สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงย่านปฏิบัติงานของความต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากทรานซิสเตอร์ CMOS

THE IMPROVEMENT OF DYNAMIC-RANGE FOR ELECTRONICALLY TUNABLE FLOATING RESISTANCE BASED ON CMOS TRANSISTORS

สิทธิพร เพ็ชรกิจ

SITTIPORN PETCHKIT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 44963
วัน, เดือน, ปี 16 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-110-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE IMPROVEMENT OF DYNAMIC-RANGE FOR ELECTRONICALLY TUNABLE FLOATING RESISTANCE BASED ON CMOS TRANSISTORS

SITTIPORN PETCHKIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2002

ISBN 974-324-110-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงย่านปฏิบัติงานของความต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างจากทรานซิสเตอร์ CMOS
นักศึกษา	นายสิทธิพร เพ็ชรกิจ
รหัสประจำตัว	38621206
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกและค่าลบ ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แรงดันเป็นตัวควบคุม ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนการนำคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวมาใช้งาน วงจรที่นำเสนอนี้ให้ค่าความต้านทานที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง และมีช่วงปฏิบัติงานกว้าง และเนื่องจากวงจรประกอบขึ้นจากมอส ทรานซิสเตอร์เพียงอย่างเดียว จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพการทำงานของวงจร ได้แสดงการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Improvement of Dynamic-Range for Electronically Tunable Floating Resistance Based on CMOS Transistors
Student	Mr. Sittiporn Petchkit
Student ID.	38621206
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kobchai Dejhan

ABSTRACT

This thesis presents the positive and negative floating resistance circuits, which can be eletronically tunable voltage-controlled resistance. These circuits bases on the characteristic of MOS-transistors operating in saturation region. The proposed circuit gives high-linearity of the resistance value and wide dynamic range, which is useful in IC design because of its MOS-transistor structure. The circuit performances are also included based on simulation results by using PSpice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำ จนทำให้ผู้เขียนสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้ และขอขอบคุณอาจารย์วิจิตรา เพ็ชรกิจ ที่มอบสิ่งที่ดีงามทุกสิ่งทุกอย่างและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้เขียนมาโดยตลอด พร้อมทั้งเพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน สำหรับความช่วยเหลือต่างๆ ขอขอบคุณ บิดา มารดา พี่ๆและน้องทุกคน ที่ได้ให้ความรัก และคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้เขียน นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสยามที่ได้อำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สิทธิพร เพ็ชรกิจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป... VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา 2

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 3

บทที่ 2 ทฤษฎีของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า 4

2.1 กล่าวนำ 4

2.2 มอสทรานซิสเตอร์.....5

2.3 ชนิดและประเภทของมอสทรานซิสเตอร์ 5

2.4 โครงสร้างและการทำงาน 7

2.4.1 สัญลักษณ์ 8

2.5 แรงดันขีดเริ่ม 9

2.6 การนำกระแสและขอบเขตการทำงาน..... 11

2.6.1 ขอบเขตการทำงาน 14

บทที่ 3 หลักการและการออกแบบวงจรความต้านทานที่เสนอ 16

3.1 กล่าวนำ 16

3.2 แหล่งจ่ายกระแสคงที่..... 16

3.3 หลักการของวงจรความต้านทานที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์..... 22

3.4 การปรับปรุงหรือการขยายช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานให้กว้างขึ้น 32

3.5 การดัดแปลงวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก เป็นแบบลบ 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ได้จากการดัดแปลง วงจรที่ 1.....38
3.5.2 วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ได้จากการดัดแปลง วงจรที่ 2..... 44
3.6 การพัฒนาวงจรความต้านทานลอยตัว ให้สามารถทำงานได้ทั้งแบบบวก และแบบลบ ภายในวงจรเดียวกัน 49
3.6.1 การกำหนดให้ทำงานเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก.....51
3.6.2 การกำหนดให้ทำงานเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ.....51

บทที่ 4 การจำลองการทำงาน 57
4.1 กล่าวนำ.....57
4.2 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....57
4.2.1 การจำลองวงจรความต้านทานลอยตัว เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดัน 57
4.2.2 การจำลองวงจรเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ 61
4.2.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน 63
4.2.4 การจำลองค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ 67

บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์ 69

เอกสารอ้างอิง 71

ภาคผนวก 73
ภาคผนวก ก. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเลียนแบบการทำงานของวงจร 74
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ 75

ประวัติผู้เขียน 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1 แสดงค่าอัตราส่วน $\left(\frac{W}{L}\right)$ ของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้จำลองการทำงาน 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ชนิดและประเภทของทรานซิสเตอร์ 4

2.2 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ 5

2.3 ข้อแตกต่างของมอสทรานซิสเตอร์ทั้งสองแบบ ก) Depletion ข)Enhancement 5

2.4 ก) N-channel แบบ Depletion MOSFET 6

ข) P-channel แบบ Depletion MOSFET 6

ค) N-channel แบบ Enhancement MOSFET 6

ง) P-channel แบบ Enhancement MOSFET 6

2.5 กราฟคุณลักษณะของกระแสเดรนแบบ N-Channel ก) Depletion ข) Enhancement 8

2.6 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ 9

2.7 การเกิดชั้นกลับ (Inversion layer) เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ขาเกต 10

2.8 การเกิดแชนแนลเมื่อป้อน V_{GS} และ V_{DS} 12

2.9 กราฟความสัมพันธ์ของกระแส I_D กับแรงดัน V_{DS} 13

3.1 ก) แหล่งจ่ายกระแสอย่างง่าย ข) วงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็ก 16

3.2 แหล่งจ่ายกระแสหลายเอาท์พุต 18

3.3 แบบจำลองของวงจรตามรูป 3.1 เพื่อหาค่าความต้านทานอินพุต 19

3.4 แบบจำลองของวงจรตามรูป 3.1 เพื่อหาค่าความต้านทานเอาท์พุต 20

3.5 วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายกระแสทางเอาท์พุต 20

3.6 วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด 21

3.7 หลักการวงจรความต้านทานลอยตัวปรับค่าได้ด้วยแรงดัน 22

3.8 โครงสร้างวงจรความต้านทานลอยตัวปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์.. 23

3.9 ความสัมพันธ์ของกระแส I_{IN} และ I_{OUT} 23

3.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจรความต้านทานลอยตัวที่รวมส่วนการสะท้อนกระแส I_1 และ I_2 24

3.11 การจัดไบอัสแก่มอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 27

3.12 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบบวก ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่สร้างจาก NMOS 30

3.13 ความสัมพันธ์ ของค่ากระแส I_{AB} และแรงดัน V_{AB} ของวงจรรูปที่ 3.12 31

3.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรความต้านทานลอยตัว ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่ปรับปรุง 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.15 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบบวก ที่เสนอการปรับปรุง 34

3.16 ความสัมพันธ์ ของกระแส I_{AB} และแรงดัน V_{AB} ของวงจรความต้านทานที่ปรับปรุง... 37

3.17 ทิศทางการไหลของกระแส I_{IN} กรณีไหลเข้าที่โนด A 39

3.18 ทิศทางการไหลของกระแสตามสมการ (3.70) 39

3.19 การจัดวางตำแหน่งของกระแส I_2 ใหม่ 40

3.20 ทิศทางการไหลของกระแส $2I_1$ เพื่อให้เงื่อนไขกระแส I_{IN} ไหลออกที่โนด A 41

3.21 ทิศทางการไหลของกระแสต่างๆที่โนด B ตามสมการ (3.74) 41

3.22 ทิศทางการไหลของกระแส $2I_2$ เพื่อให้เงื่อนไขกระแส I_{OUT} ไหลเข้าที่โนด B 42

3.23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ 1 ที่ดัดแปลงเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ 43

3.24 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ดัดแปลงจากวงจรที่ 1 43

3.25 บล็อกไดอะแกรมของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก วงจรที่ 2 ก่อนดัดแปลง 44

3.26 ทิศทางการไหลของกระแส I_{IN} ที่โนด A 45

3.27 ทิศทางของกระแส $2I_1$ ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อให้เงื่อนไขกระแส I_{IN} ไหลออกที่โนด A..... 46

3.28 ทิศทางการไหลของกระแสตามสมการ (3.88) และทิศทางกระแส I_2 ที่สร้างจาก M_2 47

3.29 ทิศทางของกระแส $2I_2$ ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อให้เงื่อนไขกระแส I_{OUT} ไหลเข้าที่โนด B..... 48

3.30 บล็อกไดอะแกรม วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ ที่ดัดแปลงจากวงจรที่ 2 48

3.31 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบลบ ที่ดัดแปลงจากวงจรที่ 2 49

3.32 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกและแบบลบ ภายในวงจรเดียวกัน ชนิด NMOS 50

3.33 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบวก..... 51

3.34 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบลบ 52

3.35 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบวก..... 53

3.36 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบลบ 53

3.37 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกและแบบลบ ภายในวงจรเดียวกัน ชนิด PMOS 54

3.38 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบวก..... 54

3.39 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบลบ..... 55

3.40 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบวก..... 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.41	วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบลบ	56
4.1	วงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก	57
4.2	วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ วงจรที่ 1	58
4.3	วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ วงจรที่ 2	58
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อ V_C มีค่าต่างๆกันของวงจรรูปที่ 4.1	59
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อ V_C มีค่าต่างๆ กัน ของวงจรรูปที่ 4.2	59
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อ V_C มีค่าต่างๆ กันของวงจรรูปที่ 4.3	60
4.7	ลักษณะการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองความถี่	61
4.8	ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรูปที่ 3.15	61
4.9	ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรูปที่ 3.24	62
4.10	ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรูปที่ 3.31	62
4.11	วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	63
4.12	วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสเมื่อใช้วงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก	64
4.13	วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสเมื่อใช้วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ วงจรที่1	64
4.14	วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสเมื่อใช้วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ วงจรที่ 2	65
4.15	ผลการจำลองการทำงานเมื่อ R_1 ถูกแทนด้วยวงจรรูปที่ 3.15 (วงจรรูปที่ 4.12)	65
4.16	ผลการจำลองการทำงานเมื่อ R_1 ถูกแทนด้วยวงจรรูปที่ 3.24 (วงจรรูปที่ 4.13)	66
4.17	ผลการจำลองการทำงานเมื่อ R_1 ถูกแทนด้วยวงจรรูปที่ 3.31 (วงจรรูปที่ 4.14)	66
4.18	เสถียรภาพของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ ของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกรูปที่ 4.1	67
4.19	เสถียรภาพของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ ของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบรูปที่ 4.2	68
4.20	เสถียรภาพของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ ของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบรูปที่ 4.3	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วงจรเลียนแบบการทำงานของความต้านทาน เป็นวงจรที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ขั้วเป็นเชิงเส้น สามารถแบ่งตามลักษณะของตัวต้านทานได้เป็น 2 ประเภทคือ ความต้านทานชนิดต่อลงกราวด์ (Grounded Resistor) และความต้านทานชนิดลอยตัว (Floating Resistor) นอกจากนั้น ยังสามารถแบ่งประเภทของความต้านทานตามคุณสมบัติการทำงานได้เป็น ความต้านทานแบบบวก และความต้านทานแบบลบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแส และทิศทางของแรงดันที่ขั้วของความต้านทานเป็นสำคัญ

ความต้านทานแบบลอยตัวมีการนำไปใช้งานกว้างขวางมากกว่าความต้านทานแบบต่อลงกราวด์ ดังนั้นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก และ แบบลบที่สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมากตัวหนึ่ง เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณต่างๆ ได้มากมาย ตัวอย่างเช่นนำมาใช้ในวงจรออสซิลเลเตอร์ หรือใช้เป็นตัวปรับค่าความถี่ในวงจรกรองสัญญาณแบบแอคทีฟ (active filter) หรือใช้เป็นตัวปรับอัตราขยายหรือเป็นตัวลดทอนสัญญาณในวงจรขยายสัญญาณ หรือใช้เป็นวงจรเพิ่มความเป็นเชิงเส้นให้กับวงจรอินทิเกรต เป็นต้น จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีการนำเสนอวงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ทั้งค่าบวก [1-6] และค่าลบ [7-8] ออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแต่ละวงจรก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการที่นำมาใช้ในการออกแบบ สิ่งหนึ่งที่เห็นได้ชัดเจนจากบทความที่มีการนำเสนอกันอย่างมากก็คือช่วงปฏิบัติงานของแรงดันอินพุตของวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกส่วนใหญ่จะมีช่วงปฏิบัติงานประมาณ ± 1 โวลท์ ในขณะที่ใช้ไฟเลี้ยงวงจร ± 5 โวลท์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ถ้าสามารถออกแบบวงจรเลียนแบบความต้านทานนี้ ให้สามารถใช้งานในช่วงแรงดันอินพุตได้สูง หรือทำให้ช่วงปฏิบัติงานของแรงดันอินพุตกว้างขึ้น และให้ความเป็นเชิงเส้นสูง ก็น่าสนใจ และถ้ายิ่งวงจรที่ทำหน้าที่เลียนแบบเป็นความต้านทานใช้อุปกรณ์ในการสร้างน้อยชิ้นด้วยแล้ว ความน่าสนใจก็จะยิ่งมีมากขึ้น จึงมีแนวความคิดที่จะทำการแก้ไขและปรับปรุงวงจรเลียนแบบความต้านทานแบบลอยตัวให้สามารถมีช่วงปฏิบัติงานแรงดันอินพุตได้กว้างขึ้น และมีความเป็นเชิงเส้นสูง โดยวงจรจะต้องไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อน และถ้าการสร้างวงจรเลียนแบบความต้านทาน สามารถใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียว ก็มีความเหมาะสมที่จะทำเป็นวงจรรวมได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ มีจุดมุ่งหมาย คือการปรับปรุงย่านปฏิบัติงานของวงจรความต้านทานลอยตัว ที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ในที่นี้คือการปรับค่าด้วยแรงดัน ให้สามารถมีช่วงการทำงานของแรงดันที่กว้างขึ้น และให้ความเป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งวงจรความต้านทานที่มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้[1-8]จะให้ช่วงปฏิบัติงานของแรงดันที่ไม่กว้างมากนัก โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ ±1 โวลท์เท่านั้น เมื่อจะนำไปใช้งานในวงจรที่ใช้แรงดันสูง ก็อาจจะต้องทำการดัดแปลงหรือต่อวงจรเพิ่มเติม ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยาก เกิดความไม่คล่องตัวในการนำไปใช้งานเท่าที่ควร วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอการปรับปรุงดังกล่าว เพื่อให้มีช่วงปฏิบัติงานแรงดันอินพุตได้กว้างกว่าเดิมที่เคยมีการนำเสนอมา โดยได้ทำการปรับปรุงย่านการทำงานของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS และนำมาออกแบบวงจรใหม่ เพื่อให้มีช่วงแรงดันปฏิบัติงานที่กว้างขึ้น นอกจากนั้นยังได้นำวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่สร้างขึ้น มาทำการดัดแปลงให้สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบได้ โดยมุ่งเน้นให้วงจรที่สร้างนั้นใช้อุปกรณ์น้อย และเป็นอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟเพียงอย่างเดียว เพื่อจะได้มีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมต่อไป

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การปรับปรุงช่วงแรงดันการทำงานของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ที่ปรับค่าได้ด้วยแรงดันนั้น จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ขั้วเป็นเชิงเส้น พบว่าความสัมพันธ์ของเส้นกราฟที่ได้ จะอยู่ในรูปของความชัน เมื่อสมมติให้แกน X แทนด้วยค่าแรงดันอินพุต และแกน Y แทนค่ากระแสอินพุต จากการศึกษาคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์พบว่าเส้นกราฟจะมีความเป็นเชิงเส้นที่จำกัดเพราะกระแสอินพุตจะเกิดการอิ่มตัว และจากการสังเกตจะได้ว่าถ้าสามารถทำให้ความเป็นเชิงเส้นของเส้นกราฟมีค่ากว้างขึ้นได้ ในขณะที่กระแสอิ่มตัวมีค่าเท่าเดิม สิ่งที่ได้คือช่วงของแรงดันอินพุตจะกว้างมากขึ้น หรือมีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่กว้างขึ้นนั่นเอง ซึ่งการที่จะทำให้ช่วงของแรงดันมีค่ากว้างขึ้นได้นั้น จะมีความสัมพันธ์กับค่าของความชันของเส้นกราฟ กล่าวคือ ถ้าความชันของเส้นกราฟมีค่ามาก ช่วงแรงดันอินพุตที่ได้จะมีค่าน้อย แต่ถ้าความชันของเส้นกราฟมีค่าน้อย ช่วงของแรงดันอินพุตก็จะมีค่ามากขึ้น หรือมีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่กว้างขึ้นนั่นเอง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอการปรับปรุงย่านปฏิบัติงานของวงจรความต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับรายละเอียด ของวิทยานิพนธ์ จะมีดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่นำมาสร้างวงจรความต้านทานชนิดลอยตัวในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและการออกแบบวงจรความต้านทานแบบลอยตัวแบบบวก ที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์(แรงดัน) ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้ ประกอบด้วยหลักการของวงจรสะท้อนกระแส หลักการสร้างวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก โดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS และได้ทำการปรับปรุงวงจรดังกล่าวเพื่อให้มีช่วงปฏิบัติงานแรงดันอินพุตที่กว้างขึ้น และมีความเป็นเชิงเส้นสูง นอกจากนั้นยังได้กล่าวถึงหลักการดัดแปลงวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่เสนอดังกล่าว ให้สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบได้อีกด้วย

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองการทำงานของวงจรความต้านทานลอยตัว แบบบวกและ แบบลบที่ได้ออกแบบไว้ ด้วยโปรแกรมเลียนแบบการทำงาน PSpice

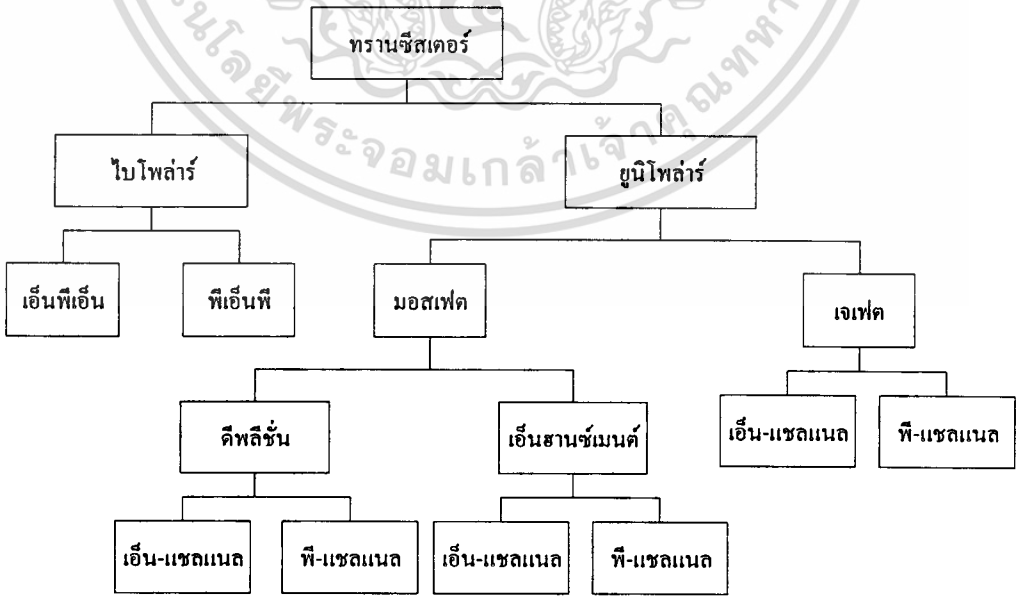
บทที่ 5 จะเป็นบทสรุปของงานที่นำเสนอ และข้อเสนอแนะ นอกจากนี้ในภาคผนวก ก. จะเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับ โมเดล พารามิเตอร์ (Model Parameter) ของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนซ์ ทั้งชนิด NMOS และ PMOS ซึ่งได้ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร และภาคผนวก ข. จะเป็นผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ระหว่างการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการออกแบบวงจรรวมหรือ ไอซี (Integrated circuits) มีอยู่ 2 ชนิดคือ ไบโพล่าร์ (Bipolar) และ มอส (MOS)เทคโนโลยี [10-12] โดยไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Junction Transistor : BJT) เป็นการใช้พาหะในการนำกระแสถึงสองชนิดด้วยกัน คือ โฮล (hole) และอิเล็กตรอน (electron) เป็นพาหะ แบ่งออกได้สองชนิด ได้แก่ เอ็นพีเอ็น (NPN) และ พีเอ็นพี (PNP) ทรานซิสเตอร์ ส่วนมอสทรานซิสเตอร์จะอาศัยพาหะชนิดเดียวเท่านั้นในการนำกระแส ซึ่งอาจจะเป็นโฮล หรือ อิเล็กตรอนก็ได้ จึงเรียกว่ายูนิโพล่าร์ทรานซิสเตอร์ และเนื่องจากการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จะอาศัยสนามไฟฟ้าเป็นหลักจึงเรียกทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ว่า ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Effect Transistor : FET) สามารถแบ่งแยกประเภทได้อย่างคร่าวๆ เป็น เจเฟต (Junction Field Effect Transistor : JFET) และ มอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor : MOSFET) โดยมอสเฟตมีโมดการทำงานหลักอยู่ 2 โมดคือ ดีพลีชั่นโมด (Depletion mode) และเอ็นฮานซ์เมนต์โมด (Enhancement mode) ทั้งนี้ในแต่ละประเภทของเฟตสามารถแบ่งแยกออกได้อีกเป็นชนิด เอ็นแชนแนล (N-channel) และ พีแชนแนล (P-channel) ดังรูปที่ 2.1

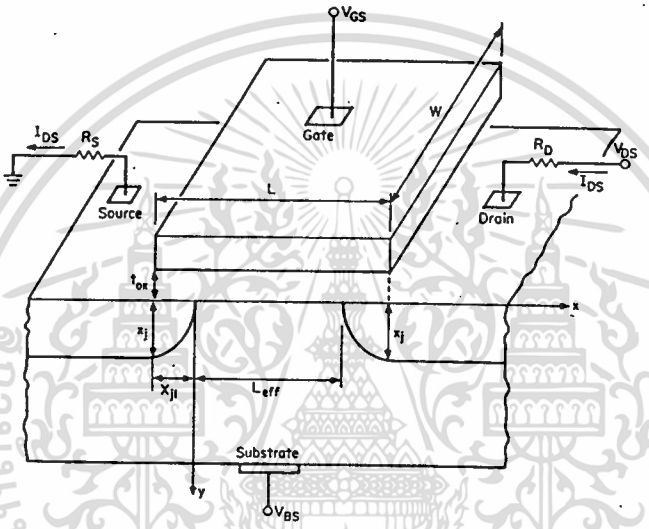


รูปที่ 2.1 ชนิดและประเภทของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 มอสทรานซิสเตอร์

มอสเฟตเป็นเฟตชนิดหนึ่งที่มีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์(SiO_2)บางๆ กั้นอยู่ระหว่างขั้วโลหะของเกต(Gate) กับเนื้อสารกึ่งตัวนำ และมีขั้วต่อทั้งสิ้นจำนวน 4 ขั้ว (four terminals) ซึ่งการไหลของกระแสจะถูกควบคุมโดยสนามไฟฟ้าในแนวตั้งบนแรงดันที่ปรากฏภายนอก ลักษณะของมอสเฟต แสดงดังรูป 2.2 เมื่อขั้วทั้งสี่ ถูกออกแบบมาเป็นขาซอส (Source : S) ขาเดรน(Drain : D) ขาเกต (Gate :G) และฐานรอง (Substrate : B)หรือ Body หรือ บัลค (Bulk) ที่เป็นซิลิกอน



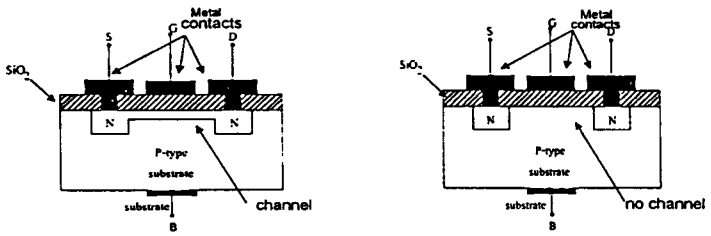
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์

2.3 ชนิดและประเภทของมอสทรานซิสเตอร์

มอสทรานซิสเตอร์ แบ่งออกได้ 2 แบบ จากลักษณะการเกิดแชนแนล ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าสิ่งประดิษฐ์นั้น เมื่อให้ไบอัสเป็นศูนย์จะนำกระแส (Depletion) หรือไม่นำกระแส (Enhancement) นั่นคือ

1 แบบดีพลีชั่น โมด (Depletion mode)

2 แบบเอ็นฮานเม็นซ์ โมด (Enhancement mode)



ก) ข)

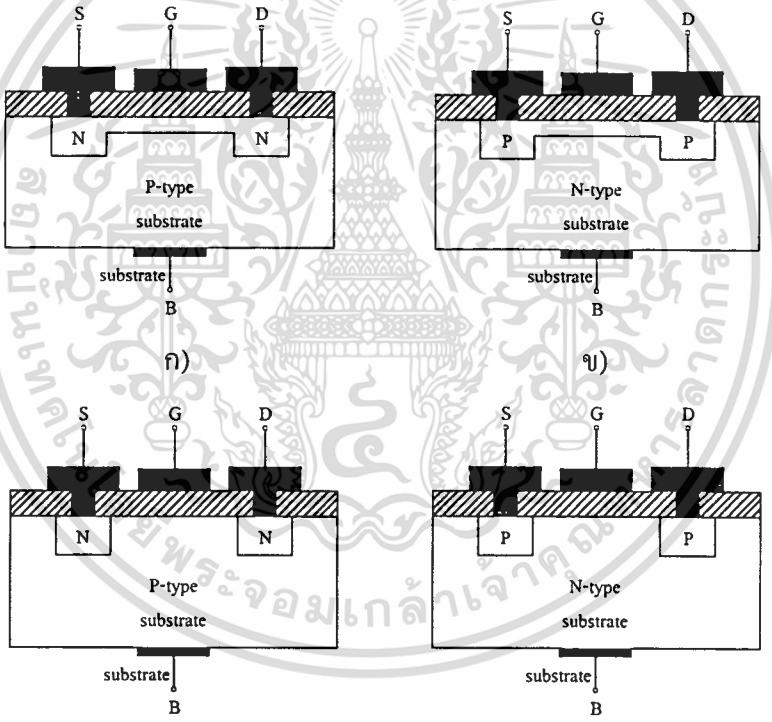
รูปที่ 2.3 ข้อแตกต่างของมอสทรานซิสเตอร์ทั้งสองแบบ ก) Depletion ข) Enhancement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของแบบดีพลีชั่น จะมีลักษณะคล้ายกันกับแบบเอ็นฮานเม็นซ์ จะมีข้อแตกต่างกันตรงที่ช่องว่าง(Channel) ระหว่างขาซอสกับขาเดรน ในแบบดีพลีชั่น จะมีการแพร่สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น หรือ ชนิดพี อยู่(รูปที่แสดงนี้เป็นชนิดเอ็น) ทำให้มีกระแสไหลระหว่างเดรนกับซอส เมื่อกำหนดความต่างศักย์ที่เดรนเป็นบวกเทียบกับซอส $(V_{DS} = +)$ และความต่างศักย์ระหว่างเกตกับซอสเป็นศูนย์ $(V_{GS} = 0)$ นอกจากนี้ในแต่ละแบบที่กล่าวมา ยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ชนิด ตามลักษณะของพาหะที่ใช้ในการนำกระแสคือ

1 มอสเฟตชนิดช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น (N-channel) หรือ NMOS ใช้อิเล็กตรอนในการนำกระแส

2 มอสเฟตชนิดช่องทางเดินกระแสชนิดพี (P-channel) หรือ PMOS ใช้โฮลในการนำกระแส



รูปที่ 2.4 ก) N-channel แบบ Depletion MOSFET

ข) P-channel แบบ Depletion MOSFET

ค) N-channel แบบ Enhancement MOSFET

ง) P-channel แบบ Enhancement MOSFET

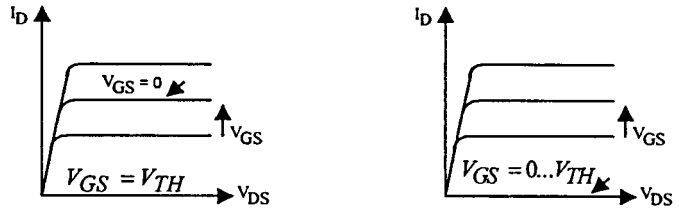
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โครงสร้างและการทำงาน

มอสเฟตแบบดีพลีชั่น ชนิด N-channel หรือ NMOS ประกอบด้วยปลายอิเล็กโทรดเดรน (Drain) และซอส (Source) ที่มีปลายทั้งสองข้างต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน ซึ่งเป็นชนิด N บางๆที่ต่อถึงกันในลักษณะแชนแนล วางอยู่บนผิวหน้าของฐานรอง (Substrate) ชนิด P จากนั้นจึงวางอิเล็กโทรดเกต (Gate) ซึ่งเป็นโลหะเหนือย่านของแชนแนลชนิด N ซึ่งกั้นด้วยแผ่นฉนวนบางๆ ของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ดังรูป 2.4 ก ในทำนองเดียวกันถ้าเปลี่ยนสารที่ฐานรองเป็นชนิด N แทน และมีแชนแนลที่วางอยู่บนผิวหน้าของฐานรองเป็นชนิด P จะเรียกมอสเฟตชนิดนี้ว่ามอสเฟตแบบดีพลีชั่น ชนิด P-channel หรือ PMOS ดังรูป 2.4 ข ส่วนมอสเฟตแบบเอ็นฮานเมนซ์ ชนิด N-channel และ P-channel มีขบวนการสร้างเช่นเดียวกันกับการสร้างมอสเฟตแบบดีพลีชั่นชนิด N- และ P Channel ตามลำดับทุกประการ แตกต่างกันเฉพาะในส่วนการสร้างแชนแนลเท่านั้น โดยแบบเอ็นฮานเม็นซ์นั้น ส่วนของแชนแนลจะไม่ต่อถึงกัน โดยที่มีระยะห่างหรือความยาวของแชนแนล(Channel Length)เกิดขึ้นเป็น L และมีความกว้างของแชนแนล (Channel Width) เป็น W ดังรูป 2.2 และ 2.4 ค , ง ตามลำดับ

