5.37E-13	2.59E-05	7.77E-05	7.77E-05
GMB	2.90E-08	2.13E-08	4.89E-04	4.61E-04	4.61E-04
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	3.20E-14	3.20E-14	1.31E-13	1.31E-13	1.31E-13
CGDOV	3.20E-14	3.20E-14	1.31E-13	1.31E-13	1.31E-13
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	1.78E-14	1.78E-14	7.30E-14	7.30E-14	7.30E-14
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

NAME	M_M10	M_Sn
MODEL	N160	P1000
ID	1.51E-04	-2.62E-12
VGS	9.47E-01	1.86E-01
VDS	3.04E+00	-2.61E+00
VBS	0.00E+00	0.00E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VTH	8.00E-01	-8.00E-01
VDSAT	1.31E-01	0.00E+00
GM	2.02E-03	0.00E+00
GDS	2.59E-05	0.00E+00
GMB	4.89E-04	0.00E+00
CBD	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	1.31E-13	4.13E-13
CGDOV	1.31E-13	4.13E-13
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16
CGS	7.30E-14	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	3.44E-13

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 5.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.ผลการหาค่าไบอัสภาคเอาท์พุทอย่างเดียว

MOSFET MODEL PARAMETERS

	P1000	P40	P100	N500
	PMOS	PMOS	PMOS	NMOS
LEVEL	3	3	3	3
TPG	0	0	0	0
L	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06	1.000000E-06
W	1.000000E-03	40.000000E-06	100.000000E-06	500.000000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	-.8	-.8	-.8	.8
KP	10.000000E-06	10.000000E-06	10.000000E-06	20.000000E-06
GAMMA	.4	.4	.4	.4
PHI	.65	.65	.65	.65
LAMBDA	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15	646.578700E-15
RD	2	2	2	2
RG	2	2	2	2
PBSW	.8	.8	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09	100.000000E-09

	N20	N50
	NMOS	NMOS
LEVEL	3	3
TPG	0	0
L	1.000000E-06	1.000000E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W	20.000000E-06	50.000000E-06
WD	1.400000E-06	1.400000E-06
VTO	.8	.8
KP	20.000000E-06	20.000000E-06
GAMMA	.4	.4
PHI	.65	.65
LAMBDA	646.578700E-15	646.578700E-15
RD	2	2
RG	2	2
PBSW	.8	.8
CJ	144.039000E-06	144.039000E-06
TT	80.000000E-09	80.000000E-09
CGSO	414.000000E-12	414.000000E-12
CGDO	414.000000E-12	414.000000E-12
CGBO	161.000000E-12	161.000000E-12
NSUB	2.000000E+15	2.000000E+15
TOX	100.000000E-09	100.000000E-09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

(1) -.4244 (2) .4384 (3) -1.1786 (4) 1.6249

(in) 0.0000 (out) -1.5380 ($N_0001) 2.5000

($N_0002) 1.5234 ($N_0003) -2.5000

($N_0004) -1.5208

TOTAL POWER DISSIPATION 5.14E-03 WATTS

**** OPERATING POINT INFORMATION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

MOSFETS

NAME	M_Mo1	M_Mo3	M_Mo2	M_Mo4	M_Mo8
MODEL	P1000	P40	P100	P100	N50
ID	-7.17E-05	-2.00E-05	-2.00E-05	-1.46E-04	2.81E-12
VGS	-8.75E-01	-1.09E+00	-9.77E-01	-1.19E+00	7.54E-01
VDS	-4.04E+00	-1.09E+00	-9.77E-01	-2.80E+00	2.80E+00
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	-8.00E-01	8.00E-01
VDSAT	-6.68E-02	-2.54E-01	-1.57E-01	-3.44E-01	0.00E+00
GM	1.90E-03	1.35E-04	2.21E-04	7.28E-04	0.00E+00
GDS	9.03E-06	5.87E-06	5.89E-06	2.96E-05	0.00E+00
GMB	4.66E-04	3.19E-05	5.33E-05	1.69E-04	0.00E+00
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	4.13E-13	1.54E-14	4.02E-14	4.02E-14	1.95E-14
CGDOV	4.13E-13	1.54E-14	4.02E-14	4.02E-14	1.95E-14
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	2.30E-13	8.56E-15	2.24E-14	2.24E-14	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.32E-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NAME	M_MO5	M_Mo7	M_Mo6
MODEL	N500	N20	N50
ID	1.61E-03	2.00E-05	2.00E-05
VGS	1.32E+00	1.10E+00	9.79E-01
VDS	9.62E-01	1.10E+00	9.79E-01
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	8.00E-01	8.00E-01	8.00E-01
VDSAT	4.64E-01	2.64E-01	1.59E-01
GM	5.68E-03	1.30E-04	2.18E-04
GDS	5.51E-04	5.87E-06	5.89E-06
GMB	1.30E-03	3.06E-05	5.24E-05
CBD	8.00E-20	8.00E-20	8.00E-20
CBS	1.11E-19	1.11E-19	1.11E-19
CGSOV	2.06E-13	7.12E-15	1.95E-14
CGDOV	2.06E-13	7.12E-15	1.95E-14
CGBOV	1.61E-16	1.61E-16	1.61E-16
CGS	1.14E-13	3.96E-15	1.09E-14
CGD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 1.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณพ่อและแม่และสมาชิกในครอบครัวที่เข้าใจและให้กำลังใจและมีแต่ความปรารถนาดีตลอดมา

ขอขอบคุณอาจารย์วรากรเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการสละเวลาส่วนตัว,คำปรึกษาและความรู้ที่มอบให้ตลอดเวลา1ปี ซึ่งแน่นอนว่าหากไม่ได้คำปรึกษาจากอาจารย์แล้ว โครงงานนี้ย่อมไม่มีทางสำเร็จจนถึงเวลานี้ได้

ขอบคุณเพื่อนๆสำหรับกำลังใจ และยังเป็นที่ปรึกษายามมีปัญหาไม่ว่าเรื่องใดๆก็ตาม

.....

(ณัฏฐวุฒิ วังกานนท์)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Muhammad Rashid'Microelestronic Circuits Analog and design',PWS publishing company 1999

2. Thomas L. Floyd ,'Electornic devices '4th edition,Prentice hall International,Inc 1996

3. Randall L.Geiger ,Phillip E. Allen,Noel R. Strader,'VLSI design technic for Analog and digital circuits',Mcgraw-Hill Publishing company 1990

4. Mark N. Horenstein,' Microelestronic Circuits and Devices' 2nd editon,Prentice-Hallintery edition

5. Phillip E. Allen,Douglas R. bHolbreg,'CMOS Analog Circuitt Design'Holt,Rinehart and Wilston,Inc.1987

6. Paul R. Grey,Robert G. Meyer,Analysis And Design Of Analog Integrated Circuits, 3rd edition,John Wiley&Sons,Inc.1993

7.Ron Hogervorst,Johan H. Huijsing'Design Of Low-Voltage,Low power Operationalv Amplifier Cells',Kluwer Academic Publishers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้