การออกแบบวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่กินกำลังงานต่ำและไม่ขึ้นกับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อประยุกต์ใช้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง

นางสาวณัฐนิช เกียรติมณีรัตน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DESIGN OF THRESHOLD VOLTAGE INDEPENDENT LOW POWER CMOS RING OSCILLATOR FOR REAL TIME CLOCK APPLICATION

Miss Nattanich Kiattimaneeratana

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่กินกำลังงานต่ำและไม่ขึ้นกับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อประยุกต์ใช้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง
โดย	นางสาวณัฐนิช เกียรติมณีรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรเกษม งามนิล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐนิช เกียรติมณีรัตน์ : การออกแบบวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่กินกำลังงานต่ำและไม่ขึ้นกับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อประยุกต์ใช้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง. (A DESIGN OF THRESHOLD VOLTAGE INDEPENDENT LOW POWER CMOS RING OSCILLATOR FOR REAL TIME CLOCK APPLICATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. เอกชัย ลีลารัศมี, 77 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่ให้กำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่คงที่ และแม่นยำโดยไม่ต้องใช้ผลึกควอตซ์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบนี้ใช้หลักการอัดประจุด้วยกระแสคงที่ และคายประจุด้วยสวิตช์สลับกันไป โดยวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณ 3 ภาค (Stage) ต่อพ่วงกันเป็นวงแหวน (Ring) แต่ละภาคใช้ NMOS ขับแหล่งกำเนิดกระแส และตัวเก็บประจุขนาด 1 พิโคฟารัด แหล่งกำเนิดกระแสที่ใช้ได้ถูกออกแบบมาให้มีขนาดขึ้นกับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจึงทำให้ความถี่ไม่แปรตามแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนได้ และแสดงค่าความถี่ที่ได้จากการออกแบบโดยการวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบเปรียบเทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากผลการจำลองการทำงานของโปรแกรม HSPICE และโปรแกรมวาดลายวงจร ได้ผลการทดสอบโดยสร้างวงจรด้วยเทคโนโลยีระดับ 0.35 ไมครอน พบว่าวงจรสามารถสร้างความถี่ได้ตามต้องการโดยจะมีความผิดพลาด ±0.1% ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วงจรสามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยงตั้งแต่ 2.5 ถึง 3.3 โวลต์ วงจรดังกล่าวกินกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 5.08 ไมโครวัตต์ ที่แรงดันไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ และอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....	ลายมือชื่อนิสิต.....ณัฐนิช เกียรติมณีรัตน์.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2553.....	

5270669021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: CMOS RING OSCILLATOR / THRESHOLD VOLTAGE

NATTANICH KIATTIMANEERATANA : A DESIGN OF THRESHOLD VOLTAGE INDEPENDENT LOW POWER CMOS RING OSCILLATOR FOR REAL TIME CLOCK APPLICATION. ADVISOR : ASSOC. PROF. EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D., 77 pp.

This thesis presents the design of a CMOS ring oscillator that generates a triangular waveform with accurate and constant frequency but does not require a quartz crystal. The circuit is intended for real time clock application. This designed oscillator uses the principle of charging a capacitor with a constant current and discharging it with switch alternatively. The CMOS ring oscillator consists of 3-stage amplifiers in series connection. Each stage uses an NMOS to drive a current source and a 1pF capacitor. The current source is designed to depend on the threshold voltage to make the frequency independent of threshold voltage. To verify the analysis, the designed oscillation frequency is compared with simulated frequency using HSPICE and Layout Program in 0.35 micron CMOS technology. The result shows that the circuit can generate the desired frequency with ±0.1% error. Experimental results show that the circuit can operate from 2.5 to 3.3V. The circuit consumes an average power up to 5.08μW at 3.3V power supply and 27 °C.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department: Electrical Engineering Student's Signature ณัฐนิช เกียรติมณีรัตน์

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์และงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความรู้และประสบการณ์ดีๆ ทั้งทางด้านวิชาการ ด้านสังคมและอื่นๆ แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บริษัท ซิลิคอน คราฟต์ เทคโนโลยี จำกัด ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมให้ใช้งานสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ พี่ไพโรจน์ ศิรินามารัตนะ ที่สอนการใช้โปรแกรมต่างๆ ให้คำปรึกษาในการออกแบบวงจร ตลอดจนเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดสอบวงจรรวม

นอกจากนี้ยังมีเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบและประยุกต์วงจรรวม (IDAR) ที่คอยห่วงใย ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำ มิตรภาพและความรู้สึกดี ๆ ที่มีให้กันมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา อันเป็นที่เคารพรัก ที่คอยดูแลเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ........ ฉ

สารบัญ........ ช

สารบัญตาราง........ ญ

สารบัญภาพ........ ฎ

บทที่ 1 บทนำ........ 1

1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย........ 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ........ 4

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย 4

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 มอสเฟต........ 6

2.1.1 สมบัติแรงดันกระแสของมอสเฟต........ 6

2.1.2 ความจุแฝงภายในมอสเฟต 8

2.2 วงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror)........ 9

2.2.1 วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด (Cascode Current Mirror) 11

2.3 เงื่อนไข Barkhausen ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปไซน์........ 11

2.4 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปไซน์แบบวงแหวน 3 ภาค 13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

2.5 ออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยผลึก (Crystal controlled Oscillators) และความแม่นยำของผลึกควอทซ์ 16
2.6 สรุปท้ายบท 19
บทที่ 3 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค 20
3.1 วงจรพื้นฐานในอุดมคติ 20
3.2 ผลของความกว้างของทรานซิสเตอร์ 22
3.3 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน (CMOS Inverting Buffer 3-Stage Ring Oscillator) 26
3.4 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน (CMOS Inverting Amplifier 3-Stage Ring Oscillator) 29
3.5 การลดผลของความยาวช่องนำกระแสโดยใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด 32
3.5.1 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน 33
3.5.2 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน 35
3.6 วงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Voltage Compensated Current Generator) 38
3.7 สรุปท้ายบท 40
บทที่ 4 ผลการจำลองการทำงานของวงจร 41
4.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน 41
4.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบคาสโคดเมื่อใช้กระแสจากวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน 42
4.2.1 ผลการจำลองของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน 43

หน้า

4.2.2 ผลการจำลองของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค แบบมีวงจรขยายผกผัน 48
4.3 ผลของอุณหภูมิ 53
4.4 ผลของแรงดันไฟเลี้ยง 54
4.5 สรุปท้ายบท 55
บทที่ 5 การวาดลายวงจร 56
5.1 การวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ 57
5.2 ผลการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ 60
5.3 การหาขนาดจำกัดของแรงดันไฟเลี้ยงที่ควรใช้ในวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ ... 62
5.4 สรุปท้ายบท 64
บทที่ 6 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ 65
6.1 สรุป 65
6.1.1 วงจรจุดชนวนของชมิตต์ (Schmitt Trigger) 66
6.1.2 การออกแบบวงจรหารความถี่และการหาพลังงานของวงจรหารความถี่ 67
6.1.3 การออกแบบวงจรนับและวงจรถอดรหัส (Counter and Decoder Circuit) 71
6.1.4 การหาค่าพลังงานทั้งหมดของวงจรแอนะล็อกและวงจรดิจิทัล 72
6.2 ข้อเสนอแนะ 72
รายการอ้างอิง 73
ภาคผนวก 75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1 เปรียบเทียบค่าต่างๆของวงจรผลึกควอทซ์ วงจร Ring และเป้าหมาย (Target) ของวงจรที่ออกแบบ 3

ตารางที่ 2-1 ค่าความจุแฝงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอสเฟต 8

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบค่าต่างๆของแต่ละชนิดของผลึกควอทซ์ 18

ตารางที่ 3-1 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่า W ต่างๆของ NMOS ของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานโดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 25

ตารางที่ 3-2 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่า W ต่างๆของ NMOS ของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานโดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 26

ตารางที่ 3-3 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่า W ต่างๆของ NMOS ของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันโดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 29

ตารางที่ 3-4 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่า W ต่างๆของ NMOS ของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบมีวงจรขยายผกผันโดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 31

ตารางที่ 4-1 ขนาดทรานซิสเตอร์ของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน 42

ตารางที่ 4-2 ขนาดทรานซิสเตอร์ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค 43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 สัญลักษณ์แสดงแรงดันของ NMOS และ PMOS 6

รูปที่ 2-2 ตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในมอสเฟต 8

รูปที่ 2-3 ค่าความจุแฝงที่มีผลต่อการออกแบบวงจรในแต่ละย่านการทำงานของมอสเฟต 9

รูปที่ 2-4 วงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นของมอสเฟตชนิด NMOS และ PMOS 10