มอสเฟตแบบดีพลีชั่น สามารถทำงานได้ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับการให้ไบอัส กล่าวคือถ้าให้ไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) จะทำงานในย่านดีพลีชั่น แต่ถ้าให้ไบอัสตรง (forword bias) จะทำงานในย่านเอ็นฮานเม็นซ์ โดยมีแรงดันไบอัสที่เกตซอส V_{GS} ควบคุมการไหลของกระแสเดรน I_D ที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่ามอสเฟตชนิดนี้สามารถควบคุมการไหลของกระแสเดรนโดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกตซอส (V_{GS}) เป็นได้ทั้งไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ดังกราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสเดรน ส่วนมอสเฟตแบบเอ็นฮานเม็นซ์ จะทำงานได้เฉพาะไบอัสตรงเท่านั้น ตัวอย่างกรณีมอสเฟตแบบ N-channel เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นลบหรือศูนย์ (reverse bias) จะไม่มีกระแสเดรนเกิดขึ้น เพราะไม่มีทางผ่านกระแสจากขาเดรนไปยังขาซอส แต่ถ้ามีแรงดันบวกค่าหนึ่งป้อนเข้าที่ขาเกต (V_{GS} = +) ทำให้เกิดแชนแนลระหว่างขาเดรนกับขาซอสขึ้นขนาดหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสเดรนจำนวนหนึ่ง และถ้าเพิ่มแรงดัน V_{GS} มีค่าบวกมากขึ้น แชนแนลจะโตขึ้น กระแสเดรนไหลได้มากขึ้น กรณีนี้เป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน ส่วนกรณีของมอสเฟตแบบเอ็นฮานเม็นซ์ ชนิด P-channel มีการทำงานเช่นเดียวกัน เพียงแต่แรงดันที่ให้เกตและซอสเป็นแรงดันตรงข้าม และการไหลของกระแสเดรนเป็นการไหลของกระแสโฮลดังกราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสเดรน

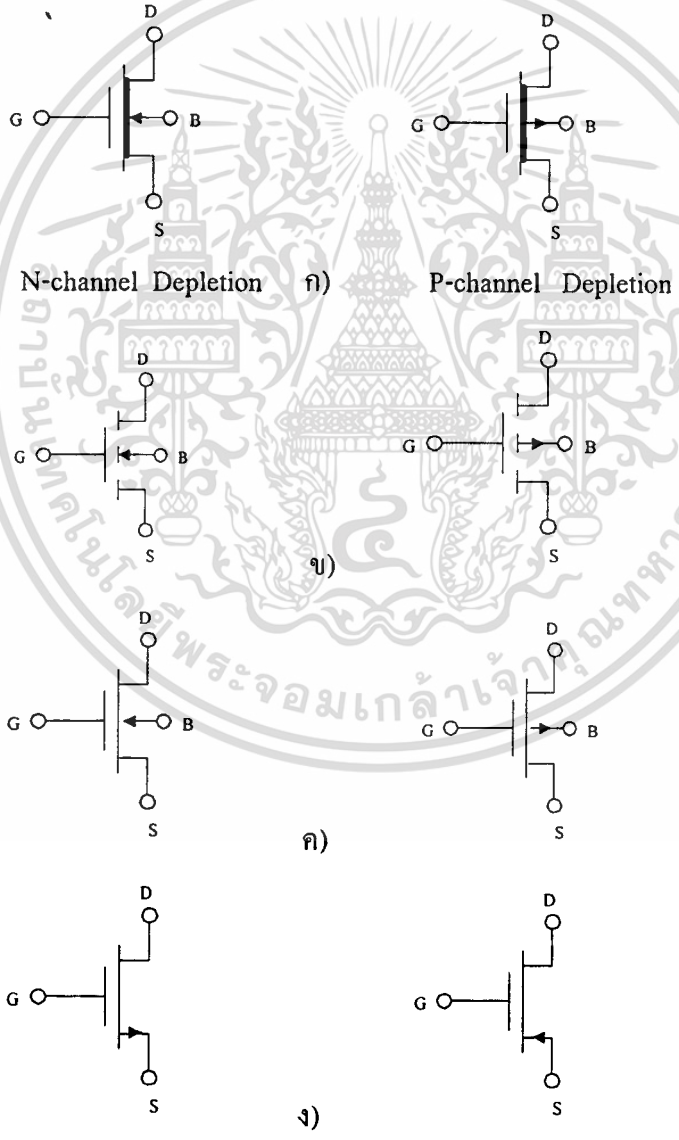
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



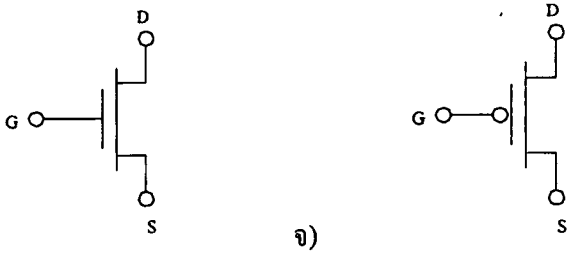
ก) ข)

รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะของกระแสเดรน แบบ N - Channel ก) Depletion ข) Enhancement

2.4.1 สัญลักษณ์ (Symbols)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



N-channel Enhancement P-channel Enhancement

รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์

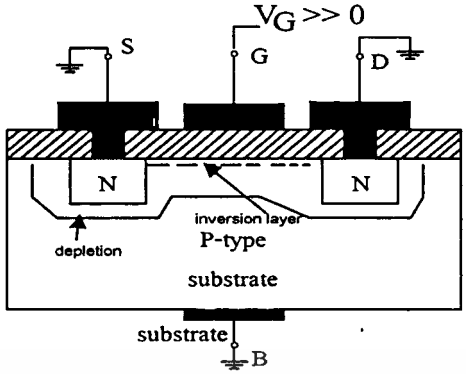
ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้สัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.6 ค , ง และเป็นชนิดเอ็นฮานเม็นซ์เป็นหลัก ยกเว้นแต่จะมีการระบุเป็นชนิดอื่น

2.5 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage : V_{TH})

การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ในโมดเอ็นฮานเม็นซ์ เมื่อไม่มีแรงดันป้อนที่ขาเกต ช่องทางเดินกระแสหรือแชนแนล(channel) ระหว่างเดรนกับซอส จะยังไม่มี การพิจารณาการเกิดช่องทางเดินกระแสพิจารณาจาก การต่อขาซอสกับเดรนลงกราวด์ และป้อนแรงดันที่เหมาะสมระหว่างเกตกับฐานรอง (V_{GB}) ซึ่งจะเกิดการเหนี่ยวนำของโฮลหรืออิเล็กตรอนในฐานรอง (ถ้าเป็น N-channel จะเป็นอิเล็กตรอน) ค่าแรงดัน V_{GB} ในสภาวะต่างๆจะส่งผลต่อบริเวณการเกิดช่องทางเดินกระแส และค่าแรงดัน V_{GB} นี้จะเทียบกับค่าแรงดันแถบราบ (flat band voltage : V_{FB}) [9] โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไข 3 ประการคือ

1. ถ้าค่าแรงดัน $V_{GB} = V_{FB}$ จะเกิดสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าบริเวณช่องทางเดินกระแส
2. ถ้าค่าแรงดัน $V_{GB} < V_{FB}$ จะเกิดประจุไฟฟ้าที่เป็นชนิดเดียวกับฐานรอง และรวมตัวกันบริเวณช่องทางเดินกระแส เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าช่วงการสะสม (accumulation region)
3. ถ้าค่าแรงดัน $V_{GB} > V_{FB}$ จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) และถ้าทำการเพิ่มแรงดันนี้ขึ้นอีก จะเกิดการรวมตัวกันของประจุที่เป็นชนิดตรงกันข้ามกับประจุบนฐานรอง เป็นผลให้เกิดช่องทางเดินกระแสขึ้น เรียกว่าการเกิดชั้นกลับ (Inversion layer) ซึ่งค่าแรงดันที่ป้อนแก่ขาเกตและฐานรองแล้วทำให้เกิดชั้นกลับ เรียกแรงดันนี้ว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage : V_{TH}) ค่าแรงดันขีดเริ่มนี้สามารถพิจารณาได้จากโครงสร้างภายในของมอสทรานซิสเตอร์ [9,10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเกิดชั้นกลับ (Inversion layer) เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ขาเกต

จากการป้อนแรงดันระหว่างเกตและฐานรอง พบว่าประจุที่เกต Q_G เกิดขึ้นเท่ากับประจุที่พื้นผิว (Surface charge : Q_{SC}) ซึ่งเป็นประจุบริเวณด้านล่างติดกับ Oxide โดยมีค่าเป็น

$$Q_{SC} = -Q_G = -\left(V_{GB} - V_{FB} - 2\phi_F\right) C_{OX} \tag{2.1}$$

โดยที่ V_{FB} คือ ค่าแรงดันแถบราบ (flat band voltage)

ϕ_F คือ ค่าแรงดันเฟอร์มิ (Fermi potential)

C_{OX} คือความจุของออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (oxide capacitance per unit area)

ส่วนค่าของประจุพื้นผิว Q_{SC} จะมีค่าเท่ากับผลรวมของประจุในดีพลีชั่น Q_B กับประจุในชั้นกลับ Q_I ดังนั้นเมื่อนำความสัมพันธ์นี้แทนลงในสมการ (2.1) จะได้ว่า

$$V_{GB} = V_{FB} + 2\phi_F - \left(\frac{Q_B + Q_I}{C_{OX}}\right) \tag{2.2}$$

กรณีการเริ่มต้นในการเกิดชั้นกลับ (onset of inversion) จะประมาณว่า $Q_S \approx Q_B$ และค่าแรงดัน V_{GB} ค่านี้คือค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{TH} จึงเขียนสมการ (2.2) ใหม่ได้เป็น

$$V_{TH} = V_{FB} + 2\phi_F - \frac{Q_B}{C_{OX}} \tag{2.3}$$

โดยทั่วไปแล้วค่าแรงดันขีดเริ่มจะรวมผลของบอดี้เอฟเฟค (body effect) ไว้ด้วยคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{TH} = V_{FB} + 2\phi_F + \gamma\left\{\sqrt{2\phi_F - V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F}\right\} \quad (2.4)$$

$$= V_{T0} + \gamma\left\{\sqrt{2\phi_F - V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F}\right\} \quad (2.5)$$

γ ค่าสัมประสิทธ์ของบอดี้เอฟเฟค (body effect coefficient) มีค่าเท่ากับ $\frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A}}{C_{OX}}$

โดยที่

q ค่าประจุอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูลอมป์

ε_S ค่าสภาพยอมของวัสดุ (material permittivity) มีค่าเป็น $\varepsilon_r\varepsilon_O$ ซึ่งค่า ε_r เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก(dieletric constant) และ ε_Oเป็นค่าสภาพยอมในสูญญากาศ (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ $8.85 \times 10^{-18} \frac{F}{\mu m}$

N_A ความเข้มข้นสารเจือ (impurity concentration)

V_{SB} ค่าแรงดันระหว่างขาซอส และฐานรอง

V_{T0} ค่าแรงดันขีดเริ่ม (กรณี $V_{SB} = 0$)

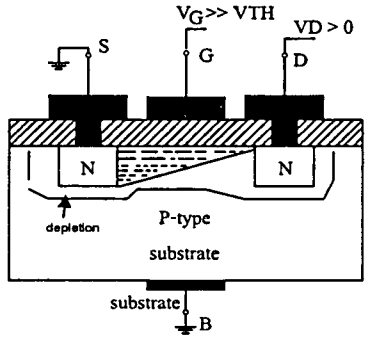
และจะได้

$$V_{T0} = V_{TH} \qquad \text{เมื่อ } V_{SB} = 0 \quad (2.6)$$

2.6 การนำกระแสและขอบเขตการทำงาน

จากหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อป้อนแรงดันที่มีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มเข้าที่ขาเกต และฐานรอง จะทำให้เกิดชั้นกลับหรือช่องทางเดินกระแสขึ้น แต่ไม่ทำให้กระแสไหลภายในตัวมอสทรานซิสเตอร์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการป้อนแรงดันควบคุมเพื่อทำให้เกิดการไหลของกระแสจากเดรนไปซอส I_{DS} โดยค่าแรงดันควบคุมนี้คือ ค่าแรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส V_{DS} ซึ่งนอกจากจะทำให้เกิดการไหลของกระแสแล้วยังสามารถใช้กำหนดย่านการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ได้อีกด้วย ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



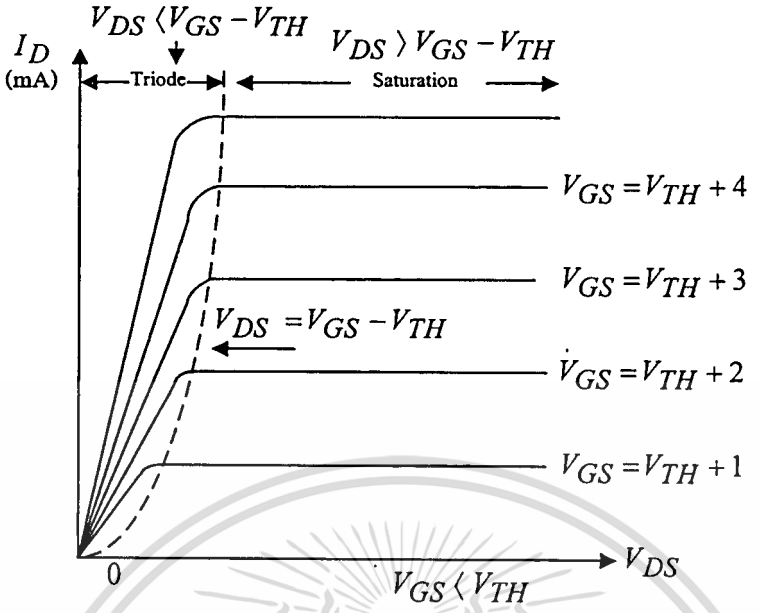
รูปที่ 2.8 การเกิดแชนแนลเมื่อป้อน V_{GS} และ V_{DS}

จากรูป 2.8 เมื่อทำการป้อนแรงดันบวกระหว่างขาเดรนกับซอส (V_{DS}) ค่าน้อยๆจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนจากซอสไปยังเดรน ทำให้มีกระแสเดรน I_D ไหลจากเดรนไปยังซอสโดยขนาดของกระแสเดรนขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่แชนแนล และขึ้นอยู่กับแรงดันเกตเทียบกับซอส (V_{GS}) กล่าวคือ ที่แรงดัน $V_{GS} = V_{TH}$ ในช่วงนี้ช่องทางเดินกระแสเพิ่งจะเริ่มเกิดขึ้น ดังนั้นกระแสเดรน I_D ที่ไหลจึงมีค่าน้อย และถ้าแรงดัน $V_{GS} > V_{TH}$ ก็จะเกิดอิเล็กตรอนในแชนแนลมากขึ้นทำให้กระแส I_D มากขึ้นด้วย แต่ถ้าให้แรงดัน V_{GS} มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และมากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{TH} แล้วทำการเพิ่มค่าแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS}) ให้มากขึ้น จะพบว่าค่าแรงดัน V_{DS} จะตกคร่อมตามความยาวของแชนแนล ซึ่งแรงดัน V_{DS} จะเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง V_{DS} จะทำให้แรงดันเกตและจุด...ไปตามแชนแนลจะลดลงจาก V_{GS} - V_{DS} เนื่องจากความลึกของแชนแนลจะขึ้นอยู่กับแรงดันดังกล่าว จึงทำให้ที่ซอสจะลึกมากที่สุด และตื้นสุดที่ปลายเดรน ดังรูป 2.8

เมื่อแรงดัน V_{DS} เพิ่มขึ้นจนระดับแรงดันที่เกตกับแชนแนลที่เดรนมีค่าเท่ากับ V_{TO} หรือ $V_{DS} = V_{GS} - V_{TO}$ จะเกิดปรากฏการณ์เรียกว่า Pinched-off การเพิ่มแรงดัน V_{DS} มากกว่านี้จะไม่มีผลต่อกระแสเดรน ซึ่ง I_D จะคงที่ ที่ $V_{DS} = V_{GS} - V_{TO}$ กระแสเดรน I_D จะอิ่มตัวที่ค่า V_{DS} ดังกล่าว และมอสทรานซิสเตอร์จะเข้าสู่ย่านอิ่มตัว โดยแรงดัน V_{DS} ที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวจะเขียนแทนด้วย $V_{DS_{sat}}$

$$V_{DS_{sat}} = V_{GS} - V_{TO} \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ของกระแส I_D กับแรงดัน V_{DS}

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสเดรน (I_D) กับค่าแรงดันเกต-ซอส (V_{GS}) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอสทรานซิสเตอร์ [11] เป็น

$$I_D = K\frac{W}{L}\left[\left(V_{GS}-V_{TH}\right)-\frac{V_{DS}}{2}\right]V_{DS} \quad \text{เมื่อ } V_{GS} \geq V_{TH} \tag{2.8}$$

โดยที่

K คือค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (Transconductance) มีค่าเท่ากับ μC_{OX}

μ คือค่าความคล่องตัวที่ผิว (Surface Mobility) ขึ้นอยู่กับสารชนิดเอ็น(อิเล็กตรอน μ_e) หรือชนิดพี(โฮล μ_h)

C_{OX} คือค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์

W คือค่าความกว้างของแชนแนล (Channel width)

L คือค่าความยาวของแชนแนล (Channel lenght)

V_{GS} คือค่าแรงดันระหว่างเกตกับซอส

V_{TH} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage)

V_{DS} คือค่าแรงดันระหว่างเดรนกับซอส

I_D คือค่ากระแสเดรน (Drian current)

V_{SB} คือค่าแรงดันที่ซอสกับฐานรอง (Source-Bulk voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N_A คือค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในฐานรอง (Substrate Doping)

สำหรับ P-Channel มอสทรานซิสเตอร์ จะถูกนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับ N-Channel มอสทรานซิสเตอร์ กล่าวคือ พีมอสทรานซิสเตอร์จะมีย่านการทำงานเช่นเดียวกัน โดยการพิจารณาค่ากระแสก็จะใช้สมการกระแสเช่นเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันในเรื่องของทิศทางการไหลของกระแสตลอดจนแรงดันที่ใช้ โดยจะมีค่าตรงกันข้ามกัน และค่าความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ได้ (mobility) ก็มีค่าแตกต่างกันซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ได้(mobility) ของพีแชนแนลจะมีค่าน้อยกว่าของเอ็นแชนแนล ประมาณ สองถึงสามเท่า

2.6.1 ขอบเขตการทำงาน

การจัดไบอัสการทำงานให้กับมอสทรานซิสเตอร์ สามารถพิจารณาได้ 3 ขอบเขต (Region) ขึ้นอยู่กับการพิจารณาค่าของ $(V_{GS} - V_{TH})$ ดังนี้

1. ย่านไม่นำกระแส (Cut-off region)

$$I_D = 0 \quad ; \; V_{GS} - V_{TH} < 0 \tag{2.9}$$

2. ย่านไม่อิ่มตัว (Non-saturation region) หรือ (Linear region) หรือ (Triode-region) เป็นการให้ค่าแรงดัน V_{DS} มีค่าน้อยกว่าแรงดัน $(V_{GS} - V_{TH})$ มากๆ

$$I_D = K\frac{W}{L}\left[(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right] \; ; \; 0 < V_{DS} < V_{GS} - V_{TH} \tag{2.10}$$

เทอม $\frac{V_{DS}^2}{2}$ สามารถตัดทิ้งได้ เมื่อ $V_{DS} << V_{GS} - V_{TH}$ จะได้

$$I_D = K\frac{W}{L}\left[(V_{GS} - V_{TH})V_{DS}\right] \tag{2.11}$$

3. ย่านอิ่มตัว (Saturation - region) เป็นการกำหนด $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$ จะได้

$$I_{D_{sat}} = \frac{K}{2}\frac{W}{L}\left[(V_{GS} - V_{TH})^2\right] \; ; \; 0 < V_{GS} - V_{TH} \leq V_{DS} \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าสมการกระแสเดรนในช่วงอิ่มตัว $I_{D_{sat}}$ จะมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับแรงดันที่เดรนกับซอส แต่จะขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน $(V_{GS} - V_{TH})$ ทำให้สมการเป็นไปตามคุณลักษณะของกฎกำลังสอง (Square-law Equation) ดังสมการที่ 2.12

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับมอสทรานซิสเตอร์ก็ขออธิบายพอสังเขปเพียงแค่นี้ สำหรับในบทต่อไปจะเป็นการนำเอาคุณสมบัติของมอสที่ได้กล่าวไว้ในบทนี้ไปประยุกต์ใช้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

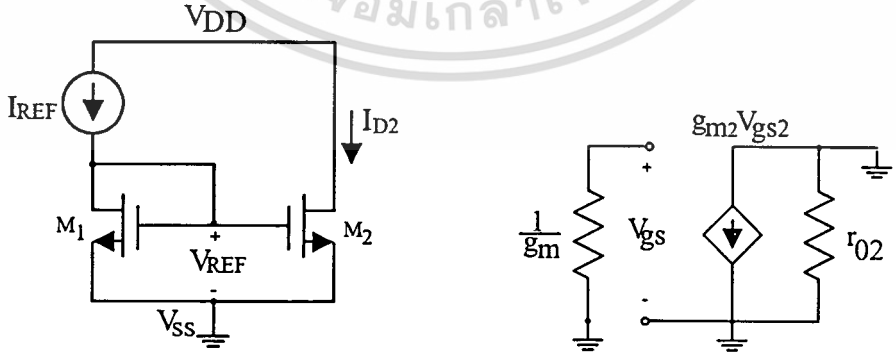
บทที่ 3
หลักการและการออกแบบวงจรความต้านทานที่เสนอ

3.1 กล่าวนำ

ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการนำเสนอวงจรความต้านทานลอยตัว ที่ประกอบขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานเม็นซ์ และมีวงจรสะท้อนกระแสเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการและวงจรความต้านทานลอยตัวที่เสนอ จึงขอกล่าวถึงวงจรและหลักการทำงานของวงจรสะท้อนกระแสก่อนพอสังเขป ก่อนที่จะนำไปใช้ในการออกแบบวงจรความต้านทานลอยตัวในลำดับต่อไป

3.2 แหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source)

การทำงานของวงจรอนาลอกโดยทั่วไป จำเป็นต้องมีการตั้งค่าหรือจัดไบอัสที่เหมาะสม เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) จึงมีความสำคัญ เพราะเป็นส่วนประกอบในการตั้งไบอัสให้กับวงจรต่างๆ โดยแหล่งจ่ายที่ดี จะต้องให้คุณสมบัติใกล้เคียงกับค่าทางอุดมคติ กล่าวคือ สามารถจ่ายกระแสได้ตามที่กำหนด โดยไม่ขึ้นกับค่าตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ใดๆ ของอุปกรณ์ [13] เช่นแรงดันที่ตกคร่อมหรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นต้น แต่แหล่งจ่ายกระแสในทางปฏิบัตินั้น จะมีความแตกต่างจากแหล่งจ่ายกระแสตามอุดมคติ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดในตัวอุปกรณ์ สำหรับแหล่งจ่ายกระแสอย่างง่ายๆที่ใช้งานในวงจรอนาลอกมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 (ก) และมีวงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 3.1(ข)



ก) ข)

รูปที่ 3.1 ก) แหล่งจ่ายกระแสอย่างง่าย ข) วงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่อย่างง่าย หรือเรียกว่าวงจรสะท้อนกระแส ซึ่งทำหน้าที่สะท้อนกระแสจากอินพุต(I_{REF})ไปยังเอาท์พุต (I_{D_2}) โดยมีรูปแบบเหมือนเดิม(ทิศทาง) แต่ขนาดหรืออัตราส่วนของกระแส ขึ้นอยู่กับการกำหนดของผู้ออกแบบ สำหรับวงจรดังรูป 3.1 ประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS จำนวน 2 ตัว M_1, M_2 ซึ่งมีความสมพงษ์กัน (ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage : V_{TH}) ค่า mobility (μ) และ oxide capacitance (C_{OX}) ฯลฯ เหมือนกัน) เมื่อสมมติให้ I_{REF} เป็นกระแสทางอินพุต และ I_{D2} เป็นกระแสทางเอาท์พุต ในการคำนวณสัญญาณขนาดใหญ่นั้นสามารถไม่คิดผลของกระแสที่ไหลในความต้านทานทางเอาท์พุต ได้ และเมื่อกำหนดให้มอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 ทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation region) สามารถเขียนสมการกระแสเดรนได้เป็น

$$I_{D1} = I_{REF} = K_1\left[\frac{W}{L}\right]_1 \left(V_{GS_1} - V_{T0_1}\right)^2 \left(1+\lambda V_{DS_1}\right) \tag{3.1}$$

$$I_{D2} = I_{OUT} = K_2\left[\frac{W}{L}\right]_2 \left(V_{GS_2} - V_{T0_2}\right)^2 \left(1+\lambda V_{DS_2}\right) \tag{3.2}$$

จากสมการ (3.1) และ (3.2) เมื่อนำมาหาค่าอัตราส่วนของกระแสเอาท์พุต I_{OUT} ต่อกระแสอินพุต I_{REF} จะได้

$$\frac{I_{OUT}}{I_{REF}} = \frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{K_2\left[\frac{W}{L}\right]_2 \left(V_{GS_2} - V_{TO_2}\right)^2 \left(1+\lambda V_{DS_2}\right)}{K_1\left[\frac{W}{L}\right]_1 \left(V_{GS_1} - V_{TO_1}\right)^2 \left(1+\lambda V_{DS_1}\right)} \tag{3.3}$$

โดย K_1 และ K_2 เป็นค่าพารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\mu_n C_{OX}}{2}$ และ λ เป็นค่า แชนแนลเลงท์มอดดูเลชัน (Channel length modulation) เมื่อสมมติว่าผลที่เกิดจากแชนแนลเลงท์มอดดูเลชันมีค่าน้อยมากๆ ($\lambda V_{DS} << 1$) จะเขียนสมการ (3.3) ได้ใหม่เป็น

$$I_{OUT} = \frac{\left[W/L\right]_2}{\left[W/L\right]_1} I_{REF} \tag{3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

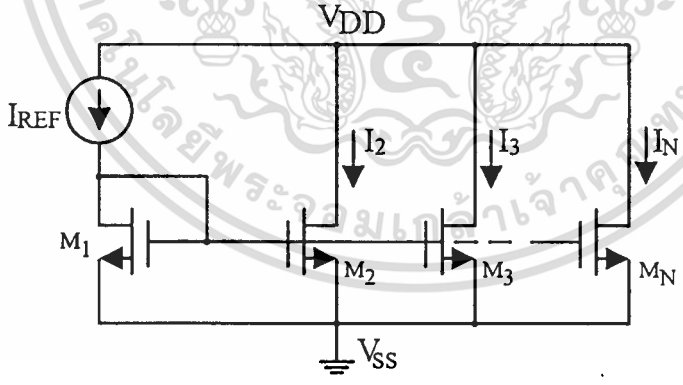
จากสมการนี้จะพบว่าในกรณีที่กำหนดให้ค่าอัตราส่วนของความกว้าง (W) ต่อความยาว (L) ของแชนแนล $\left(\frac{W}{L}\right)$ ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ค่าอัตราส่วนการขยายกระแสตามสมการ (3.4) จะมีค่าประมาณ หนึ่ง

$$\frac{I_{OUT}}{I_{REF}} = \frac{\left[W/L\right]_2}{\left[W/L\right]_1} \approx 1 \qquad (3.5)$$

หรือ $$I_{OUT} \approx I_{REF} \qquad (3.6)$$

ดังนั้นถ้าต้องการให้อัตราการสะท้อนกระแสมีค่าเป็น 1:1 โดยประมาณ จะต้องกำหนดให้ค่า Aspect ratio $\left(W/L\right)_1$ เท่ากับ $\left(W/L\right)_2$ นั่นเอง และจากสมการ (3.4) แสดงให้เห็นว่า สามารถปรับค่ากระแสเอาท์พุต I_{OUT} ได้ด้วยการปรับอัตราส่วนความกว้าง ต่อความยาวของ M_1 และ M_2

ในกรณีที่ต้องการกระแสทางเอาท์พุตมากกว่าหนึ่งทาง สามารถทำได้โดยการนำมอสทรานซิสเตอร์มาต่อเพิ่มเข้าไปดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 แหล่งจ่ายกระแสหลายเอาท์พุต

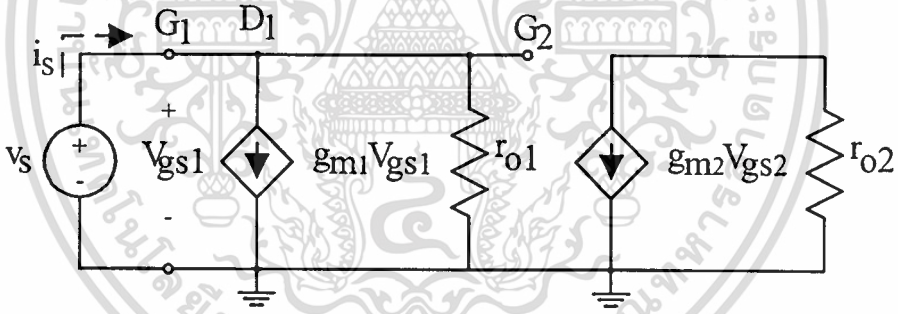
จากรูป 3.2 หากสมมติว่าใช้เงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบเดียวกับที่ผ่านมา จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.4) จะได้ค่ากระแสต่างๆ เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_k = \frac{\left(W/L\right)_k}{\left(W/L\right)_1} . I_{REF} \tag{3.7}$$

โดยที่ k = 2,3,.....N

ค่ากระแสเอาท์พุตสามารถนำไปใช้ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบของกระแสเกต ดังเช่นในกรณีของวงจรที่ใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ต้องคำนึงผลกระทบจากกระแสเบส ทั้งนี้เพราะค่ากระแสที่ไหลผ่านเกตมีค่าเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามแหล่งจ่ายกระแสแบบพื้นฐานดังรูป 3.1 และ 3.2 ก็มีข้อเสียบางประการ สำหรับวงจรที่ต้องการค่ากระแสที่ถูกต้องหรือมีอัตราขยายกระแสเป็นหนึ่ง อันเนื่องจากค่าความต้านทานที่แต่ละเอาท์พุตมีค่าจำกัด การหาค่าความต้านทานอินพุตและความต้านทานเอาท์พุตของวงจรทำได้โดยการใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal model) สำหรับวงจรรูปที่ 3.1 สามารถหาค่าความต้านทานทางด้านอินพุตโดยใช้วงจรเทียบเคียงแสดงดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของวงจรตามรูป 3.1 เพื่อหาค่าความต้านทานอินพุต

การหาค่าความต้านทานอินพุตทำได้โดยป้อนแรงดัน v_s เข้าที่อินพุต แล้วหากระแส i_s ที่ไหลผ่านวงจรจะได้

$$\begin{aligned} i_s &= \frac{v_s}{r_{01}} + g_{m1} . V_{gs_1} \\ &= \frac{v_s}{r_{01}} + g_{m1} . v_s \\ &= v_s \left(\frac{1}{r_{01}} + g_{m1} \right) \end{aligned} \tag{3.8}$$

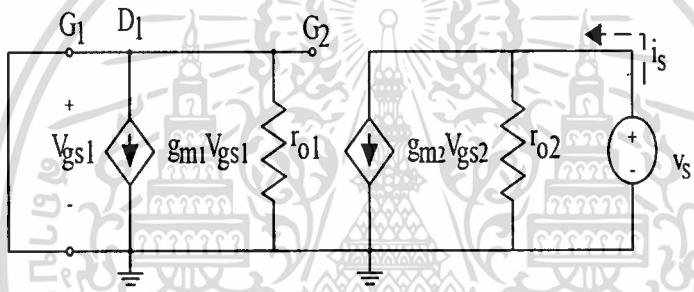
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความต้านทานอินพุตมีค่าเป็น

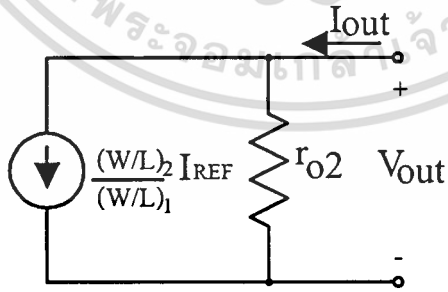
$$r_{in} = \frac{v_s}{i_s} = \frac{1}{\frac{1}{r_{01}} + g_{m1}} \tag{3.9}$$

ทำนองเดียวกัน สามารถหาค่าความต้านทานเอาท์พุต r_{out} ได้จากวงจรตามรูปที่ 3.4 ซึ่งจะมีค่าเป็น

$$r_{out} = \frac{v_s}{i_s} = r_{02} \tag{3.10}$$



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของวงจรตามรูป 3.1 เพื่อหาค่าความต้านทานเอาท์พุต

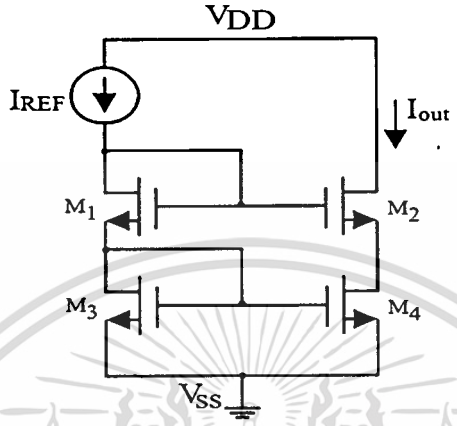


รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายกระแสทางเอาท์พุต

จะเห็นได้ว่าวงจรในรูปที่ 3.1 นั้น จะให้ค่าความต้านทานทางเอาท์พุตที่จำกัด กล่าวคือ มีค่าเป็น r_{02} ของมอสทรานซิสเตอร์ M_2 เท่านั้น ซึ่งแหล่งจ่ายมีขนาดใหญ่ แต่ค่าความต้านทานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายมีขนาดเล็ก เพื่อแก้ปัญหาในเรื่องความต้านทานทางเอาท์พุตของแหล่งจ่ายซึ่งมีค่าน้อย จึงต่อวงจรดังรูป 3.6 เรียกว่าการต่อคาสโคด (Cascode) กัน ทั้งนี้เพื่อให้ความต้านทานทางเอาท์พุตมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.6 วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด

สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานทางอินพุตและเอาท์พุตของวงจรโดยใช้เงื่อนไขรูป 3.1 จะได้ค่าความต้านทานทางอินพุต r_{in} และ ค่าความต้านทานทางเอาท์พุต r_{out} [14] เป็น

$$r_{in} = \frac{v_s}{i_s} = \frac{2}{\frac{1}{2r_o} + \frac{g_m}{2}} \tag{3.11}$$

โดย $g_{m1} = g_{m3} = g_m$

$r_{o1} = r_{o3} = r_o$

และได้ค่าความต้านทานทางเอาท์พุต r_{out} เป็น

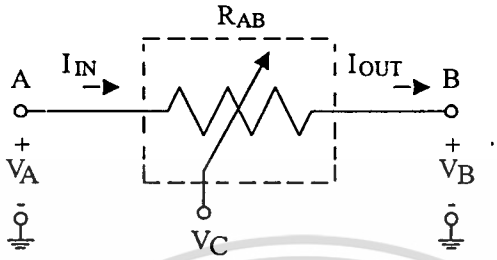
$$r_{out} = \frac{v_s}{i_s} = r_{o2} + r_{o4} + g_{m4} r_{o2} r_{o4} (1 + \eta_4) \tag{3.12}$$

จะพบว่าสมการ (3.12) ให้ค่าความต้านทานทางเอาท์พุตสูงกว่าวงจรแบบพื้นฐาน จึงให้คุณสมบัติของแหล่งจ่ายกระแสได้ดีกว่า และมีเสถียรภาพที่ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 หลักการของวงจรความต้านทานที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์

แนวคิดพื้นฐานของตัวต้านทานลอยตัวปรับค่าได้ด้วยแรงดันแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 หลักการวงจรความต้านทานลอยตัวปรับค่าได้ด้วยแรงดัน

จากรูปสมมติให้

โนด A และโนด B เป็นโนดที่ปลายทั้งสองด้านของตัวต้านทาน

I_{IN} และ I_{OUT} เป็นกระแสที่ไหลเข้าและกระแสที่ไหลออก หรือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ซึ่งจากคุณสมบัติของตัวต้านทาน จะได้ว่า

$$I_{IN} = I_{OUT} \tag{3.13}$$

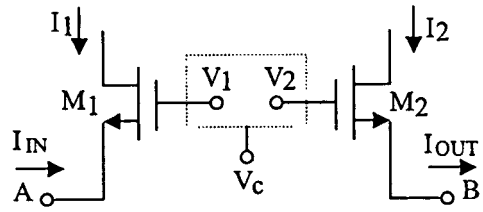
V_C เป็นค่าแรงดันใช้สำหรับควบคุมหรือปรับเปลี่ยนค่าความต้านทาน

เมื่อกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่โนด A สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่โนด B หรือกล่าวได้ว่า $V_A > V_B$ ดังนั้นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า จะไหลจากโนด A ไปยังโนด B ดังรูปที่ 3.7 และสามารถเขียนสมการค่าความต้านทานได้เป็น

$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_{IN}} = \frac{V_A - V_B}{I_{OUT}} \tag{3.14}$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำหลักการดังกล่าวข้างต้นนี้มาออกแบบสร้างความต้านทาน โดยเริ่มจากการนำเอามอสทรานซิสเตอร์มาต่อกันดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

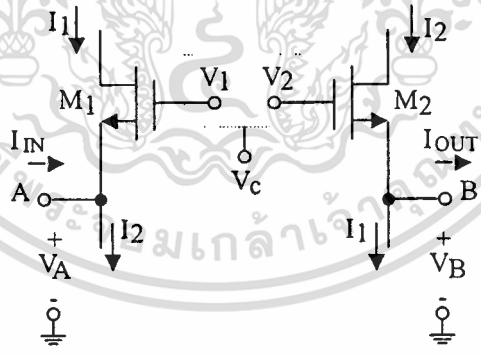


รูปที่ 3.8 โครงสร้างวงจรความต้านทานลอยตัวปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์

จากรูป 3.8 ยังคงกำหนดให้โนด A และโนด B คือจุดปลายทั้งสองของตัวต้านทาน และสมมติว่าศักย์ไฟฟ้าที่ A (V_A) มีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ B (V_B) มอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 เป็นชนิด NMOS โดยกำหนดให้ M_1 และ M_2 ทำหน้าที่สร้างกระแส I_1 และ I_2 ตามลำดับ และให้กระแสไหลเข้าที่โนด A และไหลออกที่โนด B ในที่นี้กำหนดให้กระแสอินพุต (I_{IN}) มีค่าเป็น

$$I_{IN} = I_2 - I_1 = I_{OUT} \tag{3.15}$$

ดังนั้นวงจรในรูปที่ 3.8 จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น รูปที่ 3.9



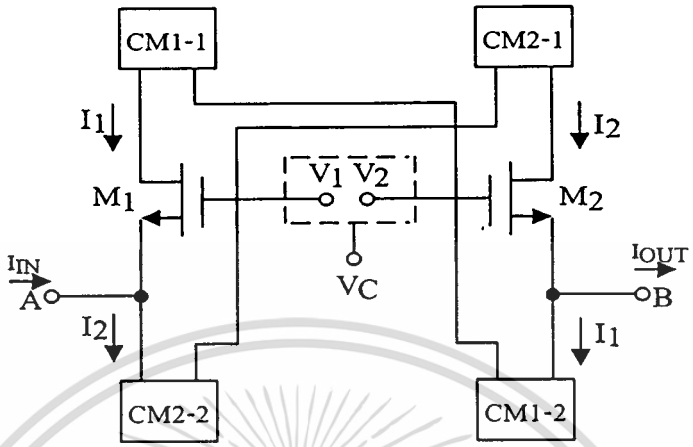
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของกระแส I_{IN} และ I_{OUT}

ในกรณีนี้ ถ้าพิจารณาจากรูป 3.7 เทียบกับรูปที่ 3.9 แล้วจะพบว่า M_1 และ M_2 ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวต้านทาน (R) นั่นเอง

เพื่อทำให้กระแสอินพุตเป็นไปตามสมการ $I_{IN} = I_2 - I_1$ จึงต้องทำการสะท้อนกระแส I_2 ให้มาปรากฏทางด้านอินพุต และในทำนองเดียวกันเพื่อให้ค่ากระแสทางด้านเอาท์พุตมีค่าเป็น $I_{OUT} = I_2 - I_1$ ด้วย จึงต้องทำการสะท้อนกระแส I_1 ไปยังเอาท์พุต ซึ่งจะได้ลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจรเป็นดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.10 โดยในที่นี้ตัวสะท้อนกระแสทุกตัวมีอัตราการสะท้อนกระแสเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจรความต้านทานที่รวมส่วนการสะท้อนกระแส I_1 และ I_2

โดย

$CM1-1$ และ $CM1-2$ ทำหน้าที่สะท้อนกระแส I_1 ให้ได้เงื่อนไขที่กำหนด

$CM2-1$ และ $CM2-2$ ทำหน้าที่สะท้อนกระแส I_2 ให้ได้เงื่อนไขที่กำหนด

ต่อไปพิจารณาการจัดไบอัสแก่ M_1 และ M_2 โดยกำหนดให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิ่มตัว ในที่นี้กำหนดให้ V_1 และ V_2 เป็นแรงดันไบอัสแก่ M_1 และ M_2 ตามลำดับ

สมการกระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์ในช่วงอิ่มตัว คือ

$$I_D = \frac{K}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_{GS} - V_T\right)^2 \tag{3.16}$$

โดยที่ K คือ ค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (Transconductance)ของมอสทรานซิสเตอร์ มีค่าเท่ากับ

μC_{OX}

μ คือ ค่าความคล่องตัวที่ผิว (Surface Mobility)

C_{OX} คือ ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์

W คือ ความกว้างของแชนแนล

L คือ ความยาวของแชนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_T = ค่าแรงดันขีดเริ่ม ในที่นี้ได้ กำหนดให้ขาซอสกับขาซับสเตทต่อถึงกันทำให้ $V_{SB} = 0$ เพื่อลดผลของ body effect

และจากรูปที่ 3.10 ได้กำหนดให้

$$V_{GS_{M_1}} = V_1 - V_A \tag{3.17}$$

$$V_{GS_{M_2}} = V_2 - V_B \tag{3.18}$$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ตามสมการ (3.16) ถึงสมการ (3.18) จะสามารถหาค่ากระแส I_1 และ I_2 ได้เป็น

$$I_1 = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_1 - V_A - V_{T_n}\right)^2 \tag{3.19}$$

$$I_2 = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_2 - V_B - V_{T_n}\right)^2 \tag{3.20}$$

โดยในที่นี้ K_n คือค่าทรานคอนดัคแตนซ์ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล

V_{T_n} คือค่าแรงดันเทรชโฮลของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล

แทนค่า I_1 และ I_2 จากสมการ (3.19) และ (3.20) ลงในสมการ (3.15) จะได้

$$I_{IN} = I_2 - I_1 = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_2 - V_B - V_{T_n}\right)^2 - \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_1 - V_A - V_{T_n}\right)^2$$

$$= \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left[\left(V_2 - V_B - V_{T_n}\right)^2 - \left(V_1 - V_A - V_{T_n}\right)^2\right] \tag{3.21}$$

สมการ(3.21) อยู่ในเทอมยกกำลังสองลบกัน สามารถใช้สูตร

$$X^2 - Y^2 = (X - Y)(X + Y) \tag{3.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสมการที่(3.21) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_2 - I_1 = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left[\left(V_2 - V_1 - V_B + V_A\right)\left(V_1 + V_2 - V_B - V_A - 2V_{T_n}\right)\right] \quad (3.23)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$I_2 - I_1 = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left[\left(V_1 + V_2 - V_A - V_B - 2V_{T_n}\right)\left(V_2 - V_1 + V_A - V_B\right)\right] \quad (3.24)$$

พิจารณา ค่าแรงดัน V_1 และ V_2 ซึ่งเป็นแรงดันไบอัสให้แก่มอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 และกำหนดให้ทำงานในช่วงอิ่มตัว เมื่อสมมติให้มีแรงดัน V_K เป็นส่วนหนึ่งของแรงดันที่ปรับเปลี่ยนค่าในการสร้างกระแส I_1 และ I_2 จึงกำหนดให้

$$V_1 = V_B - V_K \quad (3.25)$$

$$V_2 = V_A - V_K \quad (3.26)$$

จากสมการ (3.25) และสมการ (3.26) จะได้ว่า

$$V_1 + V_2 = V_A + V_B - 2V_K \quad (3.27)$$

และ

$$V_2 - V_1 = V_A - V_B \quad (3.28)$$

แทนค่าสมการ (3.27) และ (3.28) ลงในสมการ (3.24) จะได้

$$I_2 - I_1 = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left[\left(V_A + V_B - V_A - V_B - 2V_K - 2V_{T_n}\right)\left(V_A - V_B + V_A - V_B\right)\right]$$

$$= \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left[\left(-2V_K - 2V_{T_n}\right)\left(2\left(V_A - V_B\right)\right)\right] \quad (3.29)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_2 - I_1 \quad = 2K_n\left(\frac{W}{L}\right)\left[\left(-V_K - V_{T_n}\right)\left(V_A - V_B\right)\right] \tag{3.30}$$

และ

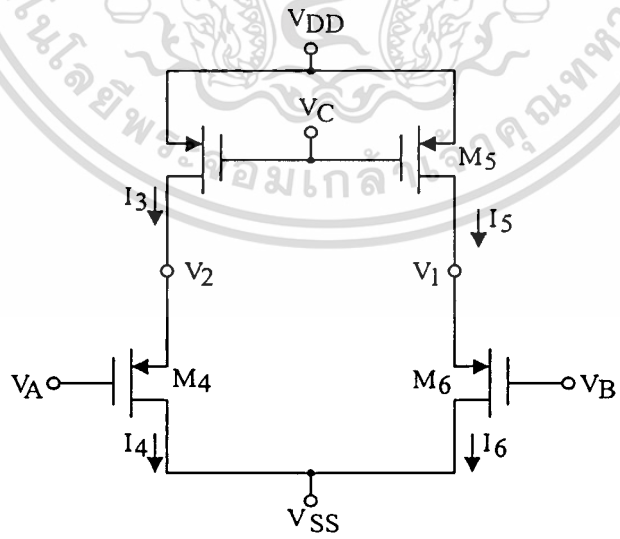
$$\frac{V_A - V_B}{I_2 - I_1} \quad = \quad \frac{1}{2K_n\left(\frac{W}{L}\right)\left(-V_K - V_{T_n}\right)} \tag{3.31}$$

ซึ่งค่า $\frac{V_A - V_B}{I_2 - I_1}$ ก็คือค่าความต้านทานเสมือนที่มองจากขั้ว A ไปยังขั้ว B นั่นเอง ดังนั้นจะได้

$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_2 - I_1} = \frac{1}{2K_n\left(\frac{W}{L}\right)\left(-V_K - V_{T_n}\right)} \tag{3.32}$$

จากสมการ (3.32) จะพบว่าค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเป็นบวก โดยค่าความต้านทานดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่า $\left(\frac{W}{L}\right)$ ค่าทรานคอนดัคแตนซ์ K_n และสามารถปรับค่าได้ด้วยแรงดัน V_K

พิจารณาค่าของแรงดัน V_K ซึ่งเป็นแรงดันที่ใช้ควบคุมค่าความต้านทาน R_{AB} ในสมการที่(3.32) พบว่าเป็นส่วนของชุดที่ทำหน้าที่จัดไบอัสแก่มอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 ผ่านทางแรงดัน V_1 และ V_2 ดังนั้นจึงได้ออกแบบวงจรไบอัสให้มีลักษณะดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 การจัดไบอัสแก่มอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 ใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี(PMOS) จำนวน 4 ตัวโดยให้ทุกตัวทำงานในช่วงอิ่มตัว เพื่อสร้างแรงดัน V_1 และ V_2 โดยแรงดัน V_1 ใช้จัดไบอัสแก่ M_1 และแรงดัน V_2 ใช้จัดไบอัสแก่ M_2 โดยแรงดัน V_2 นี้สร้างขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์สองตัวคือ M_3 และ M_4 ที่ต่อกันดังรูป โดยเมื่อกำหนดให้ มอสทรานซิสเตอร์ M_3 และ M_4 มีความสมพงษ์กัน จะได้สมการกระแสเดรนดังนี้

$$I_3 = \frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left((V_{DD}-V_C)+V_{T_p}\right)^2 \tag{3.33}$$

$$I_4 = \frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left((V_2-V_A)+V_{T_p}\right)^2 \tag{3.34}$$

เนื่องจาก

$$I_3 = I_4 \tag{3.35}$$

ดังนั้น

$$\frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left((V_{DD}-V_C)+V_{T_p}\right)^2 = \frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left((V_2-V_A)+V_{T_p}\right)^2 \tag{3.36}$$

$$V_{DD}-V_C+V_{T_p} = V_2-V_A+V_{T_p} \tag{3.37}$$

$$V_{DD}-V_C = V_2-V_A \tag{3.38}$$

จะได้ค่าแรงดัน V_2 เป็น

$$V_2 = V_{DD}-V_C+V_A \tag{3.39}$$

ในทำนองเดียวกันค่าแรงดัน V_1 จากรูป 3.11 สร้างขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีสองตัวคือ M_5 และ M_6 โดยกำหนดให้มอสทรานซิสเตอร์ M_5 และ M_6 มีความสมพงษ์กัน และทำงานในช่วงอิ่มตัวจะสามารถหาค่าของแรงดัน V_1 ได้จาก

$$I_5 = \frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left((V_{DD}-V_C)+V_{T_p}\right)^2 \tag{3.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_6 = \frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left((V_1 - V_B) + V_{T_p}\right)^2 \tag{3.41}$$

เนื่องจาก

$$I_5 = I_6 \tag{3.42}$$

ดังนั้น

$$\frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left((V_{DD} - V_C) + V_{T_p}\right)^2 = \frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left((V_1 - V_B) + V_{T_p}\right)^2 \tag{3.43}$$

$$V_{DD} - V_C + V_{T_p} = V_1 - V_B + V_{T_p} \tag{3.44}$$

$$V_{DD} - V_C = V_1 - V_B \tag{3.45}$$

ซึ่งจะได้

$$V_1 = V_{DD} - V_C + V_B \tag{3.46}$$

จากค่าของ V_1 และ V_2 จากสมการ (3.39) และ (3.46) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าของ V_1 และ V_2 จากสมการ (3.25) และ (3.26) จะได้ว่าค่าของแรงดัน V_K ที่สมมติขึ้น คือ

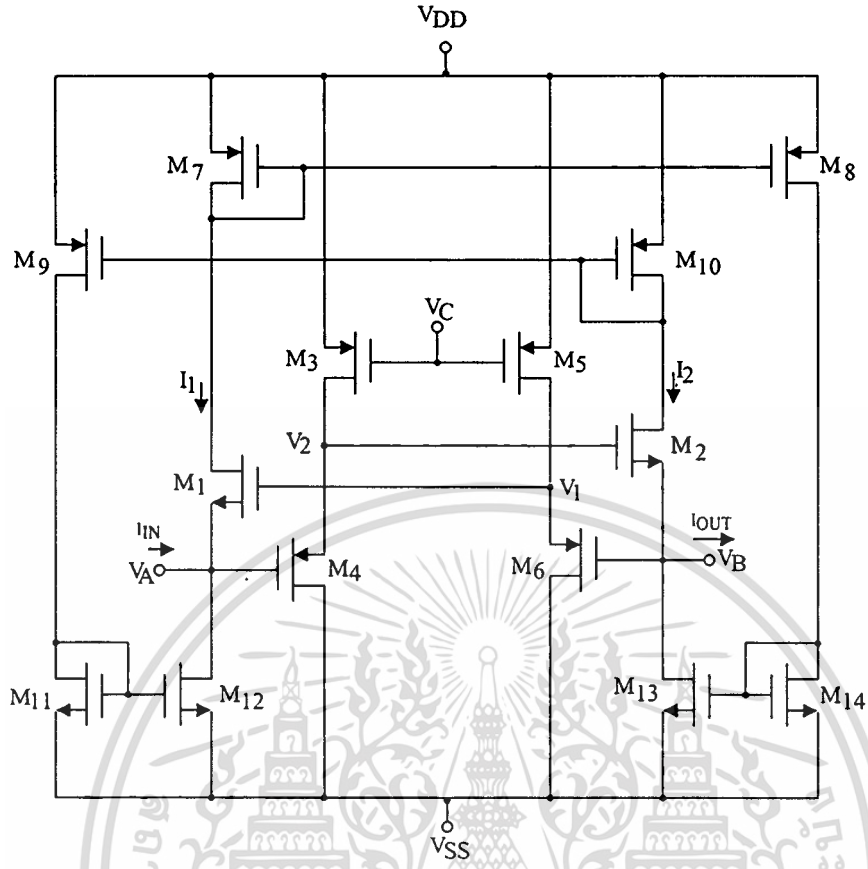
$$V_K = V_C - V_{DD} \tag{3.47}$$

แทนค่าแรงดัน V_K ลงในสมการที่ (3.32) จะได้ค่าความต้านทาน R_{AB} เป็น

$$R_{AB} = \frac{1}{2K_n\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_{DD} - V_C - V_{T_n}\right)} \tag{3.48}$$

จากสมการ (3.48) นี้จะพบว่าค่าความต้านทานที่ได้สามารถปรับค่าได้ด้วยแรงดัน V_C และสามารถเขียนรูปวงจรสมบูรณ์ของวงจรความต้านทานลอยตัวที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS ตามแนวคิดที่กล่าวมา ได้ดังรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบบวก ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่สร้างจาก NMOS

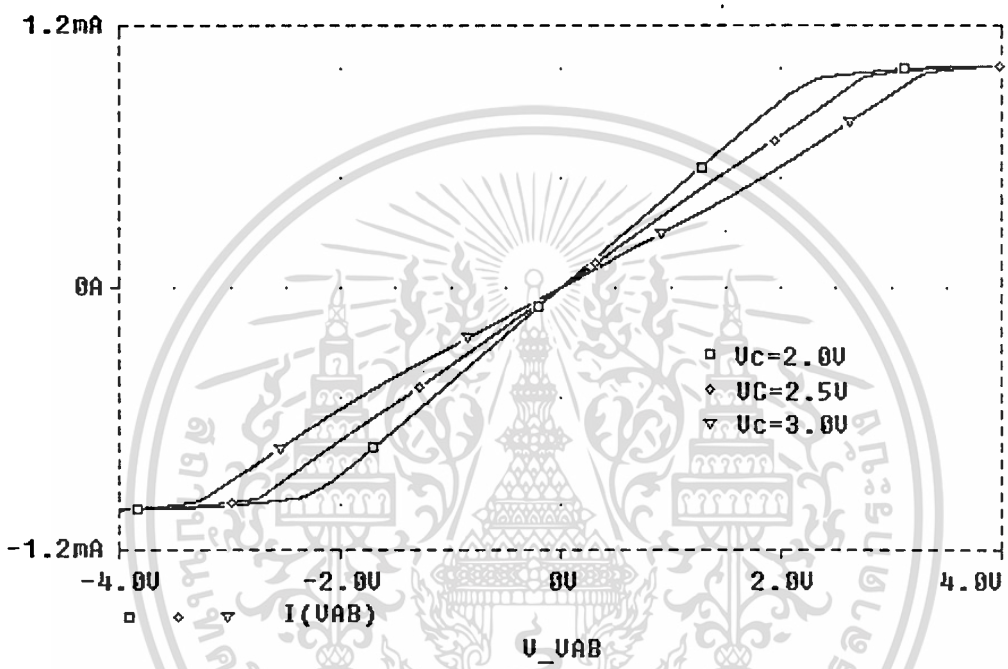
จากหลักการและการทำงานของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่กล่าวมา เพื่อตรวจสอบการทำงาน จึงได้ทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้ค่า Aspect ratio $\left(\frac{W}{L}\right)$ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าอัตราส่วน $\left(\frac{W}{L}\right)$ ของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้จำลองการทำงาน

มอสทรานซิสเตอร์	ค่า $W/L(\mu m)$
M_1-M_2	24/10
M_3-M_6	4/4
M_7-M_{14}	60/18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใช้ Model parameter ที่เป็นแบบจำลองของเทคโนโลยีซีมอส โดยมีค่าต่างๆแสดงในภาคผนวก ก. โดยในการจำลองนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟ $V_{DD}=5V$ และ $V_{SS}=-5V$ เพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน $\left(I_{IN}=I_{AB}=I_2-I_1\right)$ กับแรงดันระหว่างโนด A และโนด B $\left(V_{AB}\right)$ และทำการปรับค่าแรงดันควบคุม V_C ค่าต่างๆกัน ได้ผลจากการจำลองดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ของค่ากระแส I_{AB} และแรงดัน V_{AB} ของวงจรรูปที่ 3.12

เมื่อสังเกตจากผลการจำลองการทำงานที่ได้ในรูปนี้จะพบว่า กราฟให้ทิศทางของแรงดันและทิศทางของกระแสที่สัมพันธ์สอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อแรงดันมีค่าเป็น บวก กระแสก็มีค่าเป็นบวก และเมื่อแรงดันมีค่าเป็นลบ ก็จะได้ค่ากระแสที่มีค่าเป็นลบด้วย ดังนั้นจึงให้ความสัมพันธ์ของกราฟเป็นความต้านทานแบบลอยตัว ที่มีความเป็นเชิงเส้นแบบบวก และค่าความต้านทานสามารถปรับค่าได้โดยค่าปรับค่าแรงดัน V_C และข้อมูลที่ได้จากผลการจำลองการทำงานในรูปนี้จะถูกนำไปใช้ในการอธิบายการออกแบบวงจรใหม่ในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การปรับปรุงหรือการขยายช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานให้กว้างขึ้น