รูปที่ 2-5 การต่อคาสโคดของวงจรสะท้อนกระแสอย่างง่ายของมอสเฟตชนิด PMOS 11

รูปที่ 2-6 ขั้นตอนการออสซิลเลตเมื่อเทียบกับเวลาของวงจรป้อนกลับแบบลบ 12

รูปที่ 2-7 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน 3 ภาคที่ใช้ความต้านทานเป็นโหลด 13

รูปที่ 2-8 แบบจำลองเชิงเส้นของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน 3 ภาค 14

รูปที่ 2-9 ตำแหน่งของโพลในกรณีที่ A_0 มีค่าต่างๆ 15

รูปที่ 2-10 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่โดยใช้ผลึกควอทซ์ 16

รูปที่ 3-1 วงจรพื้นฐานของออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคในอุดมคติ 20

รูปที่ 3-2 สัญญาณแรงดันของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคในอุดมคติ 20

รูปที่ 3-3 สัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ Wn = 3.5 μm โดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 22

รูปที่ 3-4 สัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ Wn = 3500 μm โดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 23

รูปที่ 3-5 สัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ Wn = 3.5 μm และ Wn = 3500 μm โดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 23

รูปที่ 3-6 ผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากวงจรรูปที่ 3-1 โดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 24

หน้า

รูปที่ 3-7 ผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากวงจรรูปที่ 3-1 โดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 25

รูปที่ 3-8 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน 27

รูปที่ 3-9 วงจรผกผันแบบพื้นฐาน 27

รูปที่ 3-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า (V_I) กับแรงดันขาออก (V_{X2}) ของวงจรผกผันแบบเอาแหล่งกำเนิดกระแสเป็นโหลด 28

รูปที่ 3-11 ผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากวงจรรูปที่ 3-8 โดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 29

รูปที่ 3-12 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน 30

รูปที่ 3-13 ผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากวงจรรูปที่ 3-12 โดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 31

รูปที่ 3-14 เปรียบเทียบผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดขึ้นในวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้ง 3 แบบโดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS 32

รูปที่ 3-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องนำกระแสกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันที่ไม่ได้ต่อแบบคาสโคด 33

รูปที่ 3-16 การต่อคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันเพื่อเชื่อมกับการต่อคาสโคดของวงจรสะท้อนกระแส 34

รูปที่ 3-17 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องนำกระแสกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ต่อแบบคาสโคดดังรูปที่ 3-16 34

รูปที่ 3-18 เปรียบเทียบผลของความยาวช่องนำกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างการต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบพื้นฐานกับแบบคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน... 35

รูปที่ 3-19 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องนำกระแสกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่ไม่ได้ต่อแบบคาสโคด 36

หน้า

รูปที่ 3-20 การต่อคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันเพื่อเชื่อมกับการต่อคาสโคดของวงจรสะท้อนกระแส 36

รูปที่ 3-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องนำกระแสกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ต่อแบบคาสโคดดังรูปที่ 3-20 37

รูปที่ 3-22 เปรียบเทียบผลของความยาวช่องนำกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างการต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบพื้นฐานกับแบบคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบมีวงจรขยายผกผัน 37

รูปที่ 3-23 วงจรกำเนิดกระแสที่แปรตาม V_{TH} จ่ายกระแสไปยังวงจรรูปที่ 3-16 และรูปที่ 3-20 โดยได้ชดเชยผลของความยาวช่องนำกระแส 38

รูปที่ 4-1 แผนภาพโดยรวมของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 41

รูปที่ 4-2 ผลของความต้านทานต่อแรงดันที่ซอสของ M3a 42

รูปที่ 4-3 โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันที่ใช้ในการจำลองการทำงาน 43

รูปที่ 4-4 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นประ) กับสัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 (เส้นทึบ) 45

รูปที่ 4-5 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 (เส้นทึบ) กับสัญญาณแรงดันขาออก V_1 (เส้นประ) 45

รูปที่ 4-6 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นประ) กับสัญญาณแรงดันขาออก V_3 (เส้นทึบ) 46

รูปที่ 4-7 กระแสที่เกิดขึ้นของวงจรผกผันแบบพื้นฐาน (เส้นทึบ) กับแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นประ) 47

รูปที่ 4-8 โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่ใช้ในการจำลองการทำงาน 48

รูปที่ 4-9 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นทึบ) กับสัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 (เส้นประ) 49

หน้า

รูปที่ 4-10 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 (เส้นประ) กับสัญญาณแรงดันขาออก V_1 (เส้นทึบ)...50

รูปที่ 4-11 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นทึบ) กับสัญญาณแรงดันขาออก V_3 (เส้นประ)...50

รูปที่ 4-12 สัญญาณแรงดันขาออก (V_3) ของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ W_n เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร...52

รูปที่ 4-13 สัญญาณแรงดันขาออก (V_3) ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 4-8 เมื่อใช้ W_n เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร...52

รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน...53

รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟเลี้ยงกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน...54

รูปที่ 5-1 สัญลักษณ์ของวงจรออสซิลเลเตอร์ 3 ภาคที่รับกระแสจากวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน...57

รูปที่ 5-2 ผังวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ...57

รูปที่ 5-3 การวาดลายวงจรใน 1 ภาคของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ...58

รูปที่ 5-4 การสกัดข้อมูลจากลายวงจรใน 1 ภาคของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ...59

รูปที่ 5-5 การวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบทั้ง 3 ภาค...59

รูปที่ 5-6 ผลการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรรูปที่ 5-1...61

รูปที่ 5-7 สัญญาณแรงดันขาออกที่ได้จากการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ...61

รูปที่ 5-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความถี่ที่ได้จากการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ...62

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 5-9 ผังวงจรของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน.. 62

รูปที่ 5-10 สัญญาณแรงดันไฟเลี้ยงกับค่ากระแสของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน.... 63

รูปที่ 5-11 ค่ากระแสของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน.. 63

รูปที่ 6-1 แผนภาพโดยรวมของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง 65

รูปที่ 6-2 วงจรจุดชนวนของชมิตต์ 67

รูปที่ 6-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า (V_G) กับแรงดันขาออก (V_o) 67

รูปที่ 6-4 วงจรนับแบบอะซิงโครนัส... 68

รูปที่ 6-5 ผังวงจรของวงจรหารความถี่ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโปรแกรมวาดลายวงจร . 69

รูปที่ 6-6 วงจรขยายของรูปที่ 6-5 69

รูปที่ 6-7 ส่วนประกอบภายในของวงจรฟลิบฟลอป.. 69

รูปที่ 6-8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรหารความถี่ 70

รูปที่ 6-9 แผนภาพของวงจรนาฬิกา 71

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

วงจรนาฬิกาเวลาจริง (Real Time Clock) หรือ RTC เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณเวลาที่สามารถเก็บข้อมูลด้านเวลาต่างๆได้แก่ วันเดือนปี และเวลา โดยทั่วไปจะพบวงจรนาฬิกาเวลาจริงในคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงเวลาให้ผู้ใช้ได้อย่างสะดวก และง่ายดาย นอกจากนี้วงจรนาฬิกาเวลาจริงสามารถพบได้มากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย เพื่อใช้เป็นวงจรให้กำเนิดสัญญาณเวลาให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ วงจรนาฬิกาเวลาจริงส่วนมากจะใช้ผลึกควอทซ์ (Crystal) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ 32.768 กิโลเฮิรตซ์ [1] เพราะมีความแม่นยำสูง แต่มีข้อเสียตรงที่ผลึกควอทซ์มีขนาดใหญ่ไม่สามารถนำไปใส่รวมในแผงวงจรรวมได้ จึงได้มีการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่แบบใหม่โดยใช้ซี-มอสเฟต (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, C-MOSFET) ขึ้นซึ่งจะมีข้อดีตรงที่มีขนาดเล็กทำให้สามารถนำไปใส่รวมในแผงวงจรรวมได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอโครงสร้างของวงจรที่ให้กำเนิดสัญญาณความถี่ให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริงโดยใช้ซี-มอสเฟตขึ้นแทนผลึกควอทซ์