ผลการจำลองการทำงานดังรูปที่ 3.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของกระแส I_{AB} และแรงดัน V_{AB} พบว่าเส้นกราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นที่มีค่าความชัน (Slope) เป็น $\frac{I_{AB}}{V_{AB}}$ ซึ่งหมายถึงค่าความนำ (Transconductance : G) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าส่วนกลับของค่าความต้านทาน (R) นั่นเอง กล่าวคือ

$$G_{AB} = \frac{I_{AB}}{V_{AB}} = \frac{1}{R_{AB}} \tag{3.49}$$

พิจารณาจากเส้นกราฟที่ได้ทุกเส้นจากรูปที่ 3.13 จะพบว่ามีช่วงอิ่มตัวของกระแส I_{AB} อยู่ที่ประมาณ $\pm 1mA$ แต่ถ้าพิจารณาค่าของแรงดันอินพุต V_{AB} แล้วจะพบว่าถึงแม้จะมีค่ากระแสอิ่มตัวที่ $\pm 1mA$ เช่นเดียวกัน แต่ช่วงของแรงดันอินพุตแต่ละเส้นจะไม่เท่ากัน หรือ กล่าวได้ว่าแต่ละเส้นสามารถใช้กับแรงดันอินพุตได้ไม่เท่ากัน นั่นคือเส้นที่โน้มเอียงไปทางแกน V_{AB} มาก ก็จะสามารถรับแรงดันอินพุตได้สูงขึ้น ในขณะที่ค่ากระแส I_{AB} ยังคงอิ่มตัวอยู่ที่ $\pm 1mA$ ซึ่งเป็นสิ่งที่ดี เพราะสามารถนำไปใช้กับวงจรที่มีแรงดันอินพุตสูงได้ เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของค่าแรงดันอินพุต V_{AB} เทียบกับค่าความชันหรือค่าความนำ (G_{AB}) จะพบว่าแรงดันอินพุตจะมีค่ามากขึ้นหรือใช้งานได้กว้างขึ้น ในขณะที่ค่าของความชันหรือค่าความนำมีค่าน้อยลง โดยจากรูป 3.13 พบว่ายิ่งความชันมีค่ามาก (เส้นที่อยู่ใกล้แกนกระแส I_{AB}) ค่าของแรงดันอินพุตใช้งานก็มีค่าน้อย ($\pm 1V$) แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าความชันของกราฟมีค่าลดลง (เส้นที่อยู่ใกล้แกน V_{AB}) ก็จะได้ช่วงของแรงดันอินพุตที่กว้างขึ้นหรือมีค่ามากขึ้นนั่นเอง จึงกล่าวได้ว่าค่าความชันหรือค่าความนำแปรผกผันกับค่าแรงดันอินพุตใช้งาน V_{AB} นั่นคือ ถ้าต้องการให้ความต้านทานที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้งานที่แรงดันอินพุตได้กว้างขึ้นหรือสูงขึ้น สิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคือการทำให้ค่าความชันหรือค่าความนำ G_{AB} มีค่าน้อยๆ นั่นเอง

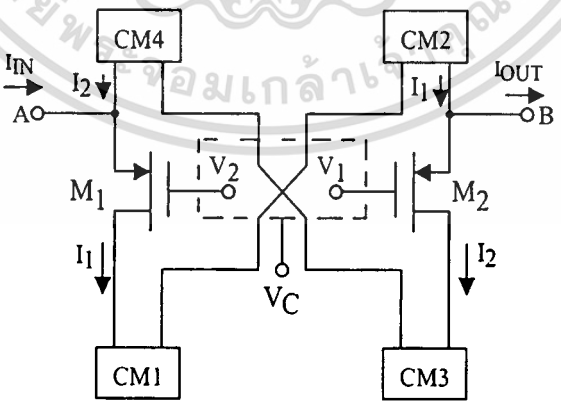
เมื่อพิจารณาสมการของค่าความต้านทาน R_{AB} ที่สร้างขึ้นก่อนหน้านี้ ในรูปของค่าความนำ G_{AB} จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$G_{AB} = 2K_n\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_{DD} - V_C - V_{T_n}\right) \tag{3.50}$$

สมการ (3.50) ค่าความนำจะมีค่าลดน้อยลง ขึ้นอยู่กับค่าของ แหล่งจ่ายไฟ V_{DD} , แรงดันควบคุมการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทาน V_C , ค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{T_n} ค่าทรานคอนดัคแตนซ์ K_n ซึ่งเป็น

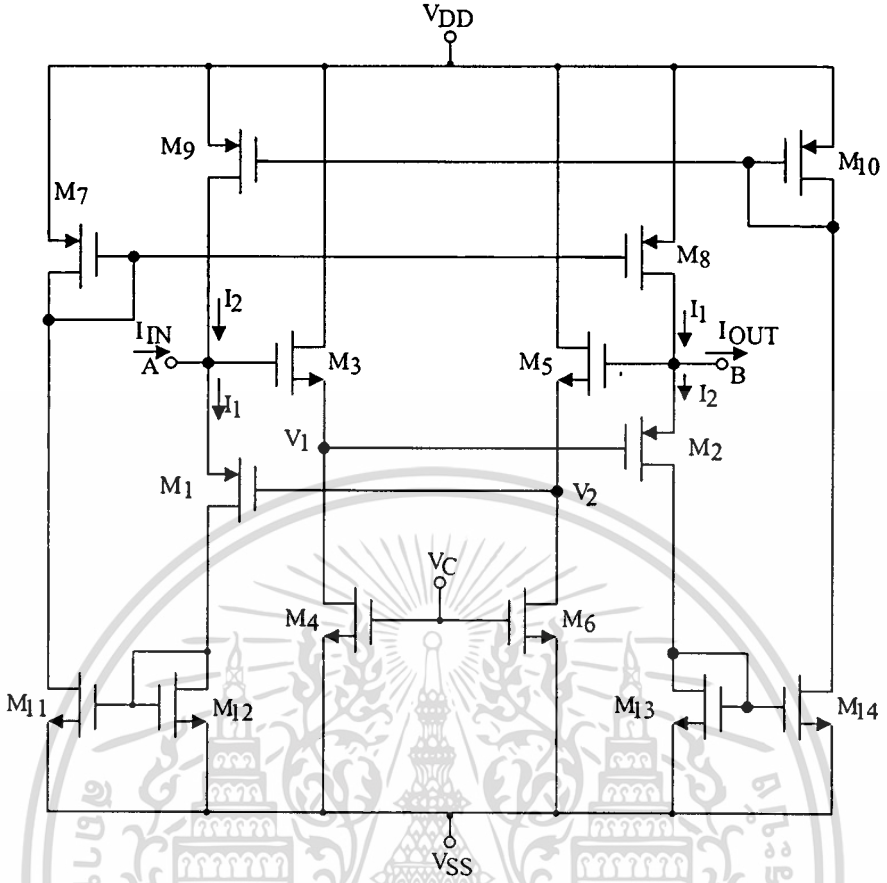
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์ และ ค่า Aspect ratio $\left(\frac{W}{L}\right)$ แต่ถ้าหากพิจารณาว่าต้องการให้วงจรยังคงมีค่าของแรงดัน V_{DD} , V_C เท่าเดิม นั่นคือยังคงใช้แหล่งจ่ายไฟที่ $\pm 5V$ และค่า Aspect ratio $\left(\frac{W}{L}\right)$ ค่าเท่าเดิม จะพบว่าค่าความนำหรือค่าความชัน G_{AB} จะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ทรานคอนดัคแตนซ์ K_n ของมอสทรานซิสเตอร์เป็นหลัก ที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงค่าของความชันได้ และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าค่าทรานคอนดัคแตนซ์ พารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด พี-แชนแนล (P-Ch) จะมีค่าน้อยกว่าแบบ เอ็น-แชนแนล (N-Ch) อยู่ประมาณ สองเท่า ซึ่งเมื่อนำมาแทนค่าลงในสมการ (3.50) แล้วจะทำให้ได้ค่าความนำหรือค่าความชัน G_{AB} มีค่าน้อยลง ได้ผลตรงกับความต้องการ นั่นคือจะทำให้ช่วงของแรงดันอินพุตมีค่ากว้างขึ้นหรือมากขึ้น และถ้านำข้อสมมุติฐานของหลักการ หรือแนวคิดนี้ไปสร้างเป็นความต้านทานแทนวงจรเดิมที่ได้กล่าวไปแล้ว ก็สามารถนำไปใช้งานในช่วงปฏิบัติงานของแรงดันอินพุตที่กว้างขึ้นกว่าเดิมได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำหลักการหรือแนวคิดดังกล่าวมาทำการดัดแปลงวงจรความต้านทานที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้น โดยนำมอสทรานซิสเตอร์แบบพี-มอส (PMOS) มาใช้ซึ่งต่อจากนี้ไปจะเรียกวงจรที่สร้างด้วยมอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS ว่า “วงจรที่ 1” และวงจรที่ได้ทำการดัดแปลงขึ้นมาใหม่โดยนำ PMOS มาใช้ว่า “ วงจรที่ 2” และเนื่องจากวงจรความต้านทานถูกดัดแปลงใหม่โดยนำ PMOS มาใช้ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบวงจรในส่วนการจัดไบอัสใหม่ด้วย ซึ่งบล็อกไดอะแกรม และวงจรสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดในการวิเคราะห์วงจรมีลักษณะเหมือนกับที่ได้อธิบายไปแล้วในส่วนของวงจรที่ 1



รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรความต้านทานลอยตัวปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่ปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบบวก ที่เสนอการปรับปรุง

หลักการทำงานของวงจร

จากรูป กำหนดให้

M_1 และ M_2 เป็นมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) ที่มีความสมพงษ์กัน ทำหน้าที่สร้างกระแส I_1 และ I_2 ตามลำดับ

M_3 , M_4 , M_5 , M_6 ทำหน้าที่จัดไบอัส แก่มอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2

M_7 - M_{14} ทำหน้าที่สะท้อนกระแส เพื่อให้ได้เงื่อนไขของกระแสตามสมการ และมีอัตราการสะท้อนกระแสเป็น 1: 1

กำหนดให้มอสทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation) และให้ขาซอส (Source) กับขาฐานรอง (Substrate or Bulk or Body) ของมอสทรานซิสเตอร์ทุกตัวต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการลดผลของ Body effect ลง

กระแสเดรนทำงานในช่วงอิ่มตัวใช้กับมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี จะได้สมการกระแส I_1 และ I_2 เป็น

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = \frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_A - V_2 + V_{T_p}\right)^2 \quad (3.51)$$

$$I_2 = \frac{K_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_B - V_1 + V_{T_p}\right)^2 \quad (3.52)$$

การออกแบบ สำหรับวงจรในรูปที่ 3.15 กำหนดกระแส I_{AB} มีค่าเป็น

$$I_{AB} = I_{IN} = I_{OUT} = I_1 - I_2 \quad (3.53)$$

จะได้

$$I_{AB} = I_1 - I_2 = \frac{K_P}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_1 - V_2 + V_A - V_B\right)\left(V_A + V_B - V_1 - V_2 + 2V_{T_p}\right) \quad (3.54)$$

ในทำนองเดียวกัน การจัดไบอัสของวงจรก็ใช้หลักการเดียวกับที่ผ่านมาแสดงได้ดังรูป 3.15 พิจารณาในส่วนของแรงดัน V_1 และ V_2

V_1 และ V_2 เป็นแรงดันในส่วนการจัดไบอัสแก่มอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 ซึ่งหาได้จากชุดของ M_3 และ M_4 ที่เป็นมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นมอส (NMOS) กำหนดให้ M_3 และ M_4 มีความสมพงษ์กัน จะได้

$$I_3 = I_4 \quad (3.55)$$

$$\frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_A - V_1 - V_{T_n}\right)^2 = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_C - V_{SS} - V_{T_n}\right)^2 \quad (3.56)$$

จะได้ $$V_1 = V_A - V_C + V_{SS} \quad (3.57)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าของแรงดัน V_2 จะได้จากชุดของมอสทรานซิสเตอร์ M_5 และ M_6 ที่มีความสมพงษ์กัน ได้กระแส I_5 และ I_6 เป็น

$$I_5 = I_6 \quad (3.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_B - V_2 - V_{T_n}\right)^2 = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_C - V_{SS} - V_{T_n}\right)^2 \quad (3.59)$$

จะได้ $$V_2 = V_B - V_C + V_{SS} \quad (3.60)$$

นำค่า V_1 และ V_2 จากสมการ (3.57) และ (3.60) แทนลงในสมการ(3.54) จะได้

$$I_{AB} = 2K_p\left(V_A - V_B\right)\left(V_C - V_{SS} + V_{TP}\right) \quad (3.61)$$

สมการ (3.61)นี้ จะได้ค่าความต้านทานเสมือน ที่อยู่ระหว่างขั้วโนด A และโนด Bของวงจรคือ

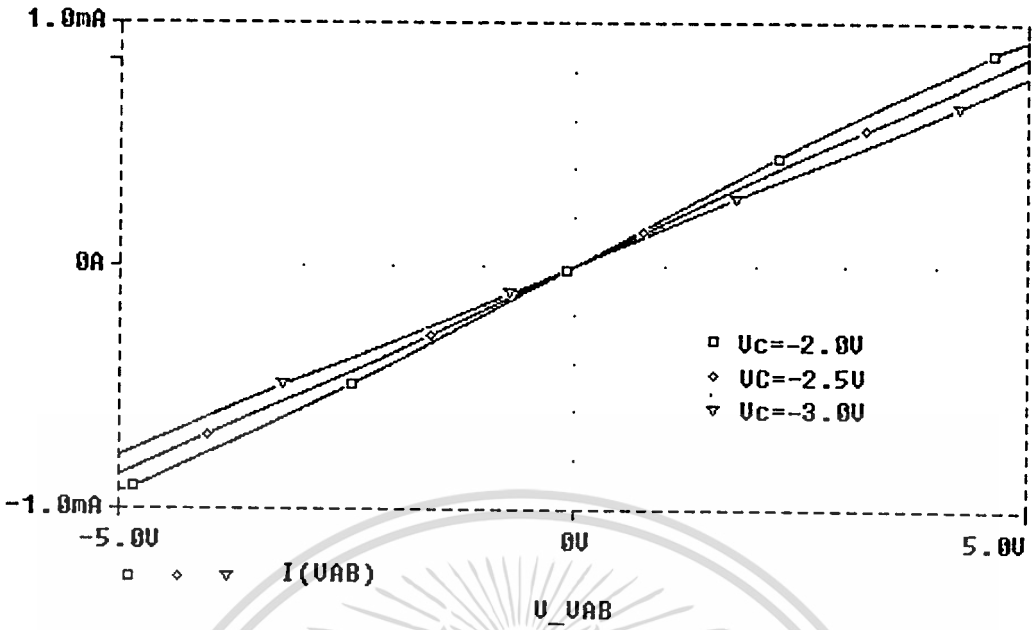
$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_{AB}} = \frac{V_A - V_B}{2K_p\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_C - V_{SS} + V_{T_p}\right)\left(V_A - V_B\right)} \quad (3.62)$$

$$R_{AB} = \frac{1}{2K_p\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_C - V_{SS} + V_{T_p}\right)} \quad (3.63)$$

สมการ(3.63) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวงจรตามรูปที่ 3.15 สามารถเลียนแบบเป็นความต้านทานแบบลอยตัว ที่มีความเป็นเชิงเส้นแบบบวก โดยค่าของความต้านทานขึ้นอยู่กับค่า K_p ทรานคอนดัตแตนซ์ ,ค่า Aspect ratio $\left(\frac{W}{L}\right)$ และค่าแรงดัน $\left(V_C - V_{SS} + V_{T_p}\right)$ สามารถควบคุมได้ด้วยแรงดัน V_C โดยแรงดัน V_C เป็นแรงดันที่ใช้ปรับเปลี่ยนค่าการไบอัส เป็นผลให้ค่าความต้านทานที่สร้างขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของแรงดัน จึงได้ชื่อว่าความต้านทานปรับค่าได้ด้วยแรงดันนั่นเอง

เพื่อตรวจสอบผลหรือแนวคิดที่ได้เสนอในการปรับปรุงช่วงปฏิบัติงานแรงดันอินพุตให้กว้างขึ้น (Wide -Dynamic Range) ด้วยวิธีการดังกล่าว จึงทำการจำลองการทำงานของวงจรตามรูปที่ 3.15 ด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้ค่าอัตราส่วน Aspect ratio $\left(\frac{W}{L}\right)$ ค่าเดียวกันกับในตารางที่ 1 และใช้ Model parameter ที่เป็นแบบจำลองเทคโนโลยีของซีมอส โดยมีค่าต่างๆดังภาคผนวก ก เช่นเดียวกัน และใช้แหล่งจ่ายไฟ V_{DD} และ V_{SS} เป็น $\pm 5V$ ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับวงจรที่ 1 ได้ความสัมพันธ์ของกระแส I_{AB} และค่าแรงดัน V_{AB} เป็นดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของกระแส I_{AB} และค่าแรงดัน V_{AB} ของวงจรความต้านทานที่ปรับปรุง

ความสัมพันธ์ของกระแส I_{AB} และค่าแรงดัน V_{AB} ของรูปที่ 3.16 ของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่ได้ปรับปรุงขึ้น โดยใช้มอสทรานซิสเตอร์แบบพีมอส (PMOS) แทนมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นมอส (NMOS) โดยใช้ค่าอัตราส่วน Aspect ratio $\left(\frac{W}{L}\right)$ และ Model parameter ค่าเดียวกันกับวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกวงจรที่ 1 ที่สร้างขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS ดังวงจรรูปที่ 3.12 เพื่อเปรียบเทียบ ให้เห็นถึงแนวคิดที่เป็นข้อสมมุติฐานเบื้องต้น ในการปรับปรุงหรือขยายช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานให้สามารถกว้างขึ้นได้ พร้อมทั้งให้ความเป็นเชิงเส้นที่สูงมาก สามารถดูได้จากผลการจำลองดังกล่าว

ผลการจำลองที่ได้จากรูป 3.16 พบว่าเส้นกราฟจะมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของแรงดัน $\pm 5V$ ซึ่งวงจรความต้านทานที่ได้เสนอการปรับปรุงนี้สามารถนำไปใช้กับวงจรที่มีช่วงแรงดันอินพุตสูง อาจจะไม่ต้องมีการเพิ่มเติมวงจรใดๆ ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เพราะวงจรที่เสนอการปรับปรุงนี้ให้ผลของช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานได้ดีกว่า และการนำไปใช้งานก็สามารถใช้งานได้กว้างกว่า เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของแรงดันอินพุตใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การดัดแปลงวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก เป็นแบบลบ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกทั้งสองวงจร กล่าวคือ วงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่สร้างจาก NMOS ซึ่งเรียกว่า "วงจรที่ 1" และวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่สร้างจาก PMOS ซึ่งเรียกว่า "วงจรที่ 2" ทั้งสองวงจรมาทำการดัดแปลงให้เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดของการดัดแปลงแต่ละกรณี ในลำดับต่อไปนี้

3.5.1 วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ได้จากการดัดแปลง วงจรที่ 1

หลักการทำงานของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ปรับค่าได้ด้วยแรงดันของวงจรที่ 1 (รูปวงจรที่ 3.12) ได้สมการค่าความต้านทาน R_{AB} เป็น

$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_{IN}} = \frac{V_A - V_B}{I_{OUT}} \tag{3.64}$$

$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_2 - I_1} \tag{3.65}$$

โดยกำหนดกระแสเป็น

$$I_{IN} = I_{OUT} = I_2 - I_1 \tag{3.66}$$

การดัดแปลงวงจรความต้านทานแบบบวกเป็นแบบลบ สามารถทำได้โดยการพิจารณาทิศทางการไหลของกระแสให้เป็นตรงข้ามหรือสวนทางจากเดิม โดยที่ยังคงให้โครงสร้างภายในของวงจรความต้านทานเป็นเช่นเดิมไม่เปลี่ยนแปลง และยังคงให้ค่าของแรงดัน $V_A \rangle V_B$ เช่นเดิม ดังนั้นจะได้สมการค่าความต้านทาน R_{AB} กรณีเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบเป็น

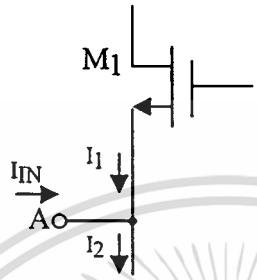
$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{-(I_2 - I_1)} \tag{3.67}$$

สมการ (3.67) เมื่อนำมาเทียบกับสมการความต้านทานแบบบวก (3.65) จะเห็นว่าเทอมต่างๆ ยังคงเหมือนเดิม เพียงแต่มีเครื่องหมายลบที่เพิ่มเติมเข้ามา บอกให้ทราบว่าทิศทางการไหลของกระแสนั้นไหลสวนทางกับกรณีแรกที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก จึงทำให้ค่าความต้านทานที่ได้มีค่าเป็นลบ ดังนั้นวงจรความต้านทานที่ได้จึงเป็นความต้านทานลอยตัวแบบลบนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_2 - I_1} \tag{3.68}$$

หลักการดัดแปลงของวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวก วงจรที่ 1



รูปที่ 3.17 ทิศทางการไหลของกระแสกรณีกระแส I_{IN} ไหลเข้าที่โนด A

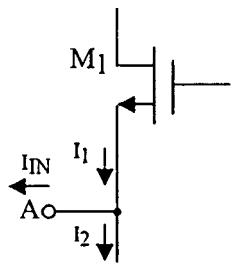
จากรูป เป็นหลักการทำงานของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ของวงจรที่1 ที่กล่าวมาโดยแสดงเฉพาะส่วนของภาคอินพุตที่กระแสไหลเข้าที่โนด A ซึ่งสมการกระแสที่กำหนดมีค่าเป็น

$$I_{IN} = I_2 - I_1 \tag{3.69}$$

แต่สิ่งที่ต้องการคือให้กระแสไหลสวนทางจากเดิมหรือไหลออกที่โนด A ไม่ใช่ไหลเข้า และต้องให้สมการของกระแสยังคงเหมือนเดิม นั่นคือ

$$-I_{IN} = I_2 - I_1 \tag{3.70}$$

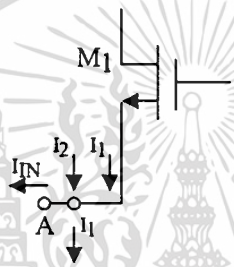
ซึ่งจากทิศทางการไหลของกระแสที่แสดงในสมการที่ (3.70) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ทิศทางการไหลของกระแสตามสมการที่ (3.70)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.18 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าทิศทางการไหลของกระแส I_{IN} นั้นไหลสวนทางกับรูปที่ 3.17 แล้ว ดังนั้นถ้าพิจารณาให้ทิศทางการไหลของกระแส I_{IN} ออกจากโนด A เป็นบวก จะได้ว่าทิศทางการไหลของกระแส I_1 และ I_2 ในสมการที่ (3.70) ต้องมีทิศตรงข้ามกับที่เป็นอยู่ในขณะนี้ ซึ่งพบว่าไม่สอดคล้องตามรูปที่ 3.18 ซึ่งดูเสมือนว่ามอสทรานซิสเตอร์ M_1 สร้างกระแส I_2 มิใช่ I_1 จึงต้องพิจารณาใหม่โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณา 2 ประการคือ ประการแรกต้อง คงลักษณะของวงจรภายใน นั่นคือ M_1 ต้องสร้างกระแส I_1 และประการที่ 2 ทิศทางการไหลของกระแสเป็นไปตามสมการ I_{IN} ที่ได้ตามสมการ (3.69) เมื่อพิจารณาตาม KCL คือ กระแส I_2 ต้องไหลเข้าสู่โนด A ส่วนกระแส I_1 และกระแส I_{IN} ต้องไหลออกเท่านั้น แต่ตามโครงสร้างกระแส I_1 ที่สร้างจาก M_1 นั้นมีทิศทางไหลเข้าสู่โนด A ดังนั้นการดัดแปลงจึงทำได้ดังรูป 3.19



รูปที่ 3.19 การจัดวางตำแหน่งของกระแส I_2 ใหม่

สมการกระแสที่โนด A ของรูปที่ 3.19 จะได้

$$I_{IN} = I_2 + I_1 - I_1 \tag{3.71}$$

จากสมการ (3.71) ที่ได้ ปรากฏว่ามีเทอมของกระแส I_1 เกินมาจึงต้องเพิ่มเทอม $-I_1$ เพื่อทำให้สมการกระแสตรงกับสมการ (3.69)

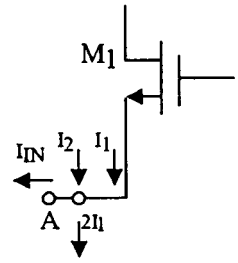
$$I_{IN} = I_2 + I_1 - I_1 - I_1 \tag{3.72}$$

จะได้

$$I_{IN} = I_2 + I_1 - 2I_1 \tag{3.73}$$

นำสมการ (3.73) มาเขียนทิศทางการไหลของกระแสต่างๆ ตามกฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะแสดงได้ดังรูป 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



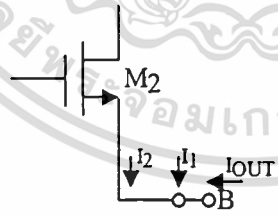
รูปที่ 3.20 ทิศทางการไหลของกระแส $2I_1$ เพื่อให้เงื่อนไขกระแส I_{IN} ไหลออก ที่โนด A

จากโนด A ขณะนี้จะพบว่าสามารถทำให้กระแส I_{IN} มีการกลับทิศทางการไหลได้ตามต้องการแล้ว โดยยังคงลักษณะของโครงสร้างภายในไว้เช่นเดิม

ในทำนองเดียวกันกระแสที่โนด B จะต้องทำให้มีการไหลสวนทางกับกรณีของวงจรบวกโดยคงยึดหลักการเช่นเดียวกับการแก้ไขทิศทางการไหลของกระแสที่โนด A กล่าวคือโครงสร้างภายในของตัวต้านทานต้องไม่เปลี่ยนแปลงดังนั้นสมการกระแสที่โนด B จะเป็น

$$-I_{OUT} = I_2 - I_1 \tag{3.74}$$

สมการ (3.74) เมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ จะได้ทิศทางการไหลของกระแสเปลี่ยนไปจากเดิมดังรูป 3.21



รูปที่ 3.21 ทิศทางการไหลของกระแสต่างๆที่โนด B ตามสมการ (3.74)

จากรูป 3.21 สามารถเขียนสมการกระแส I_{OUT} ได้เป็น

$$I_{OUT} + I_2 + I_1 = 0 \tag{3.75}$$

หรือ

$$I_{OUT} = -I_2 - I_1 \tag{3.76}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

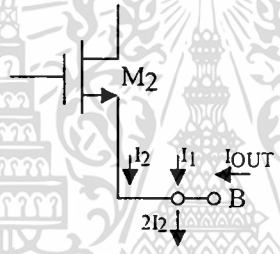
สมการ(3.76) ปรากฏว่าได้รูปแบบของสมการถูกต้อง แต่ค่ากระแสของ I_2 ติดลบ จึงต้องหาเทอมมาเพิ่มในสมการเพื่อมาหักล้างแล้วทำให้กระแส I_2 มีค่าเป็นบวก เทอมดังกล่าวคือ $+2I_2$ ซึ่งจะได้

$$I_{OUT} = -I_2 - I_1 + 2I_2 \tag{3.77}$$

จะได้

$$I_{OUT} = I_2 - I_1 \tag{3.78}$$

จากสมการกระแส (3.77) เมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ ทิศทางกระแสที่ไหลเข้าสู่โนด B มีกระแส I_{OUT} , I_1 และ I_2 ส่วนกระแส $2I_2$ จะมีทิศทางไหลออกจากโนด B ดังนั้นจะสามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ของกระแสที่โนด B ได้ดังรูป 3.22

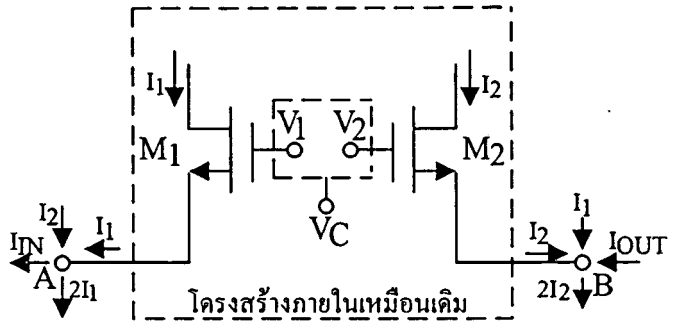


รูปที่ 3.22 ทิศทางการไหลของกระแส $2I_2$ เพื่อให้เงื่อนไขกระแส I_{OUT} ไหลเข้าที่โนด B

และจากการดัดแปลงดังกล่าว จะได้ทิศทางการไหลของกระแส I_{OUT} ที่โนด B เปลี่ยนไปเป็นการไหลเข้าแทน และไม่ทำให้โครงสร้างของวงจรความต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆทั้งสิ้น

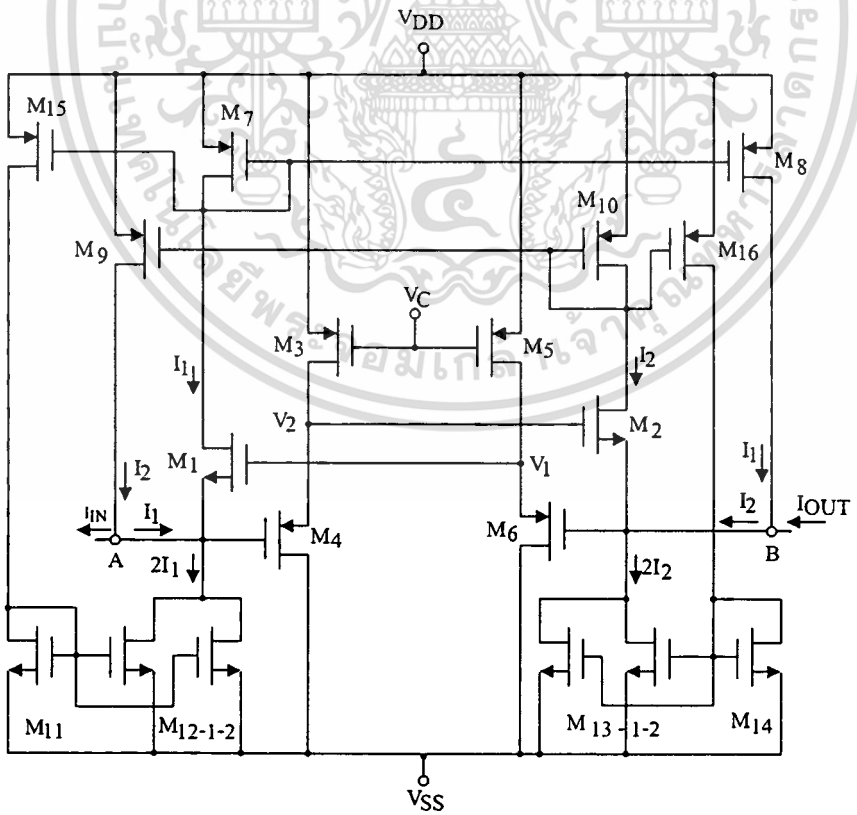
จากหลักการดัดแปลงวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ให้เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ ที่ได้กล่าวมา สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ 1 ที่ดัดแปลงเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ

จากบล็อกไดอะแกรม จะเห็นได้ว่าทิศทางการไหลของกระแส I_{IN} และกระแส I_{OUT} ที่โนด A และโนด B ตามลำดับ นั้นไหลสวนทางกับรูป 3.14 ที่เป็นวงจรความต้านทานแบบบวก จึงกล่าวได้ว่าวงจรที่ได้นี้ทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานแบบลบ นั่นเอง และพบว่าจะต้องทำการจัดวางตำแหน่งของการสะท้อนกระแส I_1 และ I_2 ใหม่ และต้องทำการสะท้อนกระแส I_1 และ I_2 ให้มีการสะท้อนกระแสเป็น 2 เท่า นั่นคือ $2I_1$ และ $2I_2$ เพื่อให้ได้เงื่อนไขเป็นไปตามสมการที่ได้กล่าวมา ซึ่งจะได้รูปวงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ดัดแปลงแล้วเป็นดังรูปที่ 3.24

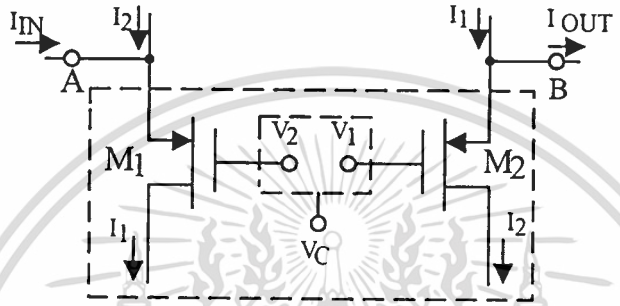


รูปที่ 3.24 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ดัดแปลง จากวงจรที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ได้จากการดัดแปลง วงจรที่ 2

สำหรับวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ที่ปรับค่าได้ด้วยแรงดันในวงจรที่ 2 ที่เสนอการปรับปรุงวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกของวงจรที่ 1 เพื่อให้มีช่วงปฏิบัติงานแรงดันอินพุตได้กว้างขึ้นนั้น สามารถที่จะนำมาดัดแปลงให้เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบได้เช่นกัน โดยใช้หลักการแบบเดียวกับการดัดแปลงของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกของวงจรที่ 1 เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ ดังกล่าว ซึ่ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.25 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก วงจรที่ 2 ก่อนดัดแปลง

จากหลักการและบล็อกไดอะแกรมของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ของวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 3.25 สมการกระแสที่ได้กำหนดไว้สามารถเขียนได้เป็น

$$I_{IN} = I_{OUT} = I_1 - I_2 \tag{3.79}$$

โดยทิศทางการไหลของกระแสกำหนดให้มีการไหลเข้าที่โนด A และไหลออกที่โนด B และที่ผ่านมาได้พิสูจน์แล้วว่าวงจรที่ได้นั้น ทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่ปรับ ค่าได้ด้วยแรงดัน และมีสมการค่าความต้านทานเป็นดังนี้

$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_1 - I_2} \tag{3.80}$$

โดยการดัดแปลงค่าความต้านทานที่ได้ให้เป็นแบบลบนั้น จะทำการดัดแปลงเฉพาะในส่วนของทิศทางการไหลของกระแสเท่านั้นด้วยการจัดรูปแบบใหม่ ซึ่งจากเดิมกระแสจะไหลเข้าที่โนด A ก็จัดใหม่เป็นการไหลออกแทน แต่ยังคงลักษณะของโครงสร้างภายในของการสร้างความต้านทาน ด้วยมอสทรานซิสเตอร์ดังรูปวงจรที่ 2 นั่นคือมีมอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 เป็นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

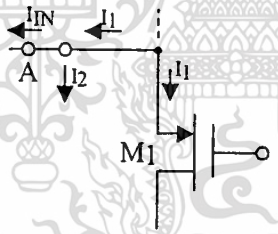
สร้างกระแส I_1 และ I_2 ตามลำดับ และให้ค่าแรงดัน $V_A \rangle V_B$ และสมการของกระแสก็ยังคงมีค่าเป็น $I_1 - I_2$ เช่นเดิม จะได้สมการค่าความต้านทานที่มีค่าเป็นลบดังนี้

$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{-(I_1 - I_2)} \tag{3.81}$$

ดังนั้นรูปที่ 3.25 จะต้องทำให้กระแสอินพุตมีทิศทางที่ไหลออกจากโนด A มิใช่การไหลเข้า และเพื่อให้สมการและโครงสร้างของความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงจึงยังคงใช้สมการกระแสมีค่าเป็น $I_1 - I_2$ เช่นเดิม กล่าวคือ

$$-I_{IN} = I_1 - I_2 \tag{3.82}$$

และจากกฎกระแสของเคอร์ชอฟ ที่โนด A จะมีกระแสไหลออกจากโนดถึง 2 กระแสด้วยกันคือ กระแส I_{IN} และ I_2 แต่กระแส I_1 จะต้องมีทิศทางการไหลเข้าสู่โนด A เป็นดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ทิศทางการไหลของกระแส I_{IN} ที่โนด A

เปรียบเทียบทิศทางการไหลของกระแส ในรูปที่ 3.26 กับ 3.25 พบว่าเดิมกระแส I_2 นั้นมีทิศพุ่งเข้าหรือไหลเข้าโนด A ก็เปลี่ยนตำแหน่งมาเป็นการพุ่งออกหรือการไหลออกจากโนด A แทน และการไหลของกระแส I_1 พบว่ามีสองทางด้วยกันกล่าวคือไหลเข้า M_1 ที่เป็นตัวสร้างกระแส I_1 ทางหนึ่ง และอีกทางหนึ่งก็ไหลเข้าสู่โนด A สามารถเขียนสมการกระแสได้เป็น

$$I_{IN} + I_1 + I_2 = I_1 \tag{3.83}$$

หรือ

$$I_{IN} = I_1 - I_2 - I_1 \tag{3.84}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3.84) ปรากฏว่ามีเทอมของกระแส I_1 เกินมา 1 เทอมและมีค่าติดลบ จึงต้องหาเทอมมากำจัดให้หมดไป นั่นคือค่ากระแส $+I_1$ นำค่าดังกล่าวแทนในสมการ(3.84) ก็จะได้สมการของกระแสมีค่าตามที่ต้องการ

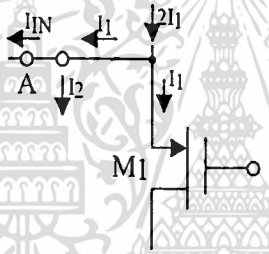
$$I_{IN} = I_1 - I_2 - I_1 + I_1 \tag{3.85}$$

$$= 2I_1 - I_1 - I_2 \tag{3.86}$$

จะได้

$$I_{IN} = I_1 - I_2 \tag{3.87}$$

และสามารถเขียนรูปแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆ ได้เป็นดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ทิศทางของกระแส $2I_1$ ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อให้เงื่อนไขกระแส I_{IN} ไหลออกที่โนด A

สมการ (3.86) สามารถเขียนทิศทางการไหลของกระแสในส่วนต่างๆได้ดังรูป 3.27 พบว่าได้ทิศทางการไหลของกระแสจะไหลกลับทางหรือไหลสวนทางจากเดิมของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ในวงจรที่ 2 จึงกล่าวได้ว่าวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกที่ได้ดัดแปลงแล้วนี้ ทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ ตามต้องการ

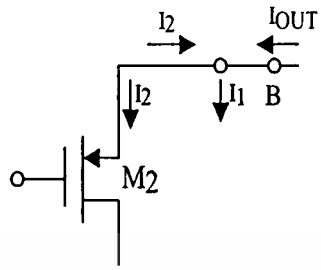
ลำดับต่อไปเป็นการกล่าวถึงการดัดแปลงทิศทางการไหลของกระแสที่โนด B

สำหรับที่ โนด B จะต้องทำให้กระแส I_{OUT} เดิมที่มีการไหลออก เปลี่ยนเป็นการไหลเป็นไหลเข้าที่โนด B แทน และต้องคงลักษณะของสมการของกระแสที่ได้กำหนดไว้แต่แรก คือ

$$-I_{OUT} = I_1 - I_2 \tag{3.88}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะเดียวกันมอสทรานซิสเตอร์ M_2 ซึ่งเป็นตัวสร้างกระแส I_2 และมีทิศทางการไหลของกระแสจากขาซอสไปยังขาเดรน ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ทิศทางการไหลของกระแสตามสมการ (3.88) และทิศทางกระแส I_2 ที่สร้างจาก M_2

จากรูปที่ 3.28 สามารถเขียนสมการโดยอาศัยกฎกระแสเคอร์ชอฟ ได้ดังนี้

$$I_{OUT}+I_2 = I_1+I_2 \tag{3.89}$$

หรือ

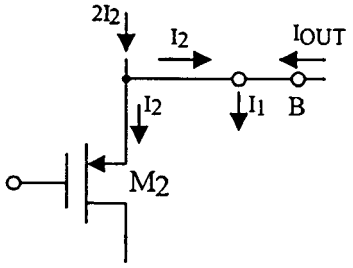
$$I_{OUT} = I_1+I_2-I_2 \tag{3.90}$$

โดยสมการ (3.90) ที่ได้ พบว่าค่าของกระแส I_{OUT} มีเทอมของกระแส I_2 เกินมาและมีค่าเป็น $+I_2$ จึงต้องหาเทอมมาหักล้าง ซึ่งในที่นี้คือ $-I_2$ เมื่อนำมาแทนลงในสมการ (3.90) จะได้สมการกระแส I_{OUT} ที่โนด B จะมีค่าเป็น

$$I_{OUT} = I_1+I_2-2I_2 \tag{3.91}$$

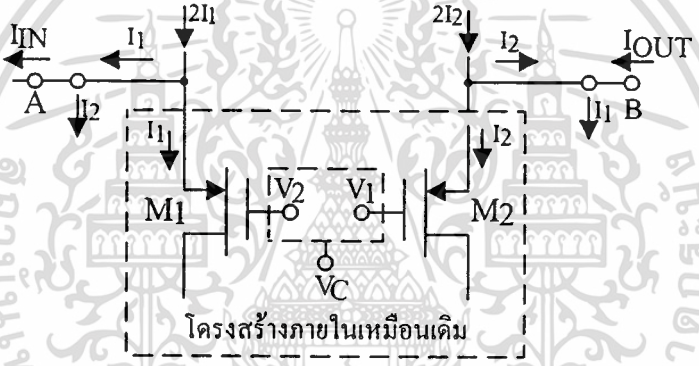
ซึ่งจะได้ค่ากระแสเป็นไปตามสมการที่(3.88) ตามที่ต้องการ เมื่อพิจารณาค่าของกระแสต่างๆในสมการที่ (3.91) แล้วจะพบว่าทิศทางของกระแส $2I_2$ มีทิศทางเดียวกับกระแส I_{OUT} คือไหลเข้า ส่วนกระแส I_1 และ I_2 จะมีทิศทางไหลออก ดังรูป 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 ทิศทางของกระแส $2I_2$ ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อให้เงื่อนไขกระแส I_{OUT} ไหลเข้าที่โนด B

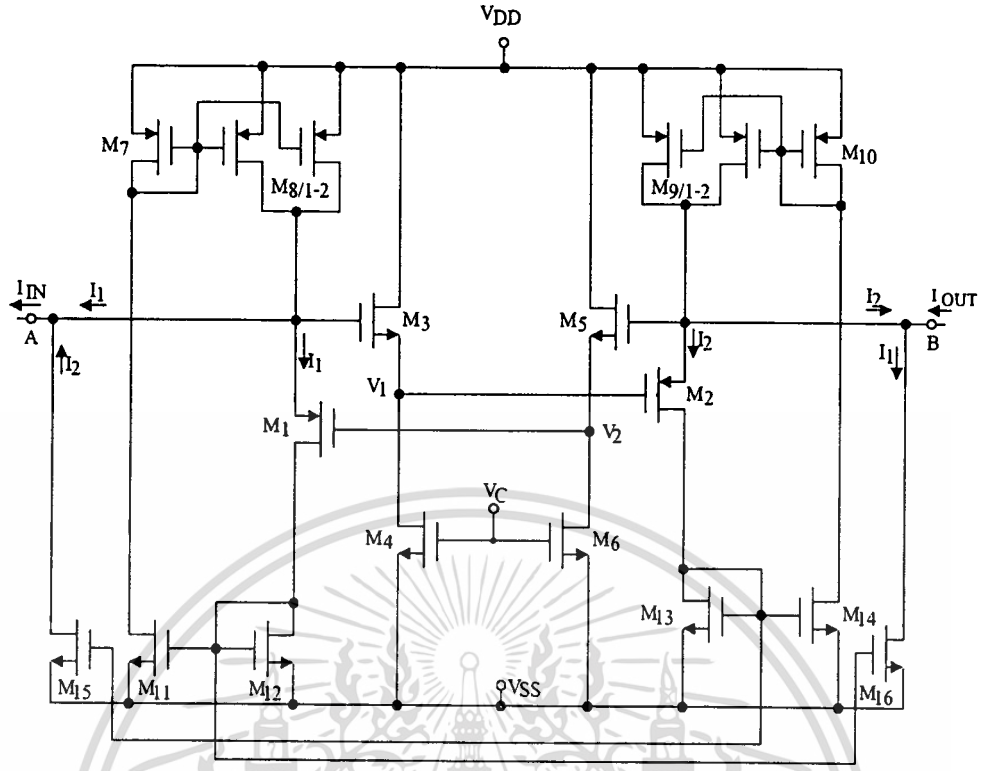
จากการดัดแปลงวงจรที่ได้กล่าวมา สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 บล็อกไดอะแกรม วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ ที่ดัดแปลงจาก วงจรที่ 2

และจากบล็อกไดอะแกรม จะเห็นว่าต้องทำการจัดวางตำแหน่งของการสะท้อนกระแส I_1 และ I_2 ใหม่ และต้องทำการสะท้อนกระแส I_1 และ I_2 ให้มีการสะท้อนกระแสเป็น 2 เท่า นั่นคือ $2I_1$ และ $2I_2$ เพื่อให้ได้เงื่อนไขเป็นไปตามสมการที่ได้กล่าวมา และจะได้รูปวงจรที่สมบูรณ์ของวงจรความต้านทานลอยตัวที่ดัดแปลงเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ แสดงดังรูปที่ 3.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

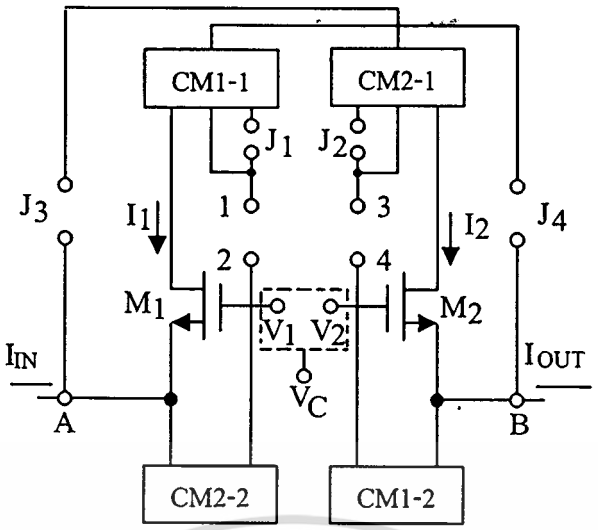


รูปที่ 3.31 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวแบบลบ ที่ดัดแปลง จากวงจรที่ 2

3.6 การพัฒนาวงจรความต้านทานลอยตัว ให้สามารถทำงานได้ทั้งแบบบวก และ แบบลบ ภายในวงจรเดียวกัน

จากที่ผ่านมาได้กล่าวถึง วงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกทั้งชนิดที่สร้างขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี(PMOS) และการนำวงจรมาดัดแปลงให้สามารถทำงานเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ โดยการพิจารณาให้กระแสไหลสวนทางจากเดิม เมื่อทำการดัดแปลงวงจรดังกล่าวแล้วจะพบว่าโครงสร้างภายในของวงจรยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม ไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 3.23 และรูปที่ 3.30 ตามลำดับ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการนำไปต่อใช้งานและประหยัดจำนวนอุปกรณ์ ของวงจรความต้านทานลอยตัวทั้งแบบบวกและแบบลบ เมื่อพิจารณาโครงสร้างสามารถที่จะยุบรวมวงจรให้เป็นวงจรเดียวกันได้ ซึ่งภายในวงจรสามารถเป็นได้ทั้งวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกหรือจะเลือกให้ทำงานเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบก็ได้ โดยการจัดรูปวงจรและทำการเพิ่มเติมจุดตัด-ต่อภายในวงจร ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.32 กรณีของวงจรความต้านทานลอยตัวของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.37 กรณีของวงจรความต้านทานลอยตัวของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกและแบบลบ ภายในวงจรเดียวกัน ชนิด NMOS

รายละเอียด

J_1 ถึง J_4 เป็นส่วนตัด- ต่อวงจรเมื่อต้องการทำเป็นวงจรแบบบวก หรือแบบลบ

กรณีวงจรความต้านทานแบบบวก ให้ปลด J_1 ถึง J_4 ออก

กรณีวงจรความต้านทานแบบลบ ให้ต่อจุดต่อ J_1 ถึง J_4 ทั้งหมด

จุดต่อหมายเลข 1 , 2 , 3 , 4 เป็นจุดต่อวงจรเมื่อต้องการทำเป็นวงจรแบบบวก หรือแบบลบ

กรณีเป็นวงจรความต้านทานแบบบวก นำจุดต่อหมายเลข 1 ต่อกับ จุดต่อหมายเลข 4 และจุดต่อหมายเลข 2 ต่อกับ จุดต่อหมายเลข 3

กรณีเป็นวงจรความต้านทานแบบลบ นำจุดต่อหมายเลข 1 ต่อกับ จุดต่อหมายเลข 2 และจุดต่อหมายเลข 3 ต่อกับ จุดต่อหมายเลข 4

CM1-1 ทำหน้าที่สะท้อนกระแส I_1 ให้มีขนาดเป็น 1 : 1 หรือ 1 : 2

CM1-2 ทำหน้าที่สะท้อนกระแส I_1 หรือ I_2 ให้ปรากฏที่โนด B

CM2-1 ทำหน้าที่สะท้อนกระแส I_2 ให้มีขนาดเป็น 1 : 1 หรือ 1 : 2

CM2-2 ทำหน้าที่สะท้อนกระแส I_2 หรือ I_1 ให้ปรากฏที่โนด A

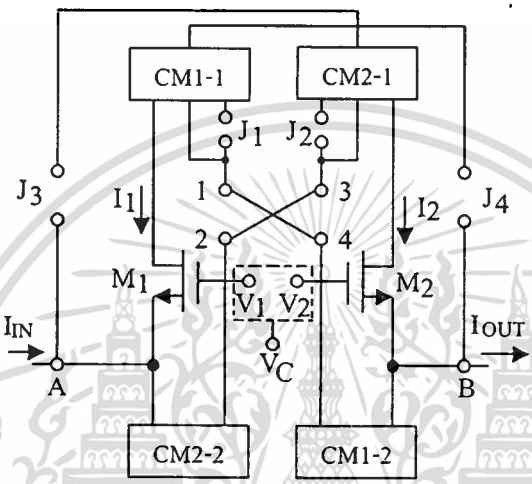
เงื่อนไขของกระแสที่ต้องการทั้งวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกและแบบลบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{IN} \doteq I_2 - I_1 = I_{OUT} \tag{3.92}$$

3.6.1 การกำหนดให้ทำงานเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก

ทำได้โดยการต่อจุดต่อหมายเลข 1 เข้ากับจุดต่อหมายเลข 4 และ
จุดต่อหมายเลข 2 เข้ากับจุดต่อหมายเลข 3
ดังรูปบล็อกไดอะแกรมที่ 3.33



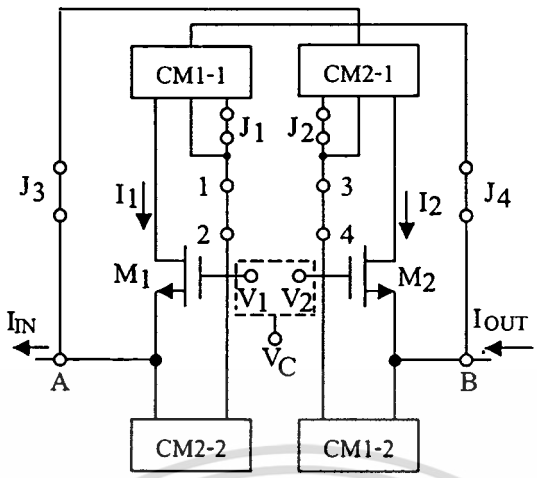
รูปที่ 3.33 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบวก

จากรูป กระแส I_{IN} มีทิศพุ่งเข้าโนด A และกระแส I_{OUT} มีทิศพุ่งออกที่โนด B โดยมี CM1-1 และ CM1-2 จะทำหน้าที่ สะท้อนกระแส I_1 ให้ปรากฏที่โนด B ทำให้กระแส I_{OUT} มีค่าเป็น $I_2 - I_1$
CM2-1 และ CM2-2 จะทำหน้าที่ สะท้อนกระแส I_2 ให้ปรากฏที่โนด A ทำให้ได้กระแส I_{IN} มีค่าเป็น $I_2 - I_1$ ตามต้องการ

3.6.2 การกำหนดให้ทำงานเป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ

พิจารณาจากรูปบล็อกไดอะแกรมที่ 3.32 เมื่อต้องการให้วงจรทำหน้าที่เป็นความต้านทานลอยตัวแบบลบ จะต้องทำให้กระแสไหลสวนทางจากเดิม กล่าวคือ ทิศทางการไหลของกระแส I_{IN} จะต้องพุ่งออกจากโนด A และทิศทางของกระแส I_{OUT} ต้องพุ่งเข้าที่โนด B เพื่อให้ได้ดังสมการที่ 3.92 ทำได้โดย การเชื่อมต่อจุดต่อ J_1 ถึง J_4 ทั้งหมด และทำการเชื่อมต่อจุดต่อหมายเลข 1 เข้ากับจุดต่อหมายเลข 2 และเชื่อมต่อจุดต่อหมายเลข 3 เข้ากับจุดต่อหมายเลข 4 ดังรูปบล็อกไดอะ แกรมที่ 3.34

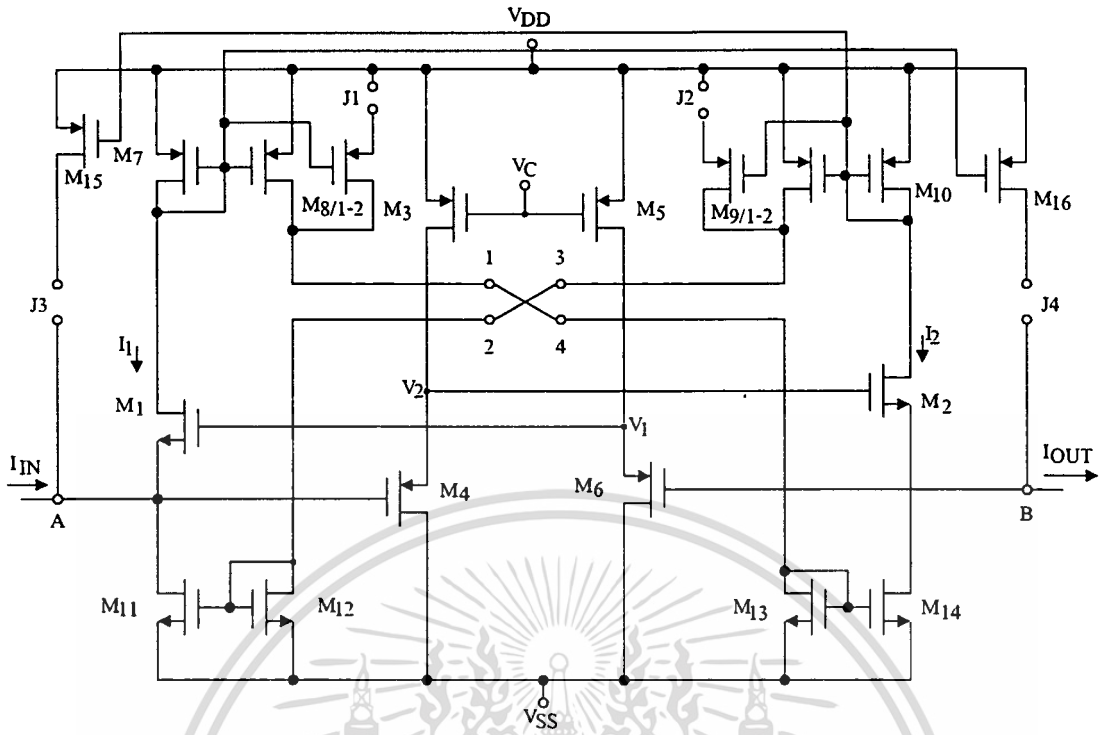
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



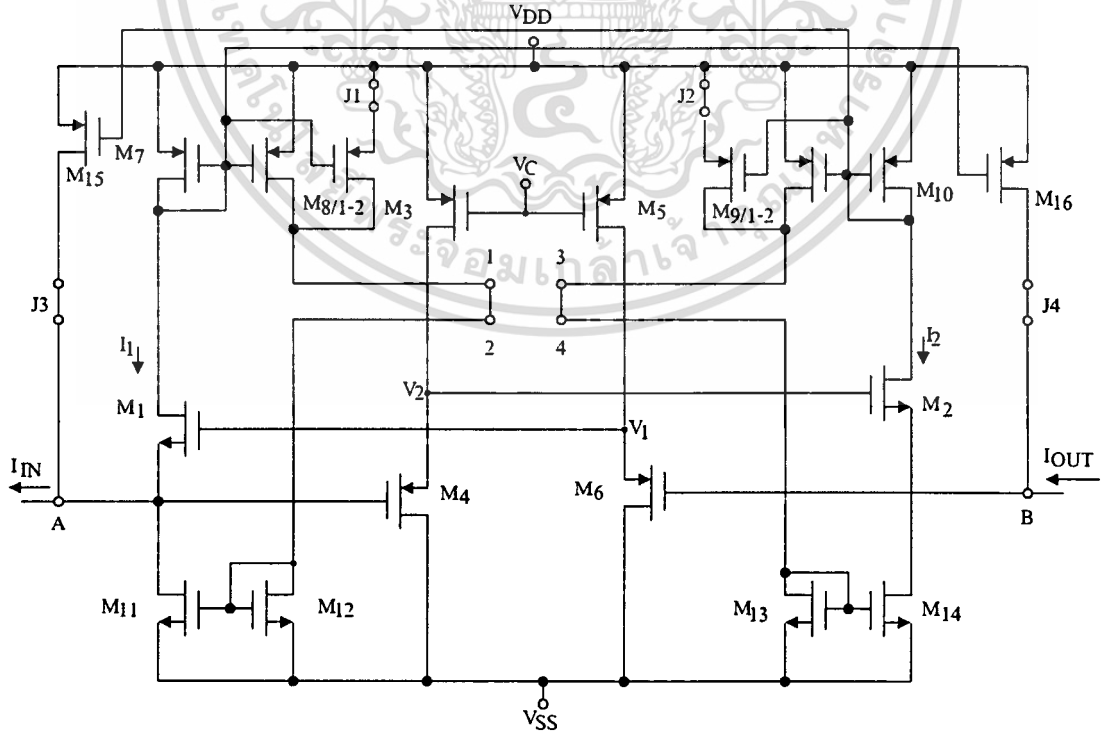
รูปที่ 3.34 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบลบ

จากรูปบล็อกไดอะแกรม ทิศทางการไหลของกระแส I_{IN} มีทิศพุ่งออกจากโนด A และ กระแส I_{OUT} มีทิศพุ่งเข้าสู่โนด B ซึ่งเป็นการไหลสวนทางจากกรณีของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ดังนั้นวงจรที่ได้นี้จึงทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ กล่าวคือ CM1-1 และ CM2-2 จะทำการสะท้อนกระแส I_1 ให้มีค่าเป็น $2I_1$ ปรากฏที่โนด A ทำให้ที่โนด A มีกระแส I_1 มีทิศพุ่งออกจากโนด A ในทิศทางดียวกันกับกระแส I_{IN} และกระแส I_2 มีทิศพุ่งเข้าสู่โนด A ซึ่งได้จากการสะท้อนกระแสจาก CM2-1 ผ่านจุดต่อ J_3 ทำให้สมการกระแส I_{IN} เป็นดังสมการที่ 3.92 ในทำนองเดียวกัน CM2-1 และ CM1-2 จะทำการสะท้อนกระแส I_2 ให้มีค่าเป็น $2I_2$ ปรากฏที่โนด B ทำให้มีกระแส I_2 พุ่งออกจากโนด B ส่วนกระแส I_1 ได้จากการสะท้อนกระแสจาก CM1-1 ผ่านจุดต่อ J_4 ทำให้สมการกระแส I_{OUT} เป็นดังสมการที่ 3.92 เช่นกัน สำหรับวงจรสมบูรณ์กรณีทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก แสดงดังรูปที่ 3.35 และ กรณีทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ แสดงดังรูปที่ 3.36 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



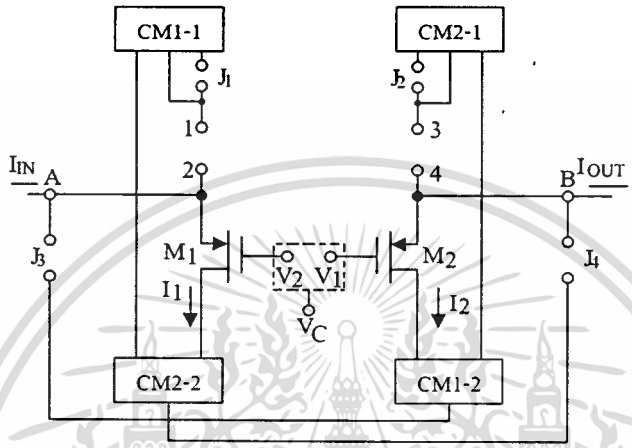
รูปที่ 3.35 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบวก