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นจะเห็นว่าวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่โดยใช้ผลึกควอทซ์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในช่วงแรกๆก่อนที่จะมีการพัฒนาวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาแบบใช้ซีมอสขึ้นมา โดยจะยกตัวอย่างเปรียบเทียบค่าต่างๆของผลึกควอทซ์ และวงจรแบบใช้เทคโนโลยีซี-มอสเฟตที่ได้ถูกพัฒนามา แสดงดังตารางที่ 1-1 [2] นอกจากค่าต่างๆที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยได้ยกตัวอย่างในตารางที่ 1-1 แล้วยังมีบริษัทที่นำมาผลิตขายจริง เช่น บริษัท Maxim [3] โดยบริษัท Maxim นี้ได้ผลิตวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ทั้งแบบที่ใช้ผลึกควอทซ์ และแบบที่ใช้เทคโนโลยีซี-มอสเฟต โดยในแบบที่ใช้ผลึกควอทซ์ แผงวงจรรวมที่ขายโดยทั่วไปนั้นจะเป็นวงจรนาฬิกาเวลาจริงที่มีวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่แบบใช้ผลึกควอทซ์รวมอยู่ด้วย ซึ่งจะกินกระแสในช่วงการเก็บเวลาต่ำสุดประมาณ 250 nA จะเห็นว่าวงจรกำเนิดกระแสแบบใช้ผลึกควอทซ์จะกินกระแสน้อยมากที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเป็นช่วงที่วงจรยังไม่ทำงาน หรือกล่าวได้ว่าเป็นช่วงที่รอคำสั่ง ดังนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับแบบที่ใช้เทคโนโลยีซี-มอสเฟตที่ออกแบบไม่ได้แต่ที่นำมากล่าวถึงเพราะว่าบริษัทส่วนมากมักจะบอกค่าพลังงานที่น้อยซึ่งเป็นค่าที่วงจรไม่สามารถทำงานได้ และเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นทำงานจะใช้เวลานานกว่าวงจร RC มาก ส่วนในแบบที่ใช้เทคโนโลยีซี-มอสเฟตจะใช้เวลาในการเริ่มต้นทำงานเร็วกว่าวงจรกำเนิดกระแสแบบใช้ผลึกควอทซ์

มาก และจะได้ว่าแบบที่ใช้เทคโนโลยีซี-มอสเฟตส่วนมากจะออกมาขายเฉพาะวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่อย่างเดียว โดยจะกินกระแสประมาณ 13μA โดยจะเป็นค่ากระแสตอนที่วงจรทำงานแล้ว ดังนั้นวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พัฒนาออกแบบให้กินกระแสต่ำกว่าค่าที่ได้กล่าวมาในข้างต้น

งานวิจัยที่ทำมาก่อนหน้ามีดังนี้ ออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมเพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิ [4] โดยวงจรนี้จะใช้วิธีควบคุมแรงดันเพื่อให้ความถี่ที่ได้มีค่าคงที่ โดยมีช่วงความถี่ที่ใช้ได้เท่ากับ 0.3-5 เมกะเฮิรตซ์ และมีความผิดพลาดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปเท่ากับ 3.33 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เทคโนโลยี 0.35 ไมครอน และยังมีการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมอย่างแพร่หลายซึ่งได้ชดเชยผลของกระบวนการผลิต อุณหภูมิ ในเทคโนโลยีที่หลากหลาย โดยได้เปรียบเทียบค่าต่างๆใน [5]

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรที่ให้กำเนิดสัญญาณความถี่โดยใช้ซี-มอสเฟตขึ้นโดยทำมาจากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนซึ่งจะให้กำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่คงที่ และแม่นยำโดยไม่ต้องใช้ผลึกควอตซ์ โดยใช้หลักการอัดประจุด้วยกระแสคงที่ และคายประจุด้วยสวิตซ์สลับกันไป วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณ 3 ภาค (Stage) ต่อพ่วงกันเป็นวงแหวน (Ring) แต่ละภาคใช้ NMOS ขับแหล่งกำเนิดกระแส และตัวเก็บประจุ หาก NMOS ทำงานในภาวะอิ่มตัว (Saturation) อัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) ที่ความถี่ต่ำของทั้ง 3 ภาค รวมกัน จะมีค่าสูงกว่า 1 มาก จึงไม่สามารถใช้เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ขนาดเล็กที่เรียกว่า Barkhausen Criteria [6] มาวิเคราะห์หาความถี่ของการแกว่ง (Oscillation) ได้ การวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้จึง ประมาณว่า NMOS ทำงานในภาวะ OFF กับ ON (หรือ Deep Triode)

เนื่องจากความถี่ที่เกิดจากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนนั้นมีค่าขึ้นกับค่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Voltage) โดยค่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจะขึ้นกับกระบวนการเจือสาร (Fabrication Process) และอุณหภูมิ [7] ดังนั้นแหล่งกำเนิดกระแสที่ใช้จะมีขนาดขึ้นกับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Voltage Threshold Compensator Circuit) ซึ่งสามารถชดเชยผลของส่วนกำเนิดสัญญาณทำให้ความถี่ไม่แปรตามแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนได้ และสุดท้ายนำสัญญาณขาออกที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์มาผ่านวงจรจุดชนวนของชมิตต์ (Schmitt trigger Circuit) เพื่อแปลงสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ผลการทดสอบโดยสร้างวงจรด้วยเทคโนโลยีระดับ 0.35 ไมครอน ให้กำเนิดความถี่ 32.768 kHz

ตารางที่ 1-1 เปรียบเทียบค่าต่างๆของวงจรผลึกควอทซ์ วงจร Ring และเป้าหมาย (Target) ของวงจรที่ออกแบบ

	Conventional Oscillators		Target
Implementation	Off-Chip	On-Chip	On-Chip
Oscillation Type	Xtal	Ring	Ring
Frequency	1kHz-100MHz	10MHz-1GHz	32kHz-1MHz
Freq. variation	1-100ppm	$\pm 5\%$	$< \pm 1\%$
Current	$10\mu A - 100mA$	$10\mu A - 100mA$	$80nA - 1\mu A$
Size	$< 5cm^3$	$0.01mm^2$	$< 5\mu m^2$

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค เพื่อใช้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริงโดยไม่ใช้ผลึกควอทซ์
2. ออกแบบโครงสร้างของวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค ชนิดใหม่ ที่รวมวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและลดผลของความยาวช่องนำกระแส (λ)
3. ออกแบบวงจรนาฬิกาเวลาจริงที่กินพลังงานต่ำโดยใช้วงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่พัฒนาขึ้น
4. ออกแบบวงจร Layout ในส่วนของวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. นำเสนอวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบคาสโคดที่มีภาคบัฟเฟอร์และวงจรสร้างกระแสที่แปรตามแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อสร้างสัญญาณความถี่ให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริงโดยชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและผลของความยาวช่องนำกระแส โดยใช้เทคโนโลยี 0.18 um หรือ 0.35 um ทรานซิสเตอร์
2. ออกแบบวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์ตามข้อ 1 ที่ให้กำเนิดสัญญาณความถี่ 32.768 kHz ± 2 % และกินกำลังงานไม่เกิน 10 μW
3. ใช้โปรแกรม H-spice ในการจำลองวงจรและทดสอบ

4. ออกแบบวงจรนับและวงจรถอดรหัสและประมาณกำลังสูญเสีย
5. ออกแบบวงจร Layout ในส่วนของวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาโปรแกรม H-spice ในการจำลองวงจร
2. ศึกษาวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค
3. ศึกษาวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและวงจรจุดชนวนของชมิตต์
4. ทดสอบวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและวงจรจุดชนวนของชมิตต์
5. ออกแบบและทดสอบวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวง แหวน 3 ภาค เพื่อชดเชยความผิดพลาดเนื่องจากขนาดของทรานซิสเตอร์ NMOS
6. ออกแบบและทดสอบวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค โดยชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและผลของความยาวช่องนำกระแส
7. เขียน CODE VHDL เพื่อหาค่าพลังงานที่ใช้คร่าว ๆ ของวงจรนาฬิกาเวลาจริง
8. ออกแบบและทดสอบ วงจรให้กำเนิดสัญญาณความถี่โครงสร้างใหม่
9. ออกแบบวงจร Layout ในส่วนของวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับภาษา SPICE
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับภาษา VHDL
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการออกแบบวงจร Layout
4. ได้รับความรู้เกี่ยวกับวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและวงจรจุดชนวนของชมิตต์
5. เรียนรู้วิธีการทำงานของวงจรซีมอสออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค
6. เรียนรู้วิธีการออกแบบและทดสอบวงจรรวม

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งการนำเสนอเนื้อหาออกเป็น 6 บท ได้แก่ บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขต และวิธีการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนงานวิจัยที่ได้มีผู้ศึกษามาก่อน บทที่ 3 กล่าวถึงวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคพื้นฐาน การจำลองการทำงานในกรณีอุดมคติและกรณีไม่อุดมคติ วิธีการแก้ไขผลความกว้างของทรานซิสเตอร์ของวงจรที่จะเกิดเมื่อวงจรทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีไม่อุดมคติโดยเสนอรายละเอียดของการดัดแปลงวงจรภาคแอนะล็อกรวมถึงวิธีการคำนวณต่างๆ ได้แก่ พารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบวงจรและค่ากำลังไฟฟ้าของวงจร บทที่ 4 จะแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรที่ได้ออกแบบโดยจะจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม H-spice บทที่ 5 กล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบเพื่อวาดลายวงจรโดยจะวาดลายวงจรในส่วนของวงจรแอนะล็อกซึ่งประกอบด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคที่ออกแบบ โดยจะวาดลายวงจรด้วยมือ และวัดขนาดของวงจรที่ผ่านการวาดลายวงจรในส่วนนี้ออกมาด้วย บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป โดยได้วัดค่ากำลังงานที่ใช้ของวงจรหารความถี่ซึ่งเป็นวงจรควบคุมภาคดิจิทัลโดยใช้โปรแกรมวาดลายวงจร ซึ่งจะถูกวาดด้วยโปรแกรมช่วยในการสร้างลายอัตโนมัติ