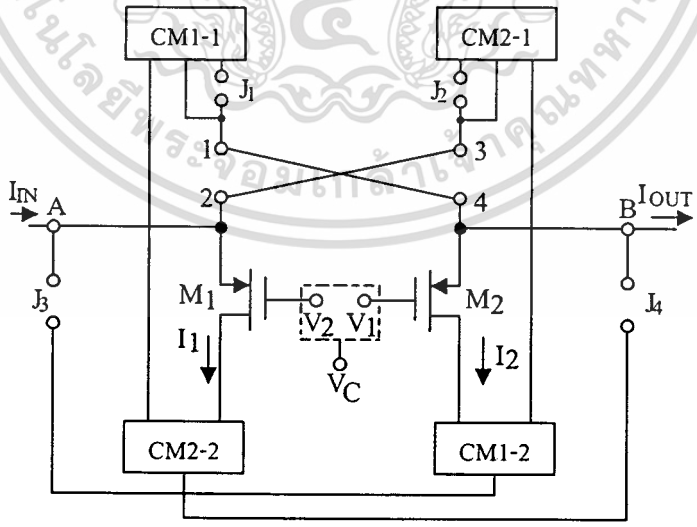
รูปที่ 3.36 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความต้านทานลอยตัวแบบบวกและแบบลบที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) จะมีลักษณะของบล็อกไดอะแกรมและวงจรสมบูรณ์ คล้ายกันกับกรณีที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) ตามที่ได้กล่าวมา ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.37 ถึงรูปที่ 3.39 และ แสดงวงจรสมบูรณ์ได้ดังรูปที่ 3.40 และ 3.41 ตามลำดับ

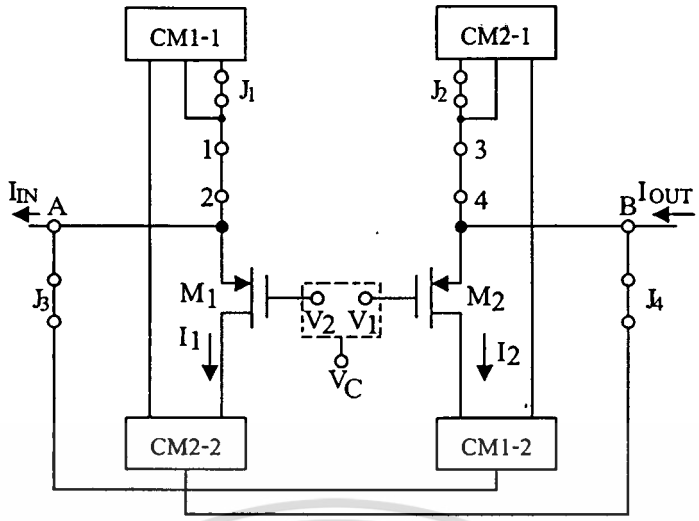


รูปที่ 3.37 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกและแบบลบ ภายในวงจรเดียวกัน ชนิด PMOS

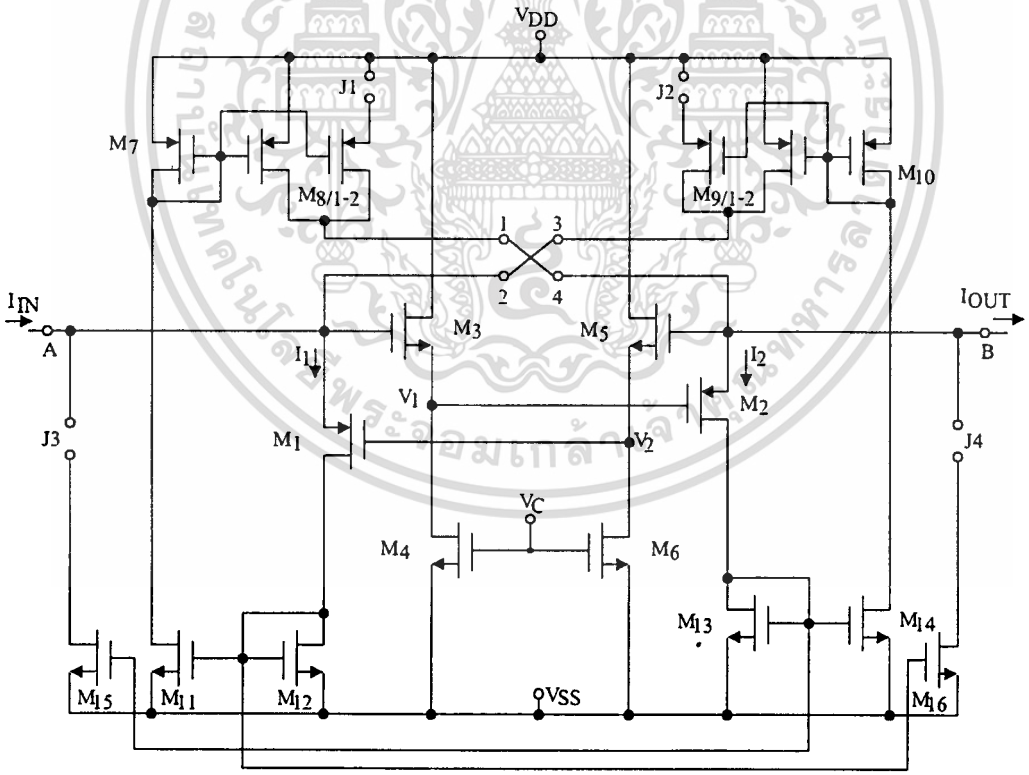


รูปที่ 3.38 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

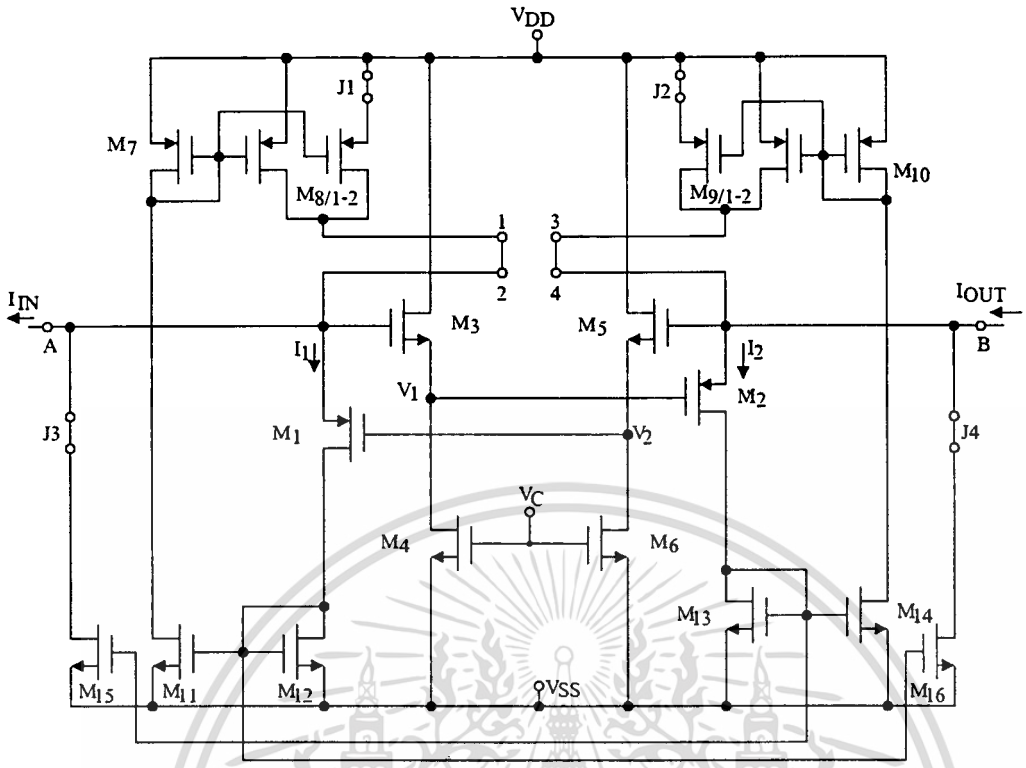


รูปที่ 3.39 บล็อกไดอะแกรมวงจรความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบลบ



รูปที่ 3.40 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.41 วงจรสมบูรณ์ของความต้านทานลอยตัวกรณีกำหนดให้ทำงานเป็นแบบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การจำลองการทำงาน

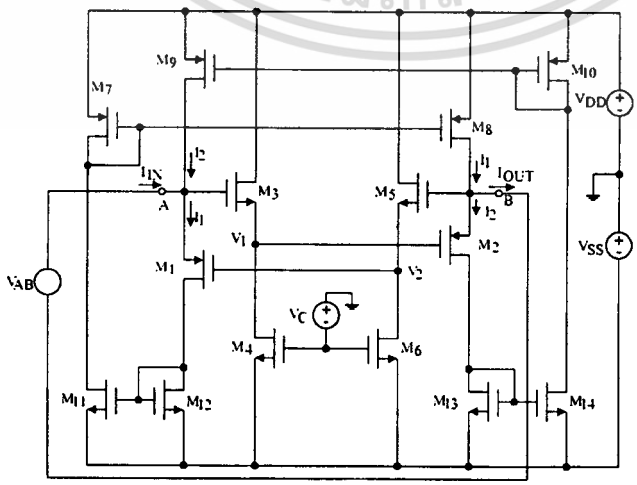
4.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการปรับปรุงวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ให้มีช่วงปฏิบัติงานแรงดันอินพุตได้กว้างขึ้น และได้ทำการดัดแปลงวงจรความต้านทานดังกล่าว ให้สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบได้ และเพื่อตรวจสอบการทำงาน ของวงจรที่ได้ออกแบบไว้แล้วในบทที่ 3 จึงได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรความต้านทานลอย ตัวทั้งแบบบวกและแบบลบเหล่านั้น ด้วยโปรแกรมพีสไปซ์ (Pspice) โดยนำ Model parameter ที่ เป็นแบบจำลองของเทคโนโลยีซีมอส Level 2 ของ MOSIS มาใช้ โดยมีค่าต่างๆ แสดงในภาค ผนวก ก ได้ผลการจำลองการทำงานในลักษณะต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

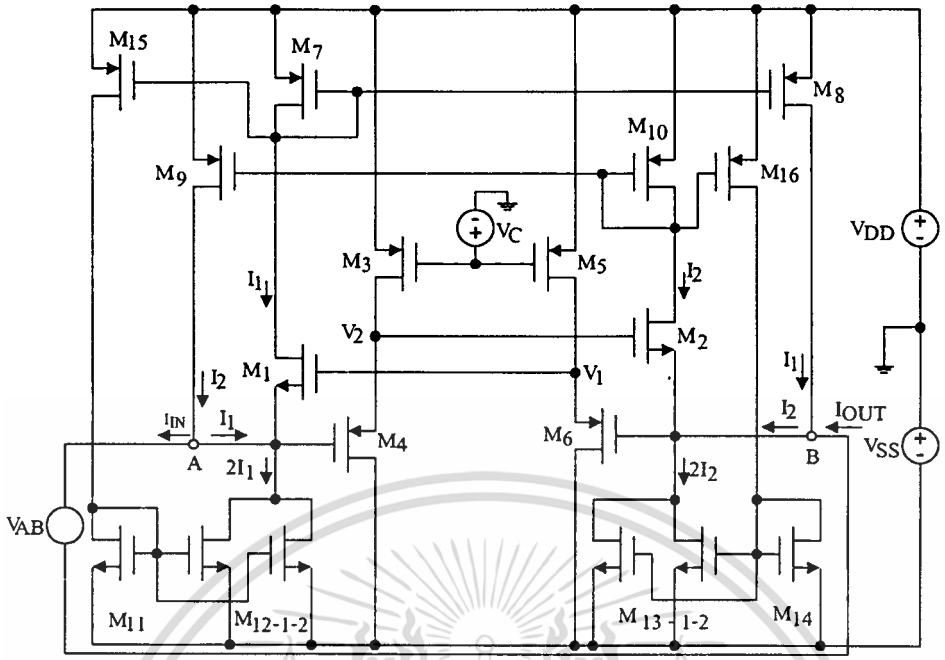
4.2.1 การจำลองวงจรความต้านทานลอยตัว เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดัน

การต่อวงจรจำลองการทำงาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} ของวงจรรูปที่ 3.15 , 3.24 และ 3.31 แสดงดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 ตามลำดับ โดยการ จำลองนั้นจะจ่ายไฟเลี้ยง V_{DD} และ V_{SS} เป็น $\pm 5V$ และทำการปรับค่าแรงดันอินพุต V_{AB} ให้มี ค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $-5V$ ถึง $+5V$ และปรับแรงดัน V_C มีค่าต่างๆจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} ของความต้านทานลอยตัวแบบบวก และแบบลบ ได้ผลการจำลอง การทำงานของวงจรตามรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 เป็นดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 ตามลำดับ

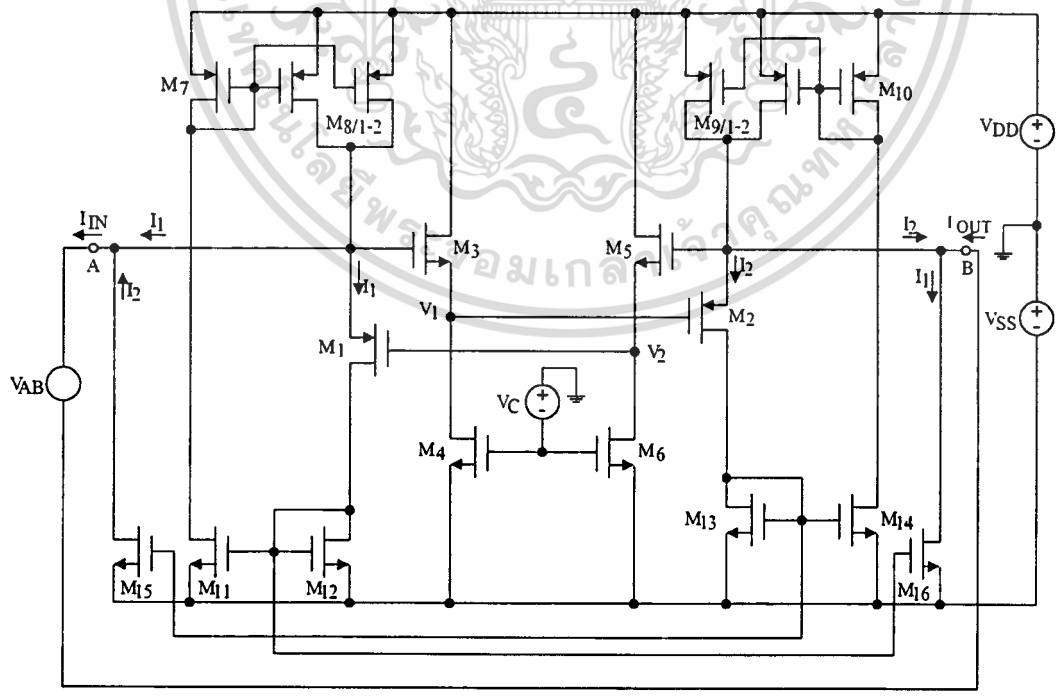


รูปที่ 4.1 วงจรความต้านทานลอยตัว แบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



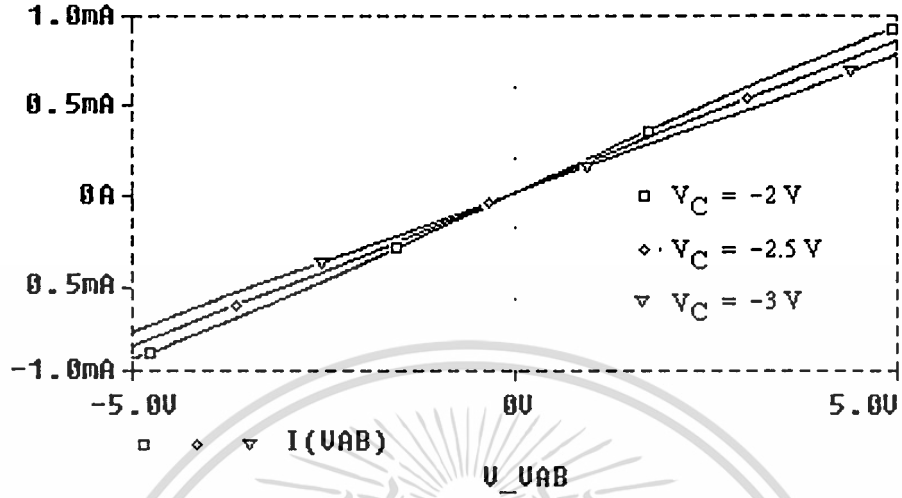
รูปที่ 4.2 วงจรความต้านทานลอยตัว แบบลบ วงจรที่ 1



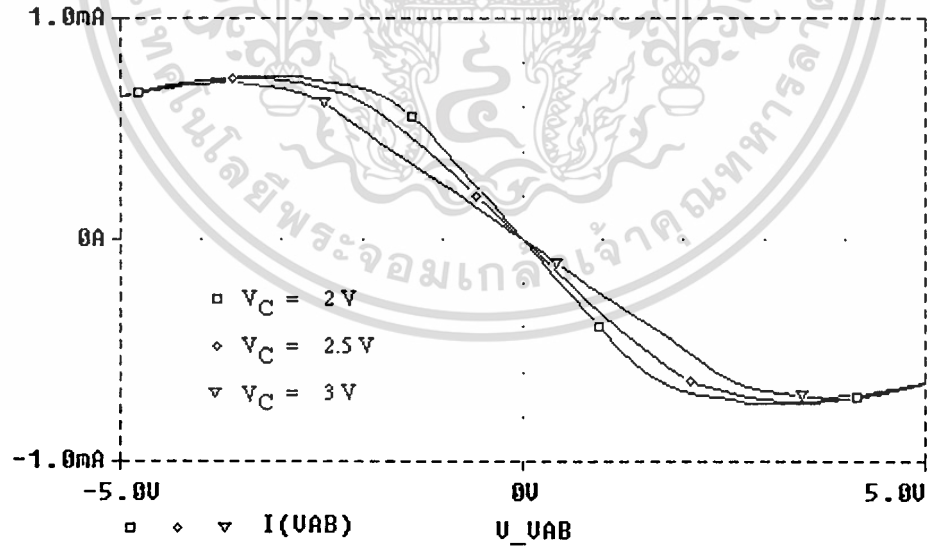
รูปที่ 4.3 วงจรความต้านทานลอยตัว แบบลบ วงจรที่ 2

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองที่ได้มีลักษณะต่างๆ ดังนี้

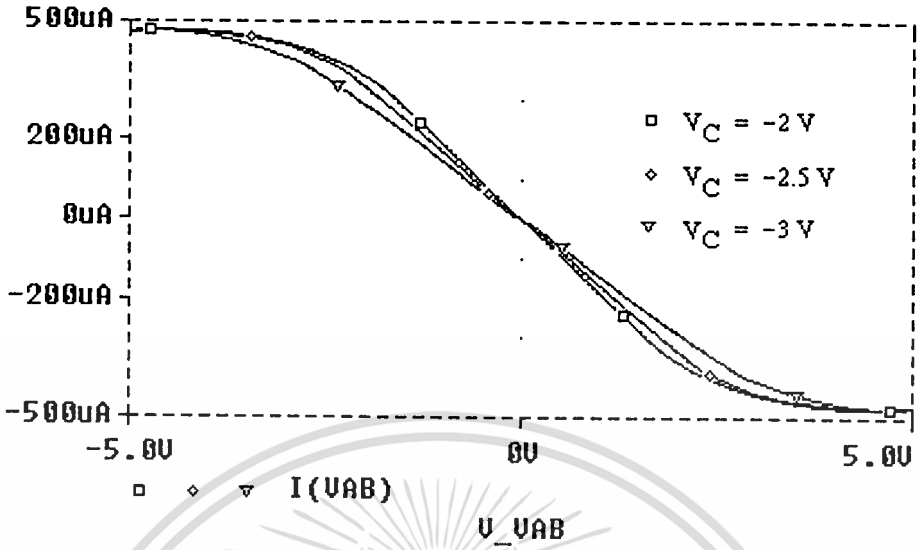


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อ V_C มีค่าต่างๆ กัน ของวงจรรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อ V_C มีค่าต่างๆ กัน ของวงจรรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อ V_C มีค่าต่างๆ กัน ของวงจรรูปที่ 4.3

จากรูป 4.4 จะเห็นได้ว่าทิศทางของกระแสจะมีทิศทางที่สอดคล้องกับแรงดันที่ให้ในวงจร กล่าวคือ เมื่อแรงดันมีค่าเป็นบวก กระแสก็มีค่าเป็นบวก และเมื่อแรงดันมีค่าเป็นลบ ค่าของกระแสก็มีค่าเป็นลบด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันนี้ ก็คือความต้านทานแบบบวกนั่นเอง

และจากรูป 4.5 และ 4.6 พบว่าทิศทางของกระแสจะไม่สอดคล้องกับทิศทางของแรงดัน กล่าวคือ เมื่อแรงดันมีค่าเป็นบวก ค่าของกระแสเป็นลบ และถ้าค่าแรงดันเป็นลบ ค่ากระแสก็จะเป็นค่าบวก ดังนั้นความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในกรณีนี้จึงเป็นความต้านทานแบบลบ

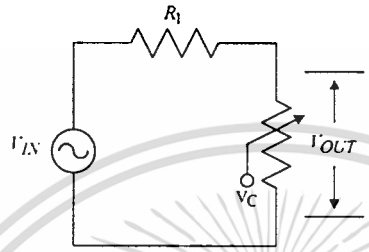
นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าแรงดัน V_C เปลี่ยนไป จะมีผลทำให้ความชันระหว่างกระแสและแรงดันของวงจรมีการเปลี่ยนแปลง หรือกล่าวได้ว่า ค่าของความต้านทานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามการปรับค่าของแรงดัน V_C นั่นเอง

จากผลการจำลองการทำงานของวงจร จะเห็นได้ว่าช่วงปฏิบัติงานของแรงดันมีความเป็นเชิงเส้นสูงตลอดช่วงของแรงดันใช้งาน โดยในกรณีของวงจรความต้านทานแบบบวกจะมีค่าอยู่ประมาณ ± 4 V ส่วนในกรณีของวงจรความต้านทานแบบลบทั้งสองวงจรจะมีค่าประมาณ ± 2 V สาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบมีความเป็นเชิงเส้นที่น้อยกว่าวงจรความต้านทานแบบบวก อาจจะเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจรสะท้อนกระแสซึ่งในวงจรความต้านทานแบบลบนั้นใช้มากกว่าในวงจรความต้านทานแบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

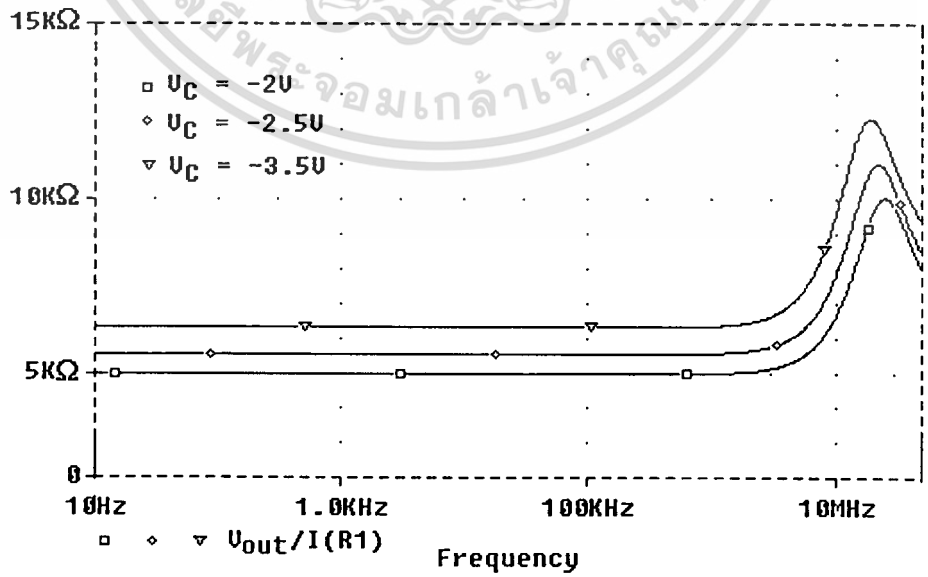
4.2.2 การจำลองวงจรเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่

สำหรับการทดสอบเพื่อดูย่านความถี่การทำงานหรือช่วงความถี่การใช้งาน ของวงจรความต้านทานลอยตัว สามารถทำการทดสอบได้โดยการนำวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก ที่เสนอการปรับปรุงตามรูปที่ 3.15 และวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ได้จากการดัดแปลงวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก รูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.31 มาประกอบเป็นวงจรที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.7



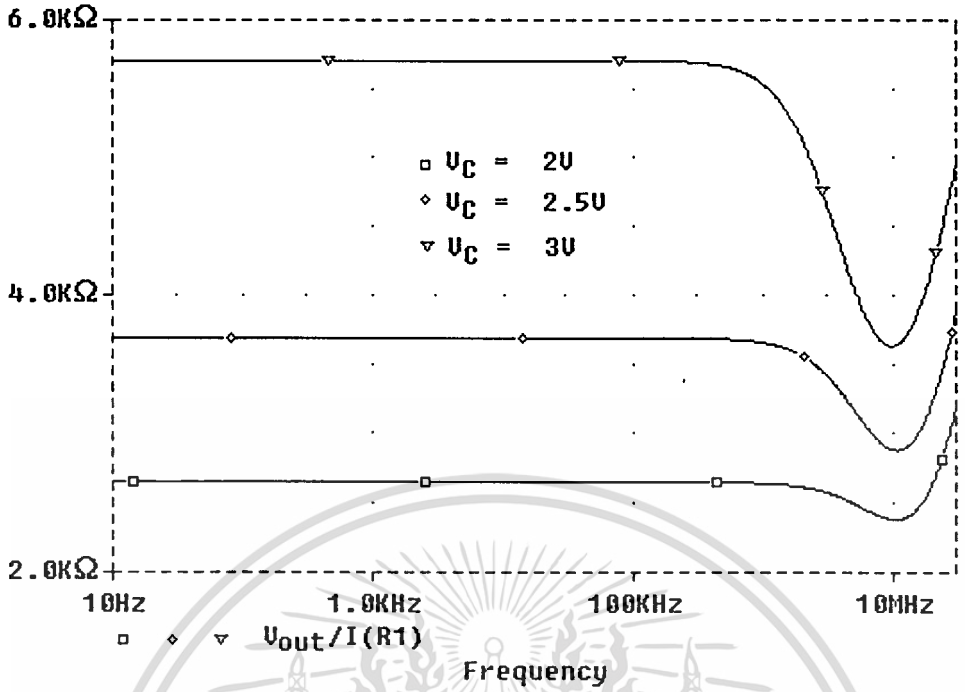
รูปที่ 4.7 ลักษณะการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองความถี่

ป้อนแรงดัน V_{IN} เป็นสัญญาณไซน์ขนาด 1Vp โดยปรับความถี่ตั้งแต่ 10Hz จนถึงค่า 1 GHz ให้กับวงจร และมีค่าความต้านทานอนุกรมซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับความต้านทานของแหล่งกำเนิดสัญญาณขนาด 2 kΩ แล้วทำการวัดค่าความต้านทานของวงจรความต้านทานลอยตัว โดยให้แรงดันควบคุม V_C มีค่าต่างๆ กัน ได้ผลตอบสนองความถี่ของวงจรความต้านทานลอยตัวของวงจรรูปที่ 3.15 , 3.24 และรูป 3.31 แสดงผลดังในรูปที่ 4.8 ถึง 4.13 ตามลำดับ

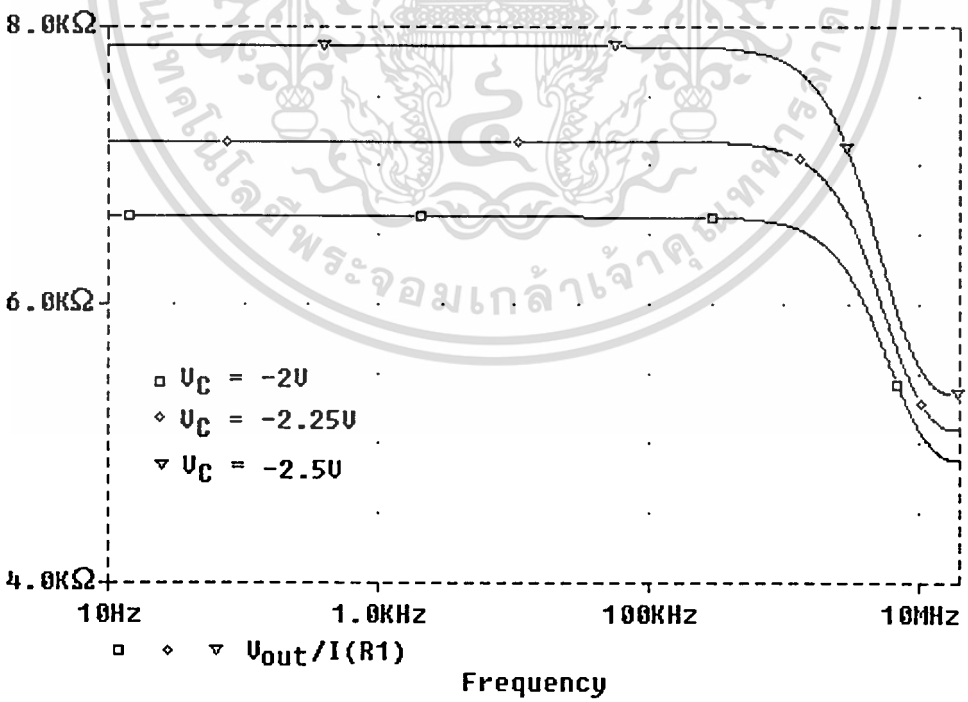


รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรูปที่ 3.15

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรูปที่ 3.24



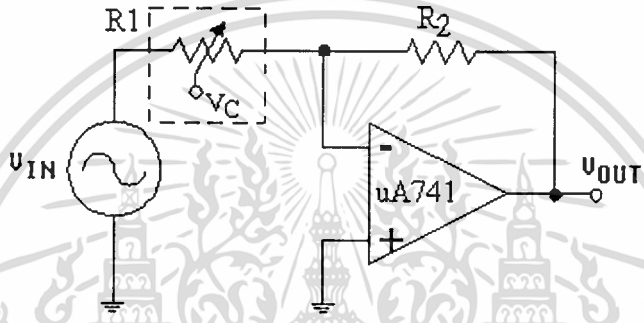
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรูปที่ 3.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสังเกตจากผลการเลียนแบบในรูปที่ 4.8 จนถึงรูปที่ 4.10 จะพบว่าผลตอบสนองความถี่ของทุกวงจรจะให้ค่าความต้านทานที่เป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงความถี่มีค่าโดยประมาณ 1 MHz