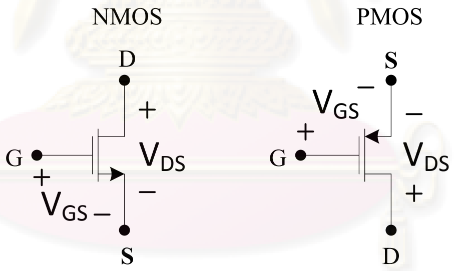
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอสเฟต

มอสเฟต (MOSFET) ย่อมาจาก Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor เป็นอุปกรณ์แบบ “Voltage-Controlled Current Source” คือแรงดันที่ตกคร่อมขั้วทางขาเข้า (Input) เป็นตัวควบคุมกระแสขาออก (Output) โดยกระแสของมอสเฟตถูกควบคุมโดยสนามไฟฟ้า (Electric Field, E-Field) ในแนวตั้งและแนวนอน (แนวเดียวกับทิศทางการไหลของกระแส) หรือกล่าวได้ว่าผลการเปลี่ยนแปลงของกระแสของมอสเฟตนั้น เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากผลของสนามไฟฟ้า มอสเฟตจะทำหน้าที่เหมือนสวิตซ์โดยในตอนที่สวิตซ์ทำงานทรานซิสเตอร์จะเชื่อมขั้วซอส (S) และขั้วเดรน (D) เข้าหากันเมื่อแรงดันที่เกต (G) มีค่าสูง (high) และในตอนที่สวิตซ์ไม่ทำงานขั้วซอสและขั้วเดรนจะแยกออกจากกันเมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่ำ (low) และได้แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 สัญลักษณ์แสดงแรงดันของ NMOS และ PMOS

2.1.1 <u>สมบัติแรงดันกระแสของมอสเฟต</u>

การทำงานของมอสเฟตทั้ง NMOS และ PMOS ได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ย่านหลักๆโดยในแต่ละย่านการทำงานนี้จะถูกแบ่งโดยค่าของแรงดันที่เกิดขึ้นในตัวของมอสเฟต จะหาค่ากระแสที่เกิดขึ้น [7] ได้ดังนี้ โดยพิจารณาดูรูปที่ 2-1 ประกอบ

พิจารณา NMOS จะได้

ช่วง off : เมื่อ $V_{GS} < V_{TH}$

จะได้ $I_D = 0$

ช่วง Triode : เมื่อ $V_{GS} > V_{TH}$ และ $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$

จะได้ $$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}\left[(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2\right](1+\lambda) \quad (2\text{-}1)$$

ช่วง Saturation : เมื่อ $V_{GS} > V_{TH}$ และ $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$

จะได้ $$I_D = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{TH})^2(1+\lambda V_{DS}) \quad (2\text{-}2)$$

เมื่อ $C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}$ (F/cm^2), ε_{ox} คือค่าอัตราความจุกระแสไฟฟ้า (Permittivity) ของซิลิกอนไดออกไซด์ (F/cm), t_{ox} คือ ค่าความหนาของชั้นเกตออกไซด์ (cm), μ_n คือ ความสามารถในการเคลื่อนไหว (Mobility) ของอิเล็กตรอน (cm^2/V-s), W/L = อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของมอสเฟต (aspect ratio)

พิจารณา PMOS จะได้

ช่วง off : เมื่อ $V_{GS} > V_{TH}$

จะได้ $I_D = 0$

ช่วง Triode : เมื่อ $V_{GS} < V_{TH}$ และ $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$

จะได้ $$I_D = -\mu_p C_{ox} \frac{W}{L}\left[(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2\right](1+\lambda) \quad (2\text{-}3)$$

ช่วง Saturation : เมื่อ $V_{GS} < V_{TH}$ และ $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$

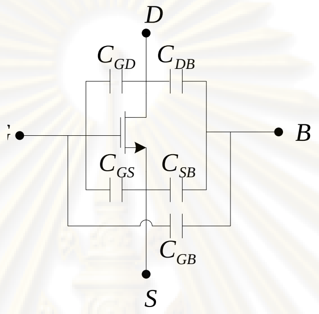
จะได้ $$I_D = -\frac{1}{2}\mu_p C_{ox} \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{TH})^2(1+\lambda V_{DS}) \quad (2\text{-}4)$$

เมื่อ μ_p คือ ความสามารถในการเคลื่อนไหว (Mobility) ของโฮล (cm^2/V-s) และ ค่าของ V_{GS}, V_{DS}, V_{TH}, V_{OD} และ I_D มีค่าเป็นลบ

จากสมการย่านการทำงานในช่วง Triode และในช่วง Saturation ของมอสเฟตทั้งสองชนิดจะได้ว่าผลของความยาวช่องนำกระแส (λ) มีผลต่อย่านการทำงานของมอสเฟตทั้งสองด้วย

2.1.2 <u>ความจุแฝงภายในมอสเฟต</u>

ในวงจรแอนะล็อกทั่วไป ตัวเก็บประจุที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์จำเป็นต้องนำมาพิจารณาด้วยสำหรับการออกแบบวงจร โดยตัวเก็บประจุที่จะกล่าวถึงนี้เป็นตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นเองภายในมอสเฟต โดยตัวเก็บประจุแฝงนี้ [8] จะเกิดขึ้นในรอยต่อของทุก ๆ สองจากสี่ขั้วของมอสเฟตดังรูปที่ 2-2 โดยตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นนั้นเป็นตัวเก็บประจุที่ไม่เชิงเส้น ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในการออกแบบวงจร และค่าความจุแฝงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอสเฟตได้แสดงดังตารางที่ 2-1

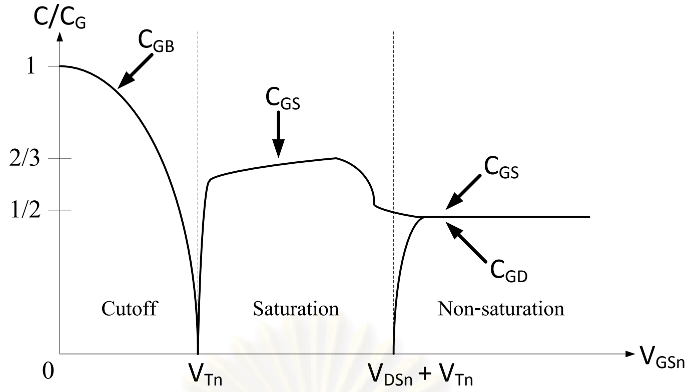


รูปที่ 2-2 ตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในมอสเฟต

ตารางที่ 2-1 ค่าความจุแฝงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอสเฟต

Name	Off	Triode	Saturation
Cgd	CGDO × W	1/2×WLC'ox	CGDO × W
Cdb	Cjd	Cjd	Cjd
Cgb	C'oxWLeff + CGBO×L	CGBO × L	CGBO × L
Cgs	CGSO × W	1/2×WLC'ox	2/3×WLC'ox
Csb	Cjs	Cjs	Cjs

จากตารางที่ 2-1 แสดงค่าความจุแฝงทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของมอสเฟต โดยจะได้ว่าค่าความจุแฝงที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้ในทุกย่านการทำงานของมอสเฟต โดยค่าความจุแฝงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของมอสเฟตบางค่ามีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ แต่มีบางค่าที่ไม่สามารถละทิ้งได้หรือกล่าวได้ว่ามีผลต่อการออกแบบวงจร ดังนั้นจึงสรุปค่าความจุแฝงที่มีผลต่อการออกแบบวงจรออกมาแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 2-3 โดยจะพิจารณาในแต่ละย่านการทำงาน



รูปที่ 2-3 ค่าความจุแฝงที่มีผลต่อการออกแบบวงจรในแต่ละย่านการทำงานของมอสเฟต

คุณสมบัติของตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นในมอสเฟตมีดังนี้

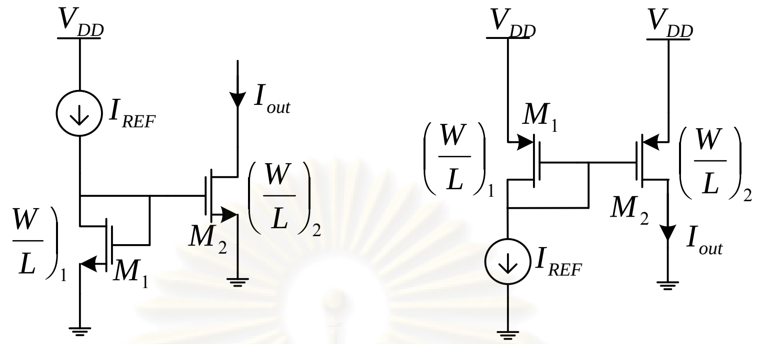
- จำกัดความเร็วในการทำงานของวงจร
- มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละย่านการทำงานของมอสเฟต
- สามารถคำนวณได้จากขนาด และรูปร่างของมอสเฟต ค่าคงที่ของสารไดอิเล็กตริก (dielectric) ที่ใช้ทำเกต (Gate) และการโดป (dope) สารเจือ
- มีขนาดแปรผันตรงกับขนาดของมอสเฟต

จากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นในมอสเฟตที่ได้กล่าวมานี้จะเห็นว่าตัวเก็บประจุแฝงจะมีค่าขึ้นกับขนาดของมอสเฟตโดยตรง และตัวเก็บประจุแฝงยังเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่ตกคร่อมอีกด้วย ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงค่าตัวเก็บประจุแฝงที่จะเกิดขึ้นในมอสเฟตเพื่อที่จะไม่มีปัญหาในการออกแบบวงจร นอกจากนี้ยังมีตัวเก็บประจุอีกหนึ่งประเภทที่มักใช้ในวงจรแอนะล็อกทั่วไปโดยจะเป็นประเภทที่ต้องการนำมาใช้ นั่นคือตัวเก็บประจุเชิงเส้นซึ่งจะมีค่าไม่ขึ้นกับแรงดันที่ตกคร่อม ตัวเก็บประจุประเภทนี้มักนิยมนำมาใช้ในการออกแบบวงจรได้อย่างแพร่หลายอีกทั้งในบางวงจรยังสามารถช่วยลดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นได้อีกด้วย

2.2 **วงจรสะท้อนกระแส** (Current Mirror)

ในระบบสัญญาณแอนะล็อก วงจรสะท้อนกระแส คือ วงจรกำเนิดกระแสที่สามารถคัดลอกกระแสไฟฟ้าในสายอ้างอิงกับอีกสายที่ต้องการได้ ส่วนมากวงจรสะท้อนกระแสจะถูกใช้ในกรณีต้องการใช้กระแสที่มาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน เพื่อป้อนเข้าไปที่หลายๆส่วนของวงจร โดยกระแสที่ได้

ในแต่ละส่วนของวงจรจะไม่ผิดเพี้ยนไปจากเดิมซึ่งจะยึดกระแสไฟฟ้าในสายอ้างอิงเป็นตัวหลัก วงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 วงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นของมอสเฟตชนิด NMOS และ PMOS

หาความสัมพันธ์ของกระแสที่เกิดขึ้นในวงจรสะท้อนกระแสทั้งสองด้านโดยในที่นี้จะยกตัวอย่างของวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นของมอสเฟตชนิด PMOS ดังแสดงในรูปที่ 2-4 ดังนั้นเขียนสมการได้ดังนี้

$$I_{ref} = -\frac{1}{2}\mu_p C_{OX}\left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS1}) \qquad (2\text{-}5)$$

$$I_{out} = -\frac{1}{2}\mu_p C_{OX}\left(\frac{W}{L}\right)_2 (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS2}) \qquad (2\text{-}6)$$

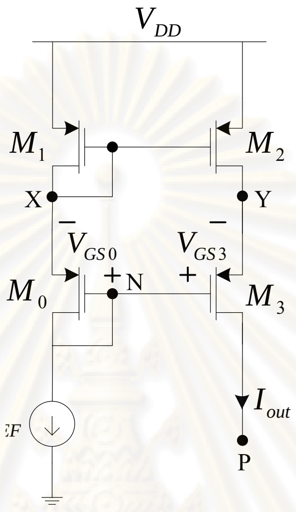
จากสมการที่ (2-5) และ (2-6) จะได้

$$\frac{I_{out}}{I_{ref}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \times \frac{1 + \lambda V_{DS2}}{1 + \lambda V_{DS1}} \qquad (2\text{-}7)$$

จากสมการข้างต้นจะได้ว่าค่าของความยาวช่องนำกระแสมีผลต่อวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นดังนั้นจึงได้ใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคดมาช่วยลดผลของความยาวช่องนำกระแสโดยจะกล่าวต่อไป

2.2.1 <u>วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด (Cascode Current Mirror)</u>

จากหัวข้อ 2.2 เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-7) จะได้ว่าความยาวช่องนำกระแสมีผลต่อวงจรสะท้อนกระแสอย่างมากดังนั้นจึงใช้การต่อวงจรแบบคาสโคด (Cascode) เพื่อกำจัดผลของความยาวช่องนำกระแสทิ้งไป ดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 การต่อคาสโคดของวงจรสะท้อนกระแสอย่างง่ายของมอสเฟตชนิด PMOS

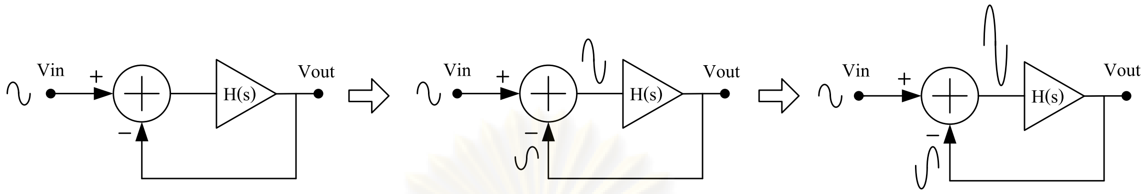
เมื่อต่อโนด N ที่เกตของทรานซิสเตอร์ M3 ดังรูปที่ 2-5 จะได้ $V_X - |V_{GS0}| = V_Y - |V_{GS3}|$ เช่นนี้ถ้า$(W/L)_3/(W/L)_0 = (W/L)_2/(W/L)_1$ จะทำให้ $|V_{GS3}| = |V_{GS0}|$ และ $V_X = V_Y$ ดังนั้นจะได้ $V_{DS1} = V_{DS2}$ และเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2-7) จะทำให้สามารถกำจัดผลของความยาวช่องนำกระแสทิ้งไปได้โดยจะได้สมการใหม่ดังสมการที่ (2-8)

$$\frac{I_{out}}{I_{ref}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \qquad (2\text{-}8)$$

2.3 **เงื่อนไข Barkhausen ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปไซน์**

ในหัวข้อนี้ [6] จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของออสซิลเลเตอร์ ซึ่งจ่ายสัญญาณออกในลักษณะของรูปไซน์ ซึ่งทฤษฎีที่จะกล่าวถึงนี้ ใช้ได้กับออสซิลเลเตอร์สัญญาณรูปไซน์ทุกแบบ เมื่อวิเคราะห์การออสซิลเลตของวงจรซึ่งจะยกตัวอย่างขั้นตอนการออสซิลเลตเมื่อเทียบกับเวลาของการป้อนกลับแบบลบดังรูปที่ 2-6 โดยจะได้ว่าสัญญาณป้อนกลับของการป้อนกลับแบบลบนี้ คือสัญญาณจำลองที่กลับเฟส (Invert) ของสัญญาณขาเข้า ซึ่งเมื่อนำสัญญาณป้อนกลับมาลบกับสัญญาณขาเข้า

จะได้สัญญาณที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นวงจรจึงสามารถทำงานต่อเนื่องโดยการนำกลับมาสร้างใหม่ได้ โดยสัญญาณที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนออสซิลเลต และสำหรับวงจรป้อนกลับแบบลบนี้จะมีการเลื่อนเฟส (Phase Shift) เท่ากับ 180 องศา



รูปที่ 2-6 ขั้นตอนการออสซิลเลตเมื่อเทียบกับเวลาของวงจรป้อนกลับแบบลบ

หาค่าฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของวงจรป้อนกลับแบบลบ (Unity-Gain Negative Feedback Circuit) จากรูปที่ 2-6 ได้ดังนี้

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{H(s)}{1+H(s)} \quad (2\text{-}9)$$

จากสมการที่ (2-9) กำหนดให้ $s = j\omega_0$ และถ้า $H(j\omega_0)$ = -1 จะได้ว่าค่าฟังก์ชันถ่ายโอนจะเข้าสู่ค่าอนันต์ที่ ω_0 ซึ่งไม่นิยาม ดังนั้นวงจรจะออสซิลเลตได้เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไข 2 ข้อดังนี้

เกณฑ์ของขนาด : $|H(j\omega_0)| \geq 1$ (2-10)

เกณฑ์ของเฟส : $|\angle H(j\omega_0)| = 180^\circ$ (2-11)

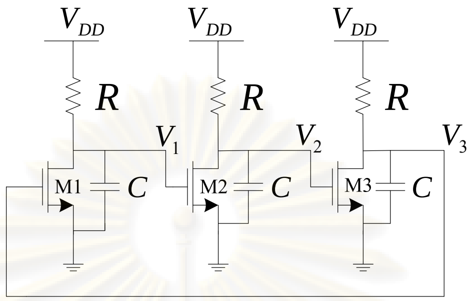
เมื่อ $H(j\omega_0)$ คือ อัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) ของวงจรออสซิลเลเตอร์