4.2.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

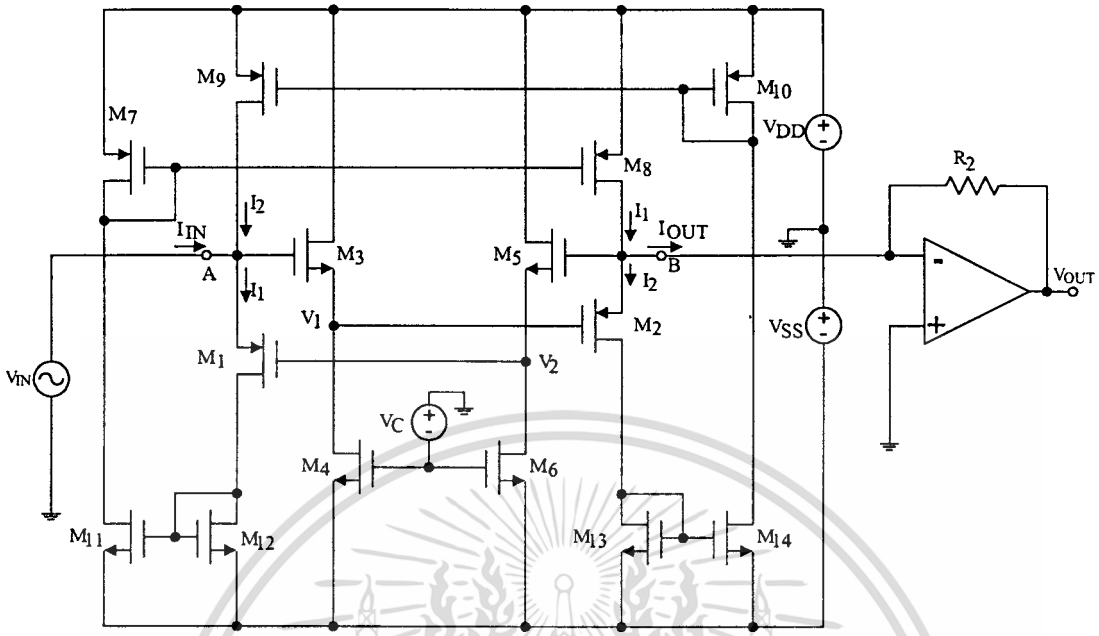
ได้แสดงการนำวงจรความต้านทานลอยตัว ทั้ง 3 วงจรมาประยุกต์ใช้ โดยประกอบเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) ดังแสดงในรูปที่ 4.11



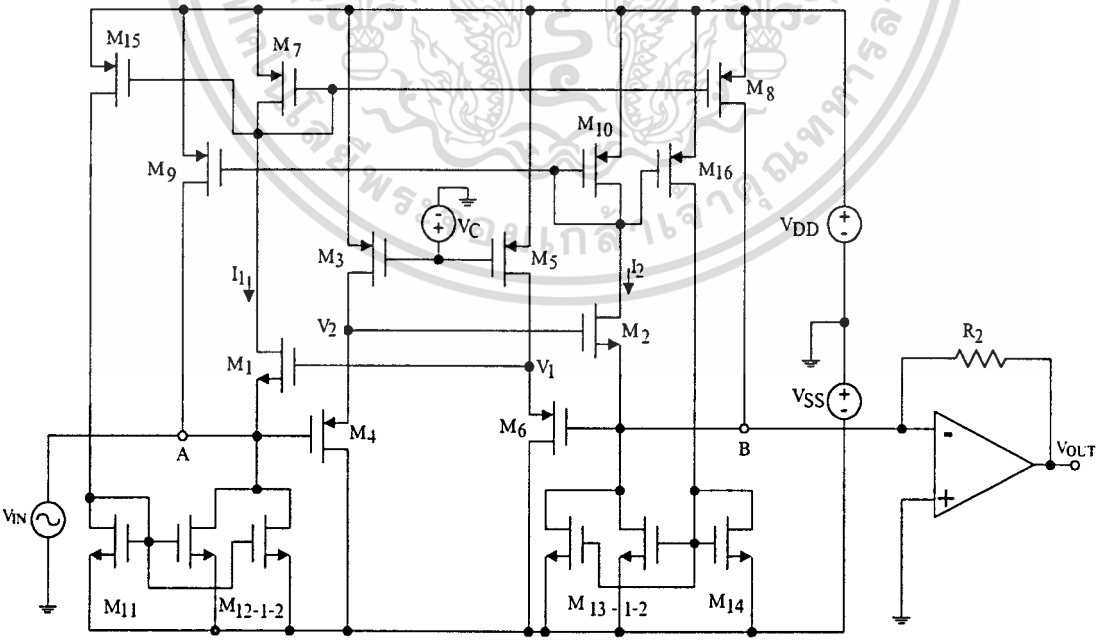
รูปที่ 4.11 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

โดยในการจำลองการทำงานนั้นใช้ออปแอมป์เบอร์ μA741 ใช้ R_2 เป็นความต้านทานที่มีค่าคงที่เท่ากับ 2 kΩ ใช้แรงดันอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ขนาด 1Vp ที่มีความถี่ 1kHz ในกรณีที่ค่า R_1 ถูกแทนด้วยวงจรในรูปที่ 3.15 จะเขียนวงจรใหม่แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 ได้ผลการจำลองการทำงานในกรณีที่ใช้แรงดันควบคุม V_C มีค่าต่างๆ กัน แสดงดังในรูปที่ 4.15 ในกรณีที่ค่า R_1 ถูกแทนด้วยวงจรในรูปที่ 3.24 ซึ่งเขียนวงจรใหม่แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ได้ผลการจำลองการทำงานในกรณีที่ใช้แรงดันควบคุม V_C มีค่าต่างๆ กัน แสดงดังในรูปที่ 4.16 ส่วนในกรณีที่ค่า R_1 ถูกแทนด้วยวงจรในรูปที่ 3.31 เขียนวงจรใหม่แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ได้ผลการจำลองการทำงานในกรณีที่ใช้แรงดันควบคุม V_C มีค่าต่างๆ กัน แสดงดังในรูปที่ 4.17 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

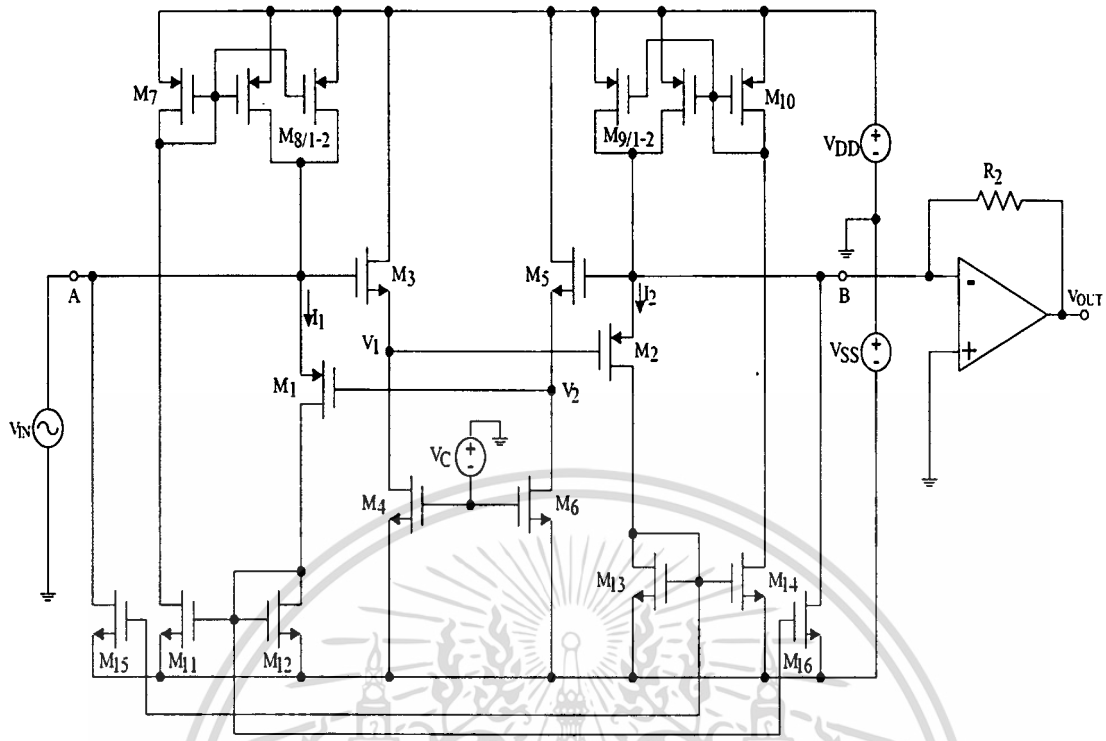


รูปที่ 4.12 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสเมื่อใช้วงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก

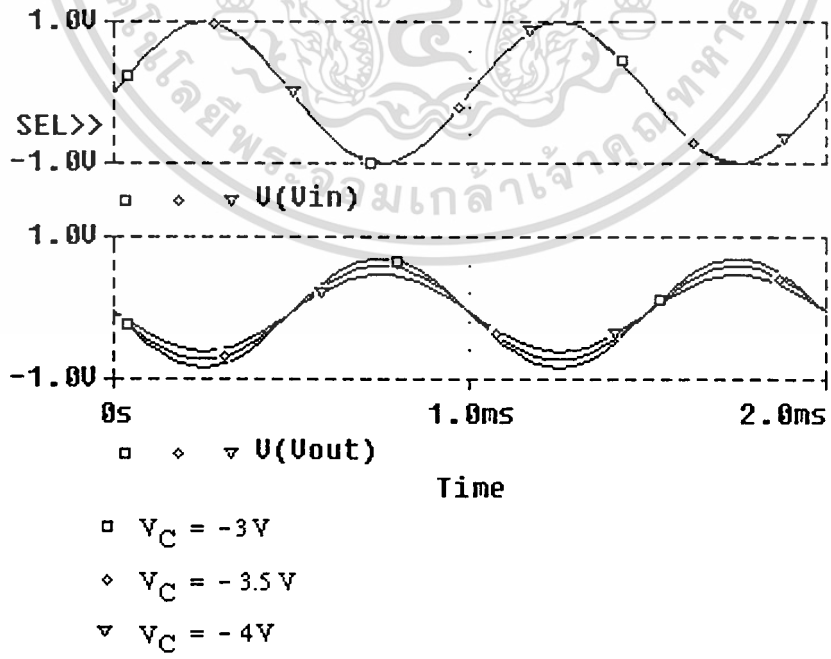


รูปที่ 4.13 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสเมื่อใช้วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบวงจรที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

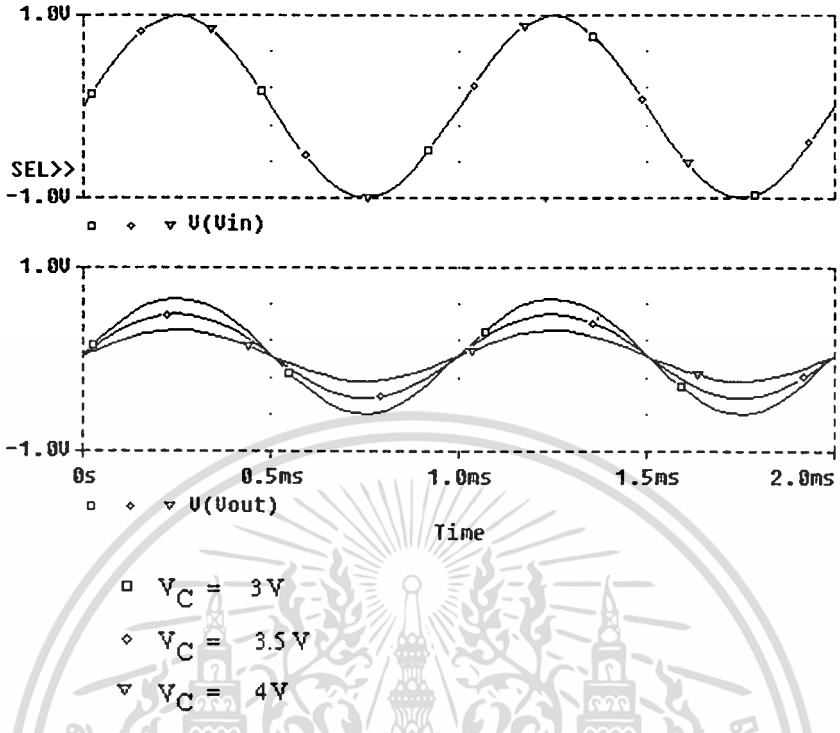


รูปที่ 4.14 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสเมื่อใช้วงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบวงจรที่ 2

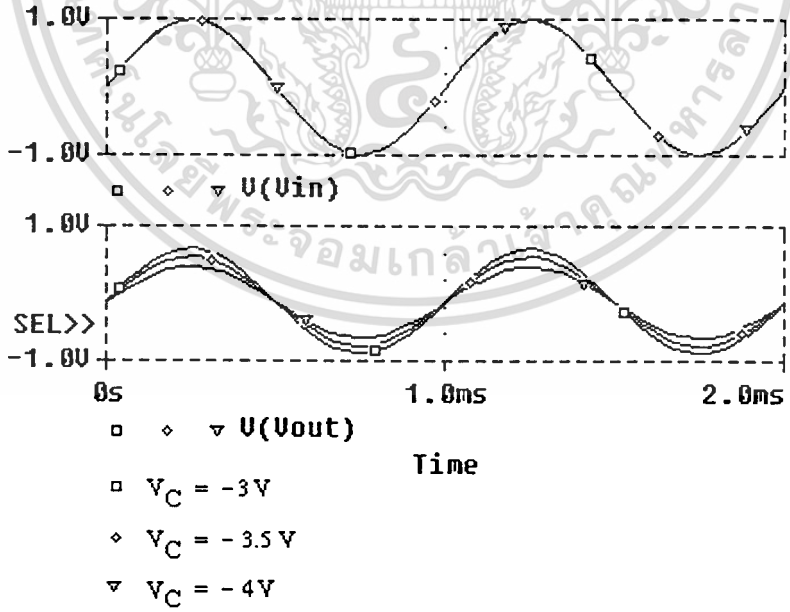


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการทำงานเมื่อ R_1 ถูกแทนด้วยวงจรรูปที่ 3.15 (วงจรรูปที่ 4.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการทำงานเมื่อ R_1 ถูกแทนด้วยวงจรรูปที่ 3.24 (วงจรรูปที่ 4.13)



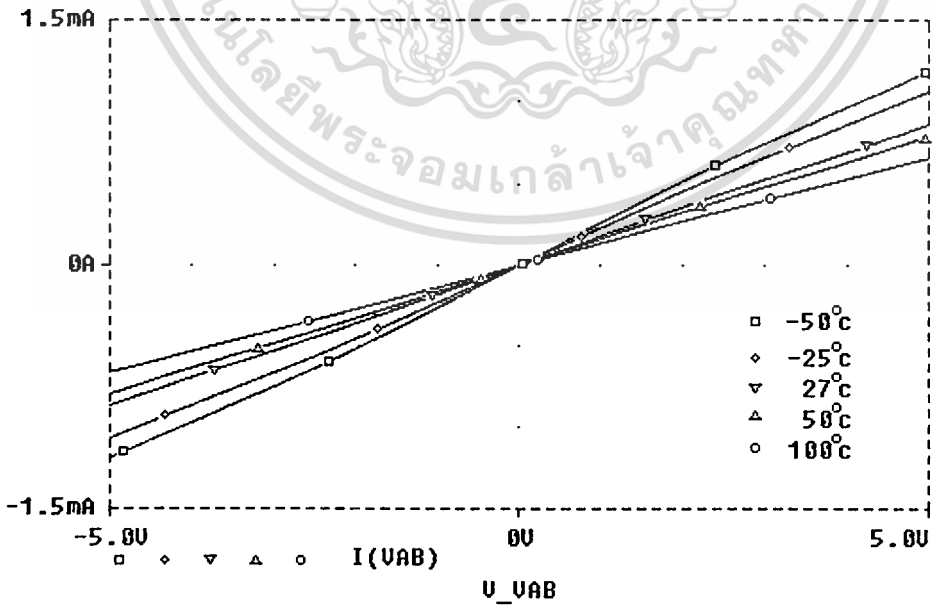
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการทำงานเมื่อ R_1 ถูกแทนด้วยวงจรรูปที่ 3.31 (วงจรรูปที่ 4.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสังเกตจากผลที่ได้เหล่านี้พบว่า ในกรณีที่ใช้วงจรตามรูปที่ 3.15 แทน R_1 แรงดันเอาต์พุต V_{OUT} ของวงจรจะกลับเฟสกับแรงดันอินพุตซึ่งแสดงว่าวงจรตามรูปที่ 3.15 แสดงตัวเป็นความต้านทานค่าบวก ส่วนในกรณีที่นำวงจรตามรูปที่ 3.24 และ รูปที่ 3.31 มาใช้แทน R_1 พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีเฟสเหมือนกับแรงดันอินพุต ทั้งนี้เนื่องจากว่าวงจรตามรูปที่ 3.24 และ 3.31 นั้นแสดงตัวเป็นความต้านทานค่าลบนั่นเอง และสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุต ได้โดยการปรับแรงดันควบคุม V_C ทั้งสองกรณี กล่าวคือเมื่อแรงดันควบคุม V_C มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ค่าความต้านทาน R_1 เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้อัตราขยายของวงจรของรูปที่ 4.11 มีค่าลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีขนาดเล็กลงด้วย และจากผลการจำลองการทำงานในกรณีนี้จะพบว่าวงจรความต้านทานที่เสนอมีค่าแรงดันออฟเซ็ต (offset) เกิดขึ้นซึ่งมีค่าไม่มากนัก

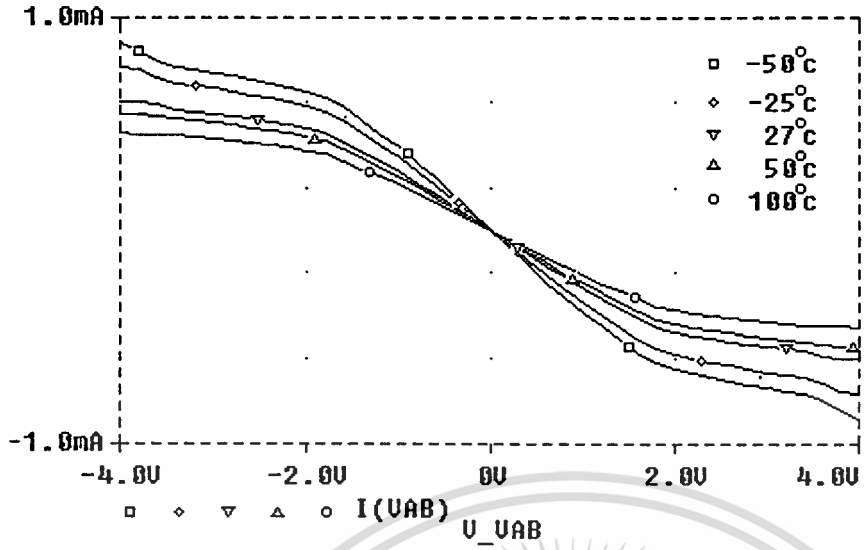
4.2.4 การจำลองค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ

ในการจำลองนี้ เป็นการจำลองการทำงานเพื่อดูเสถียรภาพของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนไป โดยการนำวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกและแบบลบของวงจรรูปที่ 4.1 จนถึงวงจรรูปที่ 4.3 มาทำการจำลองที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิตั้งแต่ -50°C จนถึง 100°C และทำการปรับค่าแรงดันควบคุม V_C ให้มีค่าคงที่ $3V$ ทำการปรับค่าแรงดัน V_{AB} ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $-5V$ ถึง $+5V$ ได้ผลจากการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.18 ถึง รูปที่ 4.20

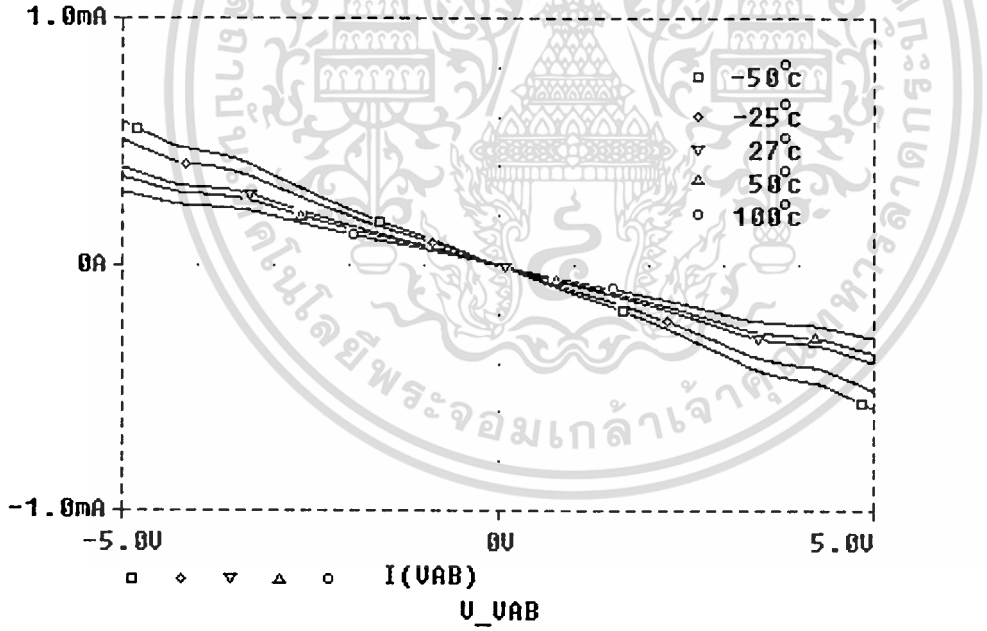


รูปที่ 4.18 เสถียรภาพของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ ของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวก รูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 เสถียรภาพของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ ของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.20 เสถียรภาพของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ ของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ รูปที่ 4.3

จากผลการจำลอง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าความต้านทานของวงจร กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ค่าความต้านทานก็เปลี่ยนแปลง นั่นคือความต้านทานไม่มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงเรื่องของอุณหภูมิในการนำไปใช้งานด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการปรับปรุงย่านปฏิบัติงานของวงจรความต้านทานลอยตัว ที่ปรับค่าได้ด้วยทางอิเล็กทรอนิกส์(แรงดัน) ที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีซีมอส ให้มีช่วงปฏิบัติงานแรงดันอินพุตได้กว้างขึ้น โดยมีขั้นตอนของการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ดังนี้คือ

เริ่มต้นด้วยการศึกษาและทำการค้นคว้าวงจรความต้านทานลอยตัวต่างๆ มาพิจารณาเพื่อดูช่วงของแรงดันอินพุตปฏิบัติงานของวงจรเหล่านั้นๆ พบว่าวงจรจะมีแรงดันอินพุตปฏิบัติงานอยู่ในช่วงแรงดัน $\pm 1V$ และวงจรส่วนใหญ่จะนำเอามอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น(NMOS) มาเป็นตัวสร้างชุดความต้านทาน จึงได้ทำการออกแบบวงจรความต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น(NMOS) และนำมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice หากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน เมื่อทำการปรับค่าแรงดัน V_C ให้มีค่าต่างๆกัน เพื่อดูช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานของวงจรที่ได้ออกแบบ พบว่าวงจรที่ได้ออกแบบสามารถให้ช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานกว้างกว่าวงจรที่มีการนำเสนอมาคือมีค่า $\pm 2.5V$ จากนั้นได้ทำการปรับปรุงวงจร เพื่อให้ช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานของวงจรได้กว้างขึ้น โดยมีสมมติฐานอยู่บนการทำให้ค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยพิจารณาออกแบบให้ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่าน้อยๆ ซึ่งผลที่ได้ก็คือทำให้ช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานที่กว้างขึ้นได้ โดยได้ใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) มาแทนมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) ดังวงจรที่ได้ดัดแปลงดังรูปที่ 3.15

ลำดับต่อไปของวิทยานิพนธ์ เป็นการดัดแปลงวงจรความต้านทานลอยตัวดังกล่าวให้สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบได้ โดยใช้หลักการ "กำหนดให้ทิศทางการไหลของกระแสให้เป็นตรงข้ามหรือไหลสวนทางจากเดิม โดยที่โครงสร้างภายในของวงจรความต้านทานเป็นเช่นเดิมไม่เปลี่ยนแปลง" ทำให้ได้วงจรที่มีโครงสร้างเดียวกันแต่สามารถทำงานได้ 2 หน้าที่คือ เป็นวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกหรือแบบลบก็ได้ โดยการกำหนดจุด Jump หรือจุดเชื่อมต่อภายในวงจรขึ้น ทำให้เกิดความสะดวกและประหยัดจำนวนอุปกรณ์ลงในการนำไปใช้งาน

สำหรับผลการจำลองการทำงาน ได้ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมเลียนแบบการทำงาน PSpice ได้ผลการจำลองสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีเป็นอย่างดี กล่าวคือ วงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกที่เสนอ ให้ช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานได้กว้าง และมีความเป็นเชิงเส้นสูงโดยประมาณ $\pm 4V$ และวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบที่ได้จากการดัดแปลงตามหลักการที่เสนอจะให้ช่วงของแรงดันอินพุตปฏิบัติงาน มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงประมาณ $\pm 2V$ ทั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจเป็นเพราะวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบ ใช้จำนวนมอสทรานซิสเตอร์ในส่วนของการสะท้อนกระแสมากกว่า ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความไม่เป็นอุดมคติของวงจรสะท้อนกระแส สำหรับแนวทางแก้ไข ก็โดยการพิจารณาวงจรสะท้อนกระแสที่มีเสถียรภาพมากกว่านี้ มาใช้งาน นอกจากนี้ค่าความต้านทานลอยตัวทั้งแบบบวกและแบบลบ ก็สามารถปรับค่าได้ด้วยแรงดัน V_C ซึ่งมีค่าแรงดันอยู่ในช่วง $2V$ ถึง $3.5V$

นอกจากนั้นยังได้ทำการจำลองวงจรเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกและแบบลบ จะให้ค่าความต้านทานที่มีความเป็นเชิงเส้น และใช้งานได้ตลอดช่วงความถี่โดยประมาณ 1 MHz

แต่การนำวงจรความต้านทานไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงผลของอุณหภูมิด้วย เนื่องจากวงจรที่เสนอนี้ อุณหภูมิมีผลต่อค่าความต้านทาน ข้อเสนอแนะคือต้องหาหรือทำการออกแบบวงจรที่ทำหน้าที่ชดเชยอุณหภูมิให้กับวงจรความต้านทานดังกล่าว

กล่าวโดยสรุปแล้ว วิทยานิพนธ์นี้มีข้อดีคือ ให้ค่าความต้านทานที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง มีช่วงปฏิบัติงานกว้างและยังใช้จำนวนของมอสทรานซิสเตอร์ในการสร้างวงจรน้อยกล่าวคือในกรณีของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกใช้เพียง 14 ตัว ส่วนกรณีของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบใช้ 18 ตัว และค่าความต้านทานลอยตัวที่นำเสนอยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้โดยใช้แรงดัน V_C และเนื่องจากวงจรที่เสนอสร้างขึ้นโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์เพียงอย่างเดียวจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] P.M. Vanpeteghem and G.L. Rice, "New CMOS Resistor Implementation for Linear IC Applications," Electron. Lett., Vol.24, No.5, pp. 288-290, 1998.

[2] S.P. Singh, J.V. Hanson and J. Vlach, "A New Floating Resistor For CMOS Technology," IEEE Trans. Circuits and System, Vol.36, No.9, pp.1217-1220, 1989.

[3] Z. Wang, "Novel Electronically-Controlled Floating Resistors Using MOS Transistors Operating in Saturation," Electron. Lett.,Vol.27, No.2, pp.188-189, 1991.

[4] G. Wilson and P.K. Chan, "Floating CMOS Resistor," Electron. Lett., Vol.29, No.3, pp.306-307, 1993.

[5] S. Sakurai and M. Ismail, "A CMOS Square-Law Programmable Floating Resistor," Proc. 1993 IEEE International Symposium On Circuits and Systems, (ISCAS'93), pp.1184-1187, 1993.

[6] H.O. Elwan, S.A. Mahmoud and A.M. Soliman, "CMOS Voltage Controlled Floating Resistor," Int. J. Electronics, Vol. 81, No.5, pp.571-576, 1996.

[7] W. Surakampontorn, "CMOS Floating Voltage-Controlled Negative Resistor," Electron. Lett., Vol.28, No.15, pp.1457-1459, 1992.

[8] W. Kiranon, C. Leoscharataramdee, N. Kiatwarin and P. Wardkein, "Electronically Controlled Negative Resistance Based on Translinear Circuits," Proc. 1999 IEEE International Symposium On Intelligent Signal Processing and Communication System, (ISPACS'99), pp. 645-648,1999.