จากสมการที่ (2-10) และสมการที่ (2-11) เป็นเงื่อนไขสำหรับการออสซิลเลตของการกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ขนาดเล็กที่เรียกว่าเงื่อนไข Barkhausen (Barkhausen Criteria)

โดยทั่วไปส่วนการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์จะอาศัยการป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) ซึ่งทำให้สัญญาณที่ความถี่หนึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถให้กำเนิดสัญญาณความถี่นั้นได้เอง โดยสัญญาณขาออกที่ได้จะเป็นสัญญาณรายคาบซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของแรงดัน ซึ่งจะใช้หลักการเดียวกับการป้อนกลับแบบลบดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

2.4 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปไซน์แบบวงแหวน 3 ภาค

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน 3 ภาคที่ให้กำเนิดสัญญาณรูปไซน์ [6] โดยจะพิจารณาดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-7 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน 3 ภาคที่ใช้ความต้านทานเป็นโหลด

จากวงจรในรูปที่ 2-7 คำนวณค่าอัตราขยายวงรอบในแต่ละภาคจะได้เท่ากับ $-\frac{A_0}{(1+\frac{s}{\omega_0})}$ โดยในการคำนวณนี้จะละทิ้งผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้น ดังนั้นจะได้ค่าอัตราขยายวงรอบของทั้ง 3 ภาคมีค่าเท่ากับ

$$H(s) = -\frac{A_0^3}{(1+\frac{s}{\omega_0})^3} \tag{2-12}$$

วงจรจะออสซิลเลตก็ต่อเมื่อความถี่ของการแกว่ง (Oscillation) ขึ้นกับการเลื่อนเฟสเท่ากับ 180 องศา ดังนั้นแต่ละภาคจะมีการเลื่อนเฟสเท่ากับ 60 องศา หาค่าความถี่ของการแกว่งที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$\tan^{-1}\frac{\omega_{osc}}{\omega_0} = 60^o \tag{2-13}$$

หรือ

$$\omega_{osc} = \sqrt{3}\omega_0 \tag{2-14}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

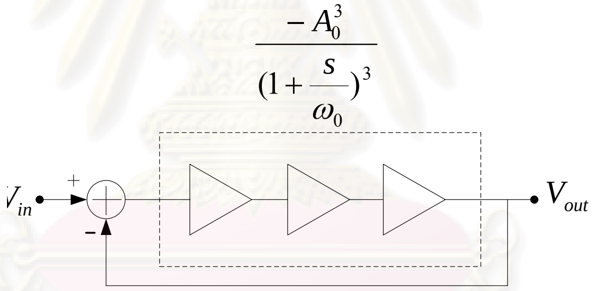
ขนาดของอัตราขยายวงรอบที่มีค่าน้อยที่สุดที่จะออสซิลเลตได้จะต้องมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น จะได้

$$\frac{A_0^3}{\left[\sqrt{1+(\frac{\omega_{osc}}{\omega_0})^2}\right]^3}=1 \quad (2\text{-}15)$$

จากสมการที่ (2-14) กับ (2-15) จะได้

$$A_0 = 2 \quad (2\text{-}16)$$

ดังนั้นสรุปได้ว่าวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน 3 ภาคต้องการอัตราขยายของแต่ละภาคที่ความถี่ต่ำเท่ากับ 2 แต่ถ้าจะพิจารณากรณีที่ $A_0 \neq 2$ จากเงื่อนไข Barkhausen จะได้ว่าถ้า $A_0 < 2$ วงจรจะไม่ออสซิลเลต แต่ถ้า $A_0 > 2$ จะเกิดผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-8 แบบจำลองเชิงเส้นของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน 3 ภาค

ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของวงจรป้อนกลับแบบลบจากสมการที่ (2-9) เมื่อแทนค่าของสมการที่ (2-12) ลงไปดังแสดงในรูปที่ 2-8 ประกอบ จะได้

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s)=\frac{\frac{-A_0^3}{(1+s/\omega_0)^3}}{1+\frac{A_0^3}{(1+s/\omega_0)^3}} \quad (2\text{-}17)$$

$$=\frac{-A_0^3}{(1+s/\omega_0)^3+A_0^3} \quad (2\text{-}18)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คิดที่ตัวส่วน จะได้

$$(1+\frac{S}{\omega_0})^3 + A_0^3 = (1+\frac{s}{\omega_0}+A_0)\left[(1+\frac{s}{\omega_0})^2 - (1+\frac{s}{\omega_0})A_0 + A_0^2\right] \quad (2\text{-}19)$$

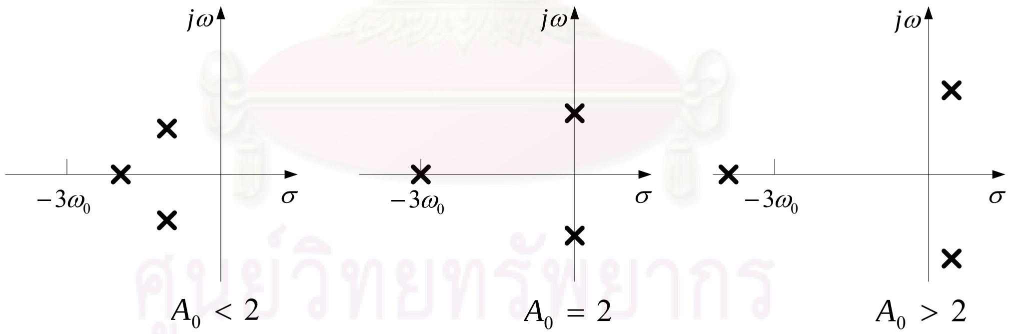
ดังนั้น จะได้โพล (poles) ทั้งหมด 3 โพลดังนี้

$$s_1 = (-A_0 - 1)\omega_0 \quad (2\text{-}20)$$

$$s_{2,3} = [\frac{A_0(1 \pm j\sqrt{3})}{2} - 1]\omega_0 \quad (2\text{-}21)$$

เมื่อค่าของ A_0 มีค่าเป็นบวก โพลแรกเมื่อพิจารณาในรูปของเอ็กซ์โพเนลเชียล (exponential) : $\exp[(-A_0 - 1)\omega_0 t]$ จะสามารถละทิ้งได้ในจุดอิ่มตัว (Steady State) โดยจะแสดงตำแหน่งของโพลในกรณีที่ A_0 มีค่าต่างๆในรูปที่ 2-9 ดังนั้นเมื่อละทิ้งผลของ s_1 จะได้

$$V_{out}(t) = a\exp(\frac{A_0 - 2}{2}\omega_0 t)\cos(\frac{A_0\sqrt{3}}{2}\omega_0 t) \quad (2\text{-}22)$$

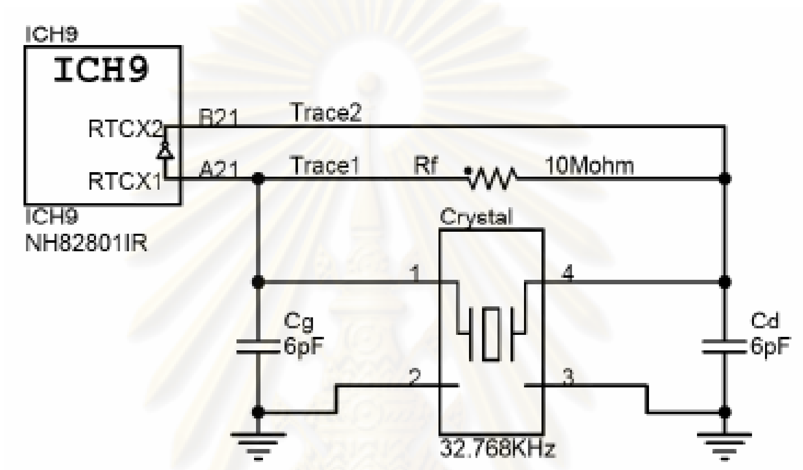


รูปที่ 2-9 ตำแหน่งของโพลในกรณีที่ A_0 มีค่าต่างๆ

ดังนั้นจะได้ว่าถ้า $A_0 = 2$ สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณรูปไซน์พอดี แต่ถ้า $A_0 > 2$ สัญญาณที่ได้จะเริ่มไม่เป็นรูปไซน์ เพราะค่าของเอ็กซ์โปเนนเชียล จะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าอนันต์ ดังนั้นในกรณีที่ $A_0 > 2$ จึงไม่สามารถพิจารณาโดยใช้เงื่อนไข Barkhausen ได้

2.5 ออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยผลึก (Crystal controlled Oscillators) และความแม่นยำของผลึกควอทซ์