[9] Y. P. Tsividis. **Operation and Modeling of the MOS Transistor.** Mcgraw-Hill 1988

[10] O. J. McCarty. **MOS Device and Circuit Design.** John Wiley & Son 1982.

[11] P. Antognetti , G. Massobrio. **Semiconductor Device Modeling with Spice.** McGraw-Hill 1988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] R. T. Howe, C. G.Sodini **Microelectronics an integrated approach.** Prentice - Hall 1997

[13] E.W. Greeneich. **Analog Integrated Circuits.** Chapman & Hall 1997

[14] M. H. Rashid. **Microelectronic circuit Analysis and Design.** PWS Publishing company

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเลียนแบบการทำงานของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเลียนแบบการทำงาน

โมเดล SCN2 ของ MOSIS

.MODEL NENH NMOS LEVEL=2 LD=0.250000U TOX=408.000001E-10
+ NSUB=6.264661E+15 VTO=0.77527 KP=5.518000E-05 GAMMA=0.5388
+ PHI=0.6 UO=652 UEXP=0.100942 UCRIT=93790.5 DELTA=1.000000E-06
+ VMAX=100000 XJ=0.250000U LAMBDA=2.752568E-03 NFS=2.06E+11
+ NEFF=1 NSS=1.000000E+10 TPG=1.000000 RSH=31.020000
+ CGDO=3.173845E-10 CGSO=3.173845E-10 CGBO=4.260832E-10
+ CJ=1.038500E-04 MJ=0.649379 CJSW=4.743300E-10 MJSW=0.326991
+ PB=0.800000

.MODEL PENH PMOS LEVEL=2 LD=0.213695U TOX=408.000001E-10
+ NSUB=5.574486E+15 VTO= -0.77048 KP=2.226000E-05 GAMMA=0.5083
+ PHI=0.6 UO=263.253 UEXP=0.169026 UCRIT=23491.2 DELTA=7.31456
+ VMAX=17079.4 XJ=0.250000U LAMBDA=1.41E-02 NFS=2.77E+11
+ NEFF=1.001 NSS=1.000000E+10 TPG=1.000000 RSH=88.940000
+ CGDO=2.712940E-10 CGSO=2.712940E-10 CGBO=3.651103E-10
+ CJ=2.375000E-04 MJ=0.532556 CJSW=2.707600E-10 MJSW=0.252466
+ PB=0.800000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISSN 0125-1724

วิศวสาร ลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 17 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2543

1. วงจร บูตสแตรป ซีมอส อินเวอร์เตอร์ ที่ศักดาไฟเลี้ยงต่ำและสวิงได้เต็มย่าน 1
ทวิช ชูเมือง กอบชัย เตชทาญ วิษณ กอพยัคมินทร์

2. ตัวต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ซีมอส 5
สิทธิพร เพ็ชรกิจ กอบชัย เตชทาญ

3. วงจรคูณและหารสัญญาณที่ใช้วงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส 11
วิจิตรา เพ็ชรกิจ สิทธิพร เพ็ชรกิจ

4. การจัดการความกว้างของแบนด์ของ ATM สวิทช์โดยใช้ทฤษฎีแถวรอคอย 17
ประพันธ์ ตรีจรูญ กอบชัย เตชทาญ อัครพล ตรีรัตน์ เชื้อชาย เนตรบุตร

5. อุปกรณ์ป้องกันการสำเนาซอฟต์แวร์โดยใช้ฮาร์ดล็อคผ่านพอร์ตยูเอสบี 23
คฑาวุฒิ ทองทา นเรศ มาลัย สมศักดิ์ มิตะถา ชม กิมปาน กอบชัย เตชทาญ

6. การพัฒนาระบบสแดงผลจุดชำรุดในโครงข่ายเคเบิลใยแก้วนำแสง 29
รุ่ง พวงดอกไม้ พิเชฐ มั่งนาล มนูญ สุขเกษม อวิล พึ่งมา

7. การเปรียบเทียบวิธีการประมาณแบบออโต้คอรีเลชั่นคู่กับวิธีการประมาณแบบอื่น ๆ สำหรับการเข้ารหัสเสียงพูดแบบอะแด็พทีฟ ดิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์โค้ดมอดูเลชั่น 35
อรรถสิทธิ์ วงศ์ธนศักดิ์ชัย วรการ วงศ์สายเชื้อ ไกรลิน ส่งวัฒนา

8. วิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน KU-Band ด้วยอุปกรณ์ เรดิโอมิเตอร์ที่มุมซีนิท 41
ดุสิต โบศรี ณรงค์ เหมกรณ์

9. การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม PID แบบปรับค่าอัตโนมัติ 47
เลิศเลขา ธนะชัยขันธ์ วิศรุต ศรีรัตนะ พิทยา ปานนิล ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ ภิตติ ตีรเศรษฐ

10. ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วแรง-บิดสำหรับสเตปปิงมอเตอร์แบบสเตปย่อยด้วยค่าการเก็บประจุรวม 53
สาทร ทองถึง ชนิษฐา แซ่ตั้ง

11. การคิดราคาตลาดของไฟฟ้าในธุรกิจไฟฟ้า 58
สุนทร ฝ้ายหมื่นไวย์ ศุลี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา

12. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความดี่จากการสูญเสียในการผลิตและภาระของระบบไฟฟ้ากำลัง 64
ศุภชัย แซ่เจียม เอกราช พลูน้อย มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

13. การหาจำนวนสลอตของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยโรเตอร์สลอตฮาร์โมนิคส์ 69
เฉลิมชาติ มานพ อรพดี สารมาศ วิจิตร กิณเรศ

14. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก 75
ประภาษ ไพรสุวรรณา พูนศรี วรรณการ วรกัลป์ ลิ้มเจริญ

15. การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลลัพธ์ค่าความส่องสว่างโดยอาศัยข้อมูลจาก IES File 81
ทีมายุ ดิษสุธรรม วรกัลป์ ลิ้มเจริญ นิทัศน์ กฤษณจินดา ศุลี บรรจงจิตร

16. การแก้ค่าตัวประกอบกำลังวงจรเรียงกระแสตามเฟส 86
โสภณ สวัสดิ์นาวิน ประภาษ ไพรสุวรรณา ชาย ชมภูอินไหว

17. ระบบป้องกันหลักของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 92
เชาวฤทธิ์ ธรรมเพียร มณฑล ลีลาจินดากรฤกษ์ สมโภชน์ ประไพ

18. การออกแบบของระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้คอมพิวเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 479 98
คักดา ธารีเวทย์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

19. การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน 104
รวี พงษ์ศิริพานิช ธิติ เอื้อมมงคล ศุลี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา

20. การประเมินค่าความปลอดภัยในการออกแบบระบบกราวน์ 110
จิรพงษ์ เผือกคล้าย สมชาติ จิริวิภากร ศุลี บรรจงจิตร

21. ผลกระทบของสภาวะที่ทางเข้าต่อการผสมแบบปั่นป่วนในเตาเผาทรงกระบอก 115
นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล จารุวัตร เจริญสุข

22. พฤติกรรมการหล่อลื่นของแบริ่งเพลากลมด้วยสารหล่อลื่นนอน-นิวตรอนเนียน ไดลาแตนท์ 121
มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ดาวรัตน์ ปัญญากาญจน์

23. การเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนโดยการดูดไอเสีย 127
อัครเดช สินธุภัค สุนทร ละอองนวล

24. การวิเคราะห์ %wt. Coke Yield ซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งในการผลิตน้ำมันให้มีคุณภาพสูงสุดในหน่วยแตกน้ำมันหนัก 131
อภิชัย พุทธเนียม ธวัชชัย นาคพิพัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ทรานซิสเตอร์ซีมอส

Electronically Tunable Floating Resistor Based on CMOS Transistors

สิทธิพร เพ็ชรกิจ กอบชัย เดชหาญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกและค่าลบ ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แรงดันเป็นตัวควบคุม ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนการนำคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวมาใช้งาน วงจรที่นำเสนอนี้ให้ค่าความต้านทานที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง และมีช่วงปฏิบัติงานกว้าง และเนื่องจากวงจรประกอบขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์เพียงอย่างเดียว จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมอีกด้วย เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพการทำงานของวงจร ได้เสนอผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice มาประกอบ

Abstract

This paper presents the positive and negative floating resistance circuits, which can be eletronically tunable voltage-controlled resistance. These circuits base on the characteristic of MOS-transistors operating in saturation region. The proposed circuit has high-linearity of the resistance value and wide dynamic range, which is useful for IC design because of its MOS-transistor structure. The circuit performances are also included based on simulation results by using PSpice.

1. บทนำ

ตัวต้านทานลอยตัวค่าบวกและค่าลบที่สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมากตัวหนึ่ง เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณต่างๆ ได้มากมาย เช่นนำมาใช้เพื่อทำให้เกิดการออสซิลเลตในวงจรออสซิลเลเตอร์ ใช้เป็นตัวปรับค่าความถี่ในวงจรกรองสัญญาณแอคทีฟ (active filter) ใช้เป็นตัวปรับอัตราขยายหรือลดทอนในวงจรขยายสัญญาณ หรือใช้เป็นวงจรเพิ่มความเป็นเชิงเส้นให้กับวงจรอินทิเกรต เป็นต้น จากเหตุผลดังกล่าว จึงมีการนำเสนอวงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานลอยตัวที่ปรับค่าได้ ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ทั้งค่าบวก [1-6] และค่าลบ [7-8] ออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแต่ละวงจรก็จะมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับวิธีการที่นำมาใช้ในการออกแบบ และวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกส่วนใหญ่จะมีช่วงปฏิบัติงานประมาณ ±1 โวลท์ ในขณะที่ใช้ไฟเลี้ยง วงจร ±5 โวลท์ ซึ่งถ้าหากต้องการความต้านทานที่มีช่วงปฏิบัติงานที่กว้างขึ้น วิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้คือการนำอุปกรณ์มาต่อเพิ่มเข้าไปดังที่ใช้ใน [2,7] ซึ่งวิธี

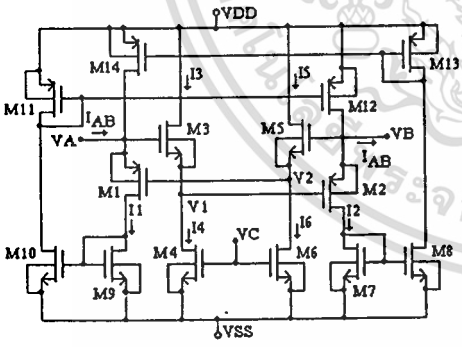
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนี้ทำให้วงจรมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น

บทความนี้จึงได้นำเสนอวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกที่ให้ค่าความต้านทานที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง มีช่วงปฏิบัติงานกว้าง และใช้อุปกรณ์น้อย กล่าวคือ ใช้มอสทรานซิสเตอร์เพียง 14 ตัวเท่านั้น นอกจากนั้นยังได้นำเสนอวงจรความต้านทานลอยตัวค่าลบ ที่ได้จากการดัดแปลงวงจรความต้านทานค่าบวกที่นำเสนอไว้ด้วย และจากการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

2. หลักการทำงาน

วงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอในบทความนี้ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีจุด A และ B เป็นขั้วทั้งสองของตัวต้านทาน มี I_{AB} เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานนี้ และมี V_C เป็นแรงดันที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทาน



รูปที่ 1 วงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกที่นำเสนอ

จากรูปวงจรที่ออกแบบขึ้นนี้ได้กำหนดให้ M_1 และ M_2 เป็นมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) ที่มีความสมพงษ์กัน และทำหน้าที่สร้างกระแส I_1 และ I_2 ขึ้นตามลำดับ โดยมีทรานซิสเตอร์ M_3 - M_6 เป็นส่วนของวงจรที่ทำหน้าที่จัดไบอัสให้กับ M_1 และ M_2 ส่วนทรานซิสเตอร์ M_7 - M_{14} ทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสและมีอัตราการสะท้อนกระแสเป็น 1:1 การออกแบบวงจรนี้ได้กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในช่วงอิ่มตัว โดยขาซอส (source)กับขาซับสเตรท(substrate/bulk)ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวถูกต่อเข้าด้วยกัน สมการกระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงอิ่มตัว มีค่าเป็น

$$I_D = \frac{K}{2}\left(V_{GS} - V_T\right)^2 \qquad (1)$$

โดยที่ $K = \mu C_{ox}\left(W/L\right)$

ซึ่ง μ คือ ค่าความคล่องตัวของโฮลหรืออิเล็กตรอน

C_{ox} คือ ความจุต่อพื้นที่ของเกท-ออกไซด์

W คือ ความกว้างของแชนแนล

L คือ ความยาวของแชนแนล

V_{GS} คือ แรงดันที่เกท-ซอส

V_T คือ แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage)

เมื่อนำความสัมพันธ์ของกระแสเดรนที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวมาใช้กับมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี M_1 และ M_2 จะได้สมการของกระแส I_1 และ I_2 มีค่าเป็นดังนี้

$$I_1 = \frac{K_p}{2}\left(V_A - V_2 + V_{Tp}\right)^2 \qquad (2)$$

$$I_2 = \frac{K_p}{2}\left(V_B - V_1 + V_{Tp}\right)^2 \qquad (3)$$

และจากวงจรในรูปที่ 1 ได้ออกแบบให้

$$I_{AB} = I_1 - I_2 \qquad (4)$$

ดังนั้นจะได้

$$I_{AB} = \frac{K_p}{2}\left(V_1 - V_2 + V_A - V_B\right)\left(V_A + V_B - V_1 - V_2 + 2V_{Tp}\right) \qquad (5)$$

สำหรับค่าแรงดัน V_1 และ V_2 หาได้จากส่วนของวงจรที่ทำหน้าที่ในการจัดไบอัส ซึ่งจากส่วนนี้เมื่อกำหนดให้ M_3 สมพงษ์กับ M_4 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ladkrabang Engineering Journal, Vol.17, No. 4, December 2000 7

$$I_3 = I_4 \quad (6)$$

หรือ

$$\frac{K_n}{2}(V_A - V_1 - V_{Tn})^2 = \frac{K_n}{2}(V_C - V_{SS} - V_{Tn})^2 \quad (7)$$

และได้

$$V_1 = V_A - V_C + V_{SS} \quad (8)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อกำหนดให้ M_5 สมพงษ์กับ M_6 จะได้ว่า

$$I_5 = I_6 \quad (9)$$

ซึ่งจะได้

$$V_2 = V_B - V_C + V_{SS} \quad (10)$$

เมื่อนำค่าของสมการ (8) และ (10) แทนลงในสมการ (5) จะได้

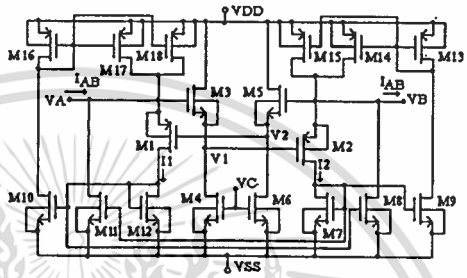
$$I_{AB} = 2K_p(V_A - V_B)(V_C - V_{SS} + V_{Tp}) \quad (11)$$

ซึ่งจากสมการนี้จะพบว่าค่าความต้านทานเสมือนที่อยู่ระหว่างขั้ว A และ B ของวงจรคือ

$$R_{AB} = \frac{1}{2K_p(V_C - V_{SS} + V_{Tp})} \quad (12)$$

จากสมการ (12) นี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวงจรตามรูปที่ 1 สามารถใช้เลียนแบบเป็นความต้านทานลอยตัวที่มีความเป็นเชิงเส้นแบบบวก และขนาดของความต้านทานสามารถควบคุมได้ด้วยแรงดัน V_C

จากหลักการของวงจรเลียนแบบความต้านทานลอยตัวค่าบวกที่นำเสนอ สามารถดัดแปลงเป็นวงจรเลียนแบบความต้านทานลอยตัวค่าลบได้โดยการดัดแปลงวงจรในส่วนของวงจรสะท้อนกระแสใหม่ให้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีอัตราการสะท้อนกระแสเป็น 1:1 เช่นเดิม



รูปที่ 2 วงจรความต้านทานลอยตัวค่าลบที่นำเสนอ

ซึ่งจากวงจรในรูปนี้ เมื่อพิจารณาที่จุด A และ B จะได้

$$I_{AB} = I_2 - I_1 = -(I_1 - I_2) \quad (13)$$

ดังนั้นในกรณีนี้จึงสามารถพิสูจน์ได้ง่ายว่า ค่าความต้านทานเสมือนที่อยู่ระหว่างขั้ว A และ B ของวงจรมีค่าเป็น

$$R_{AB} = \frac{-1}{2K_p(V_C - V_{SS} + V_{Tp})} \quad (14)$$

จากสมการ (14) นี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวงจรตามรูปที่ 2 สามารถใช้เลียนแบบเป็นความต้านทานลอยตัวที่มีความเป็นเชิงเส้นแบบลบ และขนาดของความต้านทานสามารถควบคุมได้ด้วยแรงดัน V_C

สำหรับค่าแรงดัน V_C ที่นำมาใช้นั้นจะต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ M_4 และ M_6 นำกระแส กล่าวคือจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้

$$V_C - V_{SS} \rangle V_{Tn} \quad (15)$$

หรือ

$$V_C \rangle V_{Tn} + V_{SS} \quad (16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณาจากสมการ (16) จะทำให้ทราบว่า ค่าแรงดัน V_C ที่นำมาใช้ในรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 เป็นได้เพียงแรงดันค่าลบเท่านั้น

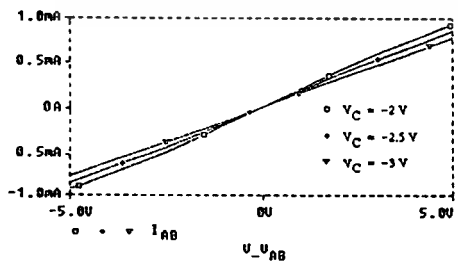
3. ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

เพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกและค่าลบที่นำเสนอ ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้พารามิเตอร์ที่เป็นแบบจำลองของเทคโนโลยี CMOS สำหรับ 2 μm ของ MOSIS ที่มีค่า $\mu_p C_{ox} = 2.226E-05$ A/V^2 และ V_{Tp} = 0.77 V ส่วนค่า W/L ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวใช้ค่าตามในตารางที่ 1 และใช้ VDD = -VSS = 5V

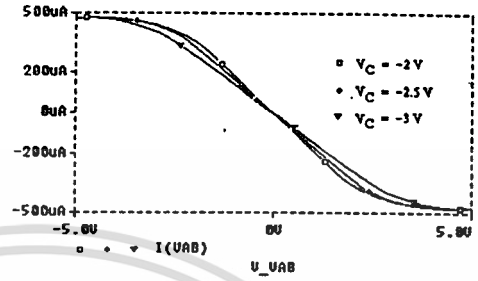
ตารางที่ 1 ค่า W/L ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร

ทรานซิสเตอร์	ค่า W/L (μm)
M_1 - M_2	24/10
M_3 - M_6	4/4
M_7 - M_{18}	60/18

โดยได้นำวงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกและค่าลบที่แสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 มาทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อแรงดันควบคุม V_C มีค่าต่างๆ กัน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ

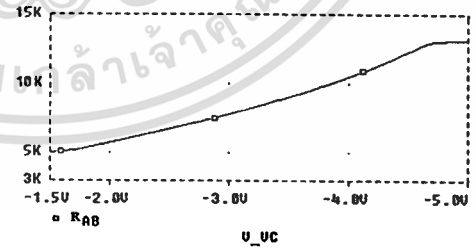


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อ V_C มีค่าต่างๆ กัน ของวงจรในรูปที่ 1



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_{AB} กับกระแส I_{AB} เมื่อ V_C มีค่าต่างๆ กัน ของวงจรในรูปที่ 2

จากผลการจำลองการทำงานของวงจรทั้งสองกรณี จะได้ว่าช่วงปฏิบัติงานของแรงดันในกรณีของวงจรความต้านทานแบบบวกจะมีค่าประมาณ ±4 V ส่วนในกรณีของวงจรความต้านทานแบบลบจะมีค่าประมาณ ±2 V สาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบมีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าวงจรความต้านทานแบบบวก อาจจะเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจรสะท้อนกระแสซึ่งในวงจรความต้านทานแบบลบใช้มากกว่าในวงจรความต้านทานแบบบวก ส่วนรูปที่ 5 เป็นผลการจำลองการทำงานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_{AB} และแรงดัน V_C



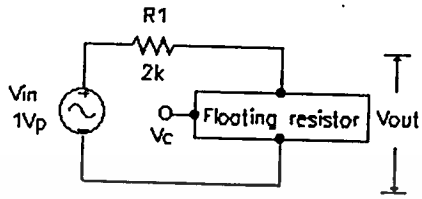
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_{AB} และแรงดัน V_C

เมื่อพิจารณาผลในรูปที่ 5 จะพบว่าแรงดัน V_C ที่ทำให้ได้ค่าของ R_{AB} มีความเป็นเชิงเส้นจะอยู่ในช่วง -2V ถึง -4V

สำหรับการทดสอบเพื่อดูย่านความถี่การทำงานของวงจร ได้ทำการทดสอบโดยการนำวงจรตามรูปที่ 1 หรือรูปที่ 2 มาประกอบเป็นวงจรที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6

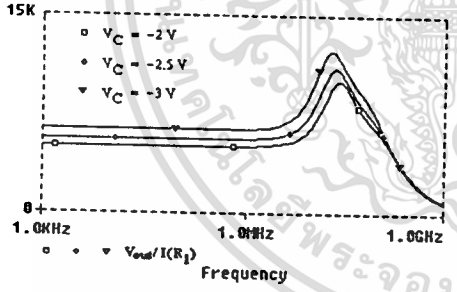
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ladkrabang Engineering Journal, Vol.17, No. 4, December 2000

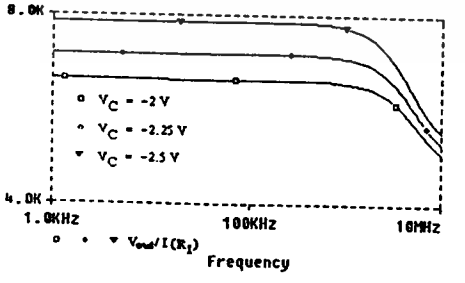


รูปที่ 6 วงจรที่ใช้ทดสอบหาย่านการทำงานของวงจรตัวต้านทาน

โดยแรงดัน V_{in} เป็นสัญญาณรูปไซน์ขนาด 1Vp ป้อนให้กับวงจร และมีค่าความต้านทานอนุกรมซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับความต้านทานของแหล่งกำเนิดสัญญาณขนาด 2 kΩ แล้วทำการวัดค่าความต้านทานของวงจรความต้านทานลอยตัว โดยให้แรงดันควบคุม V_C มีค่าต่างๆ กัน ได้ผลตอบสนองความถี่ของความต้านทานลอยตัวที่แสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 แสดงดังในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ



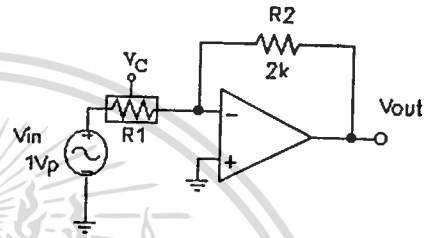
รูปที่ 7 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรูปที่ 1



รูปที่ 8 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรูปที่ 2

เมื่อสังเกตจากผลการเลียนแบบในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 จะพบว่าผลตอบสนองความถี่ของวงจรทั้งสองจะมีค่าประมาณ 1 MHz

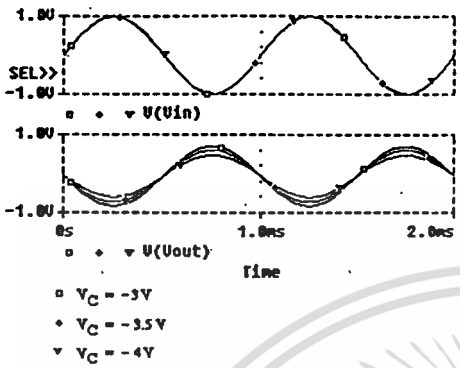
นอกจากนี้ยังได้แสดงการประยุกต์ใช้งานของวงจรความต้านทานที่นำเสนอในบทความนี้มาประกอบเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (inverting amplifier) ดังแสดงในรูปที่ 9



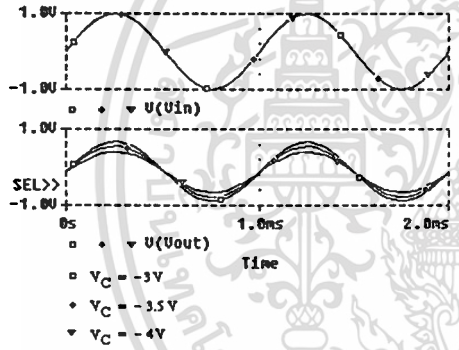
รูปที่ 9 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

โดยในการจำลองการทำงานนั้นใช้ออปแอมป์เบอร์ μA741 ใช้ R_2 เป็นความต้านทานที่มีค่าคงที่เท่ากับ 2 kΩ ใช้แรงดันอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ขนาด 1Vp ที่มีความถี่ 1kHz ในกรณีที่ค่า R_1 ถูกแทนด้วยวงจรในรูปที่ 1 ที่ใช้แรงดันควบคุม V_C มีค่าต่างๆ กัน ได้ผลดังในรูปที่ 10 ส่วนในกรณีที่ค่า R_1 ถูกแทนด้วยวงจรในรูปที่ 2 ที่ใช้แรงดันควบคุม V_C มีค่าต่างๆ กัน ได้ผลแสดงดังในรูปที่ 11 เมื่อสังเกตจากผลที่ได้นี้พบว่า ในกรณีที่ใช้วงจรตามรูปที่ 1 แทน R_1 แรงดันเอาต์พุต V_{out} ของวงจรจะกลับเฟสกับแรงดันอินพุตซึ่งแสดงว่าวงจรตามรูปที่ 1 แสดงตัวเป็นความต้านทานค่าบวก ส่วนในกรณีที่นำวงจรตามรูปที่ 2 มาใช้แทน R_1 พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีเฟสเหมือนกับแรงดันอินพุต ทั้งนี้เนื่องจากว่าวงจรตามรูปที่ 2 นั้นแสดงตัวเป็นความต้านทานค่าลบนั่นเอง และสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุตได้โดยการปรับแรงดันควบคุม V_C ทั้งสองกรณี กล่าวคือเมื่อแรงดันควบคุม V_C มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ค่าความต้านทาน R_1 เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้อัตราขยายของวงจรของรูปที่ 9 มีค่าลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีขนาดเล็กลงด้วย และจากผลการจำลองการทำงานในกรณีนี้จะพบว่าวงจรความต้านทานที่เสนอมีค่าแรงดันออฟเซ็ต (offset) เกิดขึ้นซึ่งมีค่าไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 ผลการจำลองการทำงานเมื่อ R_1 ถูกแทนด้วยวงจรในรูปที่ 1



รูปที่ 11 ผลการจำลองการทำงานเมื่อ R_1 ถูกแทนด้วยวงจรในรูปที่ 2

4. สรุป

วงจรความต้านทานลอยตัวค่าบวกและค่าลบที่นำเสนอในบทความนี้มีข้อดีคือ ให้ค่าความต้านทานที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง มีช่วงปฏิบัติงานกว้างและใช้จำนวนของมอสทรานซิสเตอร์ในการสร้างวงจรน้อยกล่าวคือในกรณีของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบบวกใช้เพียง 14 ตัว ส่วนกรณีของวงจรความต้านทานลอยตัวแบบลบใช้ 18 ตัว และค่าความต้านทานลอยตัวที่นำเสนอยังสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยใช้แรงดัน V_C นอกจากนั้นยังเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรอีกด้วย และแม้ว่าวงจรที่เสนอออกแบบโดยนำคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวมาประยุกต์ใช้ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความยาวของแชนแนล (channel-length modulation) จึงมีผลทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นได้ แต่ก็สามารถหลีกเลี่ยงปัญหานี้ได้โดยการใช้ค่าความยาวของแชนแนล (L) ที่มีค่ามากขึ้นตามความเหมาะสม

5. เอกสารอ้างอิง

[1] P.M. Vanpeteghem and G.L. Rice, "New CMOS Resistor Implementation for Linear IC Applications," Electron. Lett., Vol.24, No.5, pp. 288-290, 1998.

[2] S.P. Singh, J.V. Hanson and J. Vlach, "A New Floating Resistor For CMOS Technology," IEEE Trans. Circuits and System, Vol.36, No.9, pp.1217-1220, 1989.

[3] Z. Wang, "Novel Electronically-Controlled Floating Resistors Using MOS Transistors Operating in Saturation," Electron. Lett.,Vol.27, No.2, pp.188-189, 1991.

[4] G. Wilson and P.K. Chan, "Floating CMOS Resistor," Electron. Lett., Vol.29, No.3, pp.306-307, 1993.

[5] S. Sakurai and M. Ismail, "A CMOS Square-Law Programmable Floating Resistor," Proc. 1993 IEEE International Symposium On Circuits and Systems, (ISCAS'93), pp.1184-1187, 1993.

[6] H.O. Elwan, S.A. Mahmoud and A.M. Soliman, "CMOS Voltage Controlled floating Resistor," Int. J. Electronics, Vol. 81, No.5, pp.571-576, 1996.

[7] W. Surakampontorn, "CMOS Floating Voltage-Controlled Negative Resistor," Electron. Lett., Vol.28, No.15, pp.1457-1459, 1992.

[8] W. Kiranon, C. Leoscharataramdee, N. Kiatwarin and P. Wardkein, "Electronically Controlled Negative Resistance Based on Translinear Circuits," Proc. 1999 IEEE International Symposium On Intelligent Signal Processing and Communication System, (ISPACS'99), pp. 645-648,1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสิทธิพร เพ็ชรกิจ เกิดเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา 2532

ปัจจุบัน ทำหน้าที่เป็นอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้