วงจรออสซิลเลเตอร์มีหลายแบบด้วยกันแต่ในที่นี้ได้นำมากล่าวเพียงแต่วงจรออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยผลึก เพราะเนื่องจากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยผลึกนี้ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ที่เป็นเช่นนี้เพราะก้อนผลึกมีความแม่นยำมาก โดยจะยกตัวอย่างวงจรออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยผลึกดังรูปที่ 2-10 [1]



รูปที่ 2-10 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่โดยใช้ผลึกควอทซ์

ก้อนผลึกที่จะใช้ในการควบคุมความถี่ [9] เราจะนิยมใช้ผลึกที่มีคุณสมบัติพีโซอิเล็กตริก (Piezoelectric crystals) มากกว่าผลึกควอทซ์ที่มีคุณสมบัติประเภทอื่น เช่น แมกนีโตสตริกตีฟ (Magneto-strictive) เพราะว่ามีความสะดวกในการใช้งานมากที่สุด โดยแว่นผลึก (Crystal wafer) พีโซอิเล็กตริกจะมีคุณสมบัติหลักคือ เมื่อผิวทั้งสองข้างของแว่นผลึกถูกบีบหรืออัดด้วยแรงกล จะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมผิวทั้งสอง ปรากฏการณ์ดังกล่าวมักจะเกิดจากลักษณะการเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างของผลึก เมื่อมีแรงกดมาบีบหรืออัด จะทำให้อะตอมในโครงสร้างของผลึกมีการขยับตัวเล็กน้อย ทำให้มีความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นในโครงสร้างของผลึก ซึ่งจะปรากฏผลลัพธ์เป็นแรงดันตกคร่อมผิวของแว่นผลึก โดยค่าของแรงดันต่อหน่วยของแรงกลจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลึกนั้นๆ

ค่าQ (Quality factor) [10] คือ ค่าประสิทธิภาพ สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้ คือ

$$Q = \frac{f_0}{BW} \tag{2-23}$$

และ $$BW = f_{C2} - f_{C1} = |f_{C1} - f_{C2}|, \qquad (2.24)$$

$$f_0 = \sqrt{f_{C2} \times f_{C1}} \qquad (2\text{-}25)$$

โดยที่ BW คือค่าของแถบความถี่ที่ต้องการให้ผ่าน, f_0 คือค่าของความถี่ศูนย์กลาง, f_{C1} คือค่าของความถี่ตัดด้านต่ำ, f_{C2} คือค่าความถี่ตัดด้านสูง

หรือเราออกแบบค่า BW และ f_0 โดยสามารถหาค่า f_{C1} และ f_{C2} ได้จากสูตรดังนี้ คือ

$$f_{C1} = \sqrt{\frac{BW^2}{4} + (f_0)^2} - \left(\frac{BW}{2}\right), \qquad (2\text{-}26)$$

$$f_{C2} = f_{C1} + BW \qquad (2\text{-}27)$$

สารพีโซอิเล็กตริกซึ่งเป็นคุณสมบัติของผลึกที่เรานิยมใช้ในการควบคุมความถี่ของออสซิลเลเตอร์มี 2 ประเภท คือ

1. ผลึกควอทซ์ (Quartz crystal) หรือ SiO_2 ในลักษณะของผลึก ซึ่งในปัจจุบันนี้เราจะไม่ใช้ผลึกควอทซ์จากธรรมชาติ เพราะมักจะมีจุดเสื่อมในโครงผลึก (Crystal defects) มาก ซึ่งจะมีผลทำให้ค่า Q ต่ำ แต่เราจะนิยมใช้ผลึกควอทซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แทน เพราะมีคุณภาพสูงและราคาถูก ทั้งยังใช้งานที่ความถี่สูงได้อีกด้วย
2. สารเซรามิก (หรือกระเบื้อง) บางชนิด เช่น PZT (Lead-Zirconate-Titanate) ซึ่งเมื่อได้ผ่านกระบวนการโปลลิง (Poling) ที่ถูกต้อง คือ ผ่านสนามไฟฟ้า DC ณ อุณหภูมิสูง แล้วปล่อยให้เย็นลงภายใต้สนามไฟฟ้า DC นั้น จะมีคุณสมบัติเป็นสารพีโซอิเล็กตริกซึ่งจะมีราคาถูกกว่าผลึกควอทซ์มาก และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกลสูงกว่าผลึกควอทซ์มากเช่นกัน แต่ค่า Q จะสู้ผลึกควอทซ์ไม่ได้ โดยเฉพาะที่ความถี่สูง

ดังนั้นในวงจรนาฬิกาเวลาจริงส่วนมากจึงได้นิยมนำผลึกควอทซ์มาใช้ในการให้กำเนิดสัญญาณความถี่ โดยถ้าจัดจำพวกตามความแตกต่างของวิธีการควบคุมอุณหภูมิผลึกควอทซ์จะแบ่งตามความสามารถในการชดเชยอุณหภูมิโดยเรียงจากน้อยไปมากโดยมี 4 ชนิด [11] ดังนี้ SPXO (Simple Packaged Crystal Oscillator), TCXO (Temperature Compensation Crystal

Oscillator), OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator) และ DOCXO (Double Oven Controlled Crystal Oscillator) ตามลำดับ

การสั่นของผลึกควอทซ์คือส่วนประกอบที่สำคัญมากของการให้กำเนิดสัญญาณความถี่ โดยค่าความถี่ของผลึกควอทซ์ที่ได้นั้นจะขึ้นกับขนาดของผลึกควอทซ์ที่ใช้ โดยสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f_0 = \frac{2.7\times10^{3}}{L} \tag{2-28}$$

โดยที่

f_0	=	ความถี่เรโซแนนซ์ (เฮิรตซ์)
L	=	ขนาดของผลึกควอทซ์ (เมตร)

จากสมการที่ 2-28 จะได้ว่าถ้ายิ่งขนาดของผลึกควอทซ์มีค่าน้อยเท่าไหร่ความถี่ของการสั่นของผลึกควอทซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่านั้น

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบค่าต่างๆของแต่ละชนิดของผลึกควอทซ์

	Quartz Oscillators		
	TCXO	MCXO	OCXO
Accuracy (sec per year)	2×10^{-6}	5×10^{-8}	1×10^{-8}
Temp. Stab. (sec/range, °C)	5×10^{-7} (-55 to +85)	3×10^{-8} (-55 to +85)	1×10^{-9} (-55 to +85)
Stability, $\sigma_y(\tau)$ $(\tau = 1s)$	1×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-12}
Size (cm^3)	10	30	20-200
Power (W)	0.04	0.04	0.6

ต่อมาจะกล่าวถึงคุณสมบัติของแต่ละชนิดของผลึกควอทซ์อย่างคร่าวๆ ดังนี้ เริ่มจาก SPXO เป็นชนิดที่ถูกใช้อย่างกว้างขวาง ไม่สามารถวัดโดยละทิ้งผลของอุณหภูมิบนการเปลี่ยนแปลงของ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความถี่ได้ มีค่าคงตัว (stability) ของความถี่เท่ากับ $10^{-4} - 10^{-5}$ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดในตระกูลของผลึกควอทซ์แต่มีราคาถูกที่สุด, TCXO สามารถชดเชยอุณหภูมิที่เป็นตัวรบกวนความถี่ของผลึกควอทซ์ได้ มีค่าคงตัวของความถี่เท่ากับ $10^{-6} - 10^{-7}$ และ OCXO มีค่าคงตัวของความถี่สูงที่สุด แสดงตารางเปรียบเทียบค่าต่างๆของแต่ละชนิดของผลึกควอทซ์ [11] ดังตารางที่ 2-2

2.6 สรุปท้ายบท

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคซึ่ง ได้แก่ สัญลักษณ์ และสมบัติแรงดันกระแสในแต่ละย่านการทำงานของมอสเฟต รวมไปถึงผลของความยาวช่องนำกระแสที่เกิดขึ้น และได้อธิบายถึงหลักการของวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นและการแก้ไขผลของความยาวช่องนำกระแสที่เกิดกับวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นโดยการต่อวงจรแบบคาสโคด และกล่าวถึงเงื่อนไข Barkhausen ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปไซน์ วงจรออสซิลเลเตอร์รูปไซน์แบบวงแหวน 3 ภาค และในตอนท้ายได้กล่าวถึงงานวิจัยที่ได้มีผู้ศึกษามาก่อนหน้าซึ่งเกี่ยวกับความแม่นยำและการควบคุมความถี่ของผลึกควอตซ์

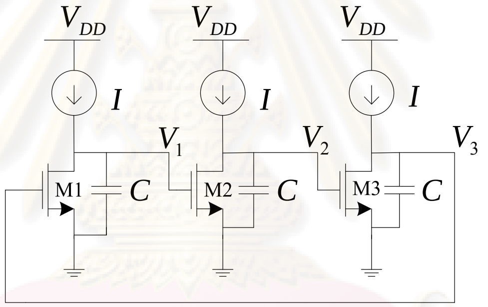
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

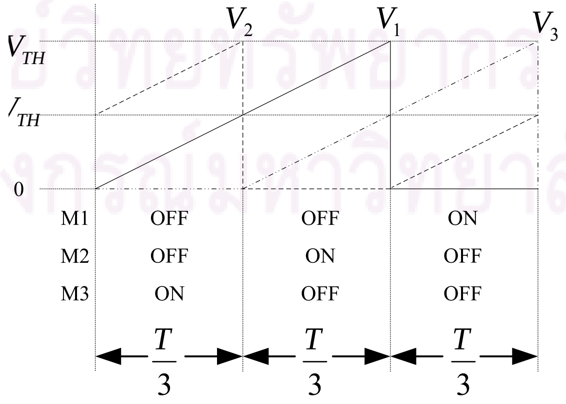
วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค

ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคโดยจะเริ่มตั้งแต่การวิเคราะห์วงจรพื้นฐานในอุดมคติรวมไปถึงวงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งได้แก่ วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน และวงจรวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน และในตอนท้ายจะวิเคราะห์วงจรกำเนิดกระแสที่นำมาใช้

3.1 วงจรพื้นฐานในอุดมคติ



รูปที่ 3-1 วงจรพื้นฐานของออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคในอุดมคติ



รูปที่ 3-2 สัญญาณแรงดันของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคในอุดมคติ

วงจรพื้นฐานของออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแสดงดังรูปที่ 3-1 จะได้ว่าหาก NMOS ทำงานในภาวะอิ่มตัว (Saturation) อัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) ที่ความถี่ต่ำของทั้ง 3 ภาครวมกันจะมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่า 1 มาก จึงไม่สามารถใช้เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ขนาดเล็กที่เรียกว่าเงื่อนไข Barkhausen มาวิเคราะห์หาความถี่ของการแกว่งได้ ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์สัญญาณขนาดใหญ่ดังที่จะกล่าวต่อไป

จากรูปที่ 3-1 ได้แสดงวงจรพื้นฐานของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคโดยใช้หลักการอัดประจุด้วยกระแสคงที่ และคายประจุด้วยสวิตซ์สลับกันไป ซึ่งจะประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณ 3 ภาค (Stage) ต่อพ่วงกันเป็นวงแหวน (Ring) แต่ละภาคใช้ NMOS ขับแหล่งกำเนิดกระแส และตัวเก็บประจุ ในสภาวะการออสซิลเลตแบบคงตัวจะวิเคราะห์ได้ว่า NMOS จะทำงานในสภาวะ ON พร้อมกันตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปไม่ได้ เราจึงสรุปได้ว่าในช่วงเวลาหนึ่งคาบ (T) NMOS แต่ละตัวจะผลัดกัน ON เป็นเวลา T/3 ดังแสดงในรูปที่ 3-2 และแรงดันขาเข้าของ NMOS แต่ละตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงแบบเชิงเส้นเริ่มจาก 0 โดยมีความชันเท่ากับ $\frac{I}{C}$ โดย NMOS แต่ละตัวจะเริ่ม ON เมื่อแรงดันขาเข้ามีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Voltage หรือ V_{TH}) และจะ OFF เมื่อแรงดันขาเข้ามีค่าเท่ากับสองเท่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน ในขณะที่ NMOS ตัวหนึ่ง ON นั้น ตัวที่เหลือจะ OFF ทำให้ได้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมแบบฟันเลื่อยที่มีคาบ T ตามสมการที่ (3-2)

$$\frac{I}{C} \times \frac{2T}{3} = 2V_{TH} \tag{3-1}$$

หรือ

$$T = \frac{3V_{TH}C}{I} \tag{3-2}$$

ดังนั้นความถี่ของออสซิลเลเตอร์จึงเท่ากับ

$$f = \frac{I}{3CV_{TH}} \tag{3-3}$$

เนื่องจากวงจรที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบมาเพื่อให้กำเนิดสัญญาณความถี่ให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริงดังนั้นความถี่ที่ได้จะต้องมีค่าเท่ากับ 32.768 กิโลเฮิรตซ์และออกแบบให้ตัว

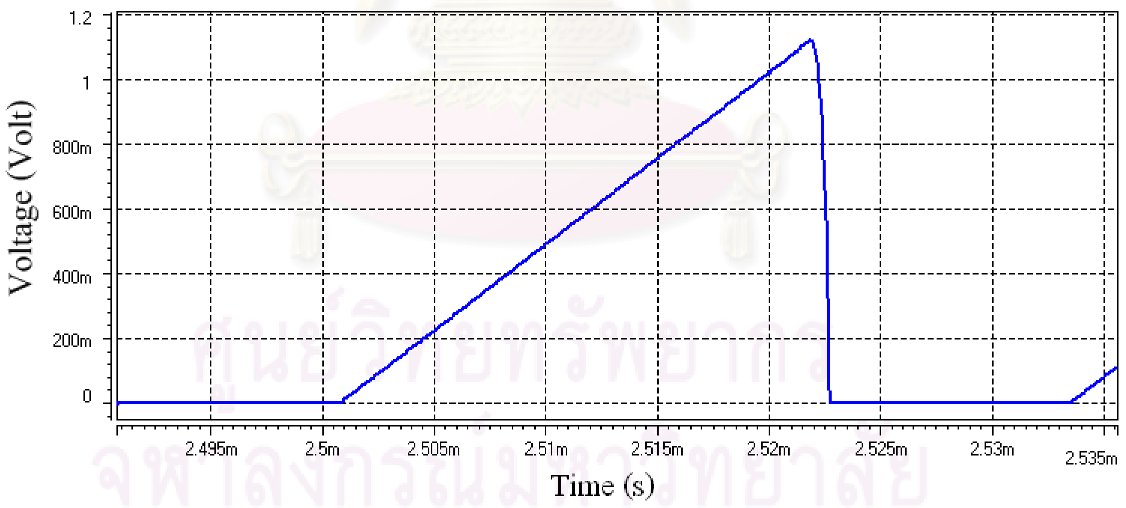
เก็บประจุ (C) มีค่าเท่ากับ 1 pF โดยจะใช้เทคโนโลยี 0.35 ไมครอน ดังนั้นแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (V_{TH}) ที่นำมาใช้จะมีค่าเท่ากับ 0.55065 โวลต์ และนำค่าที่ออกแบบนี้มาแทนลงในสมการที่ (3-3) เพื่อคำนวณหาค่ากระแสที่จ่ายให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ดังนี้

$$I = 3\times(32.768\ \text{kHz})\times(1\text{pF})\times(0.55065) = 54.13 \text{ นาโนแอมป์}$$

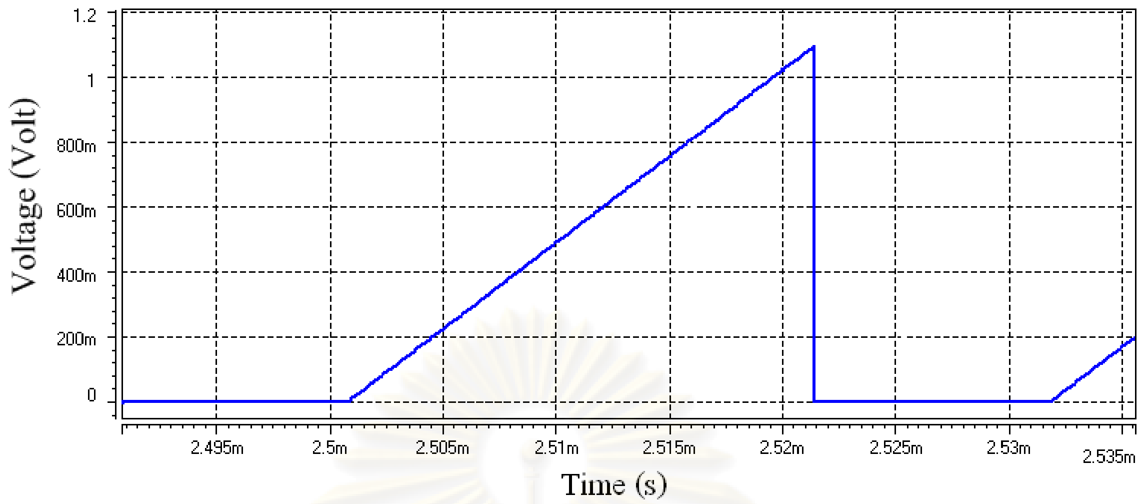
ดังนั้นค่ากระแสที่ใช้จ่ายให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์เพื่อให้กำเนิดสัญญาณความถี่ 32.768 กิโลเฮิรตซ์จะมีค่าเท่ากับ 54.13 นาโนแอมป์

3.2 ผลของความกว้างของทรานซิสเตอร์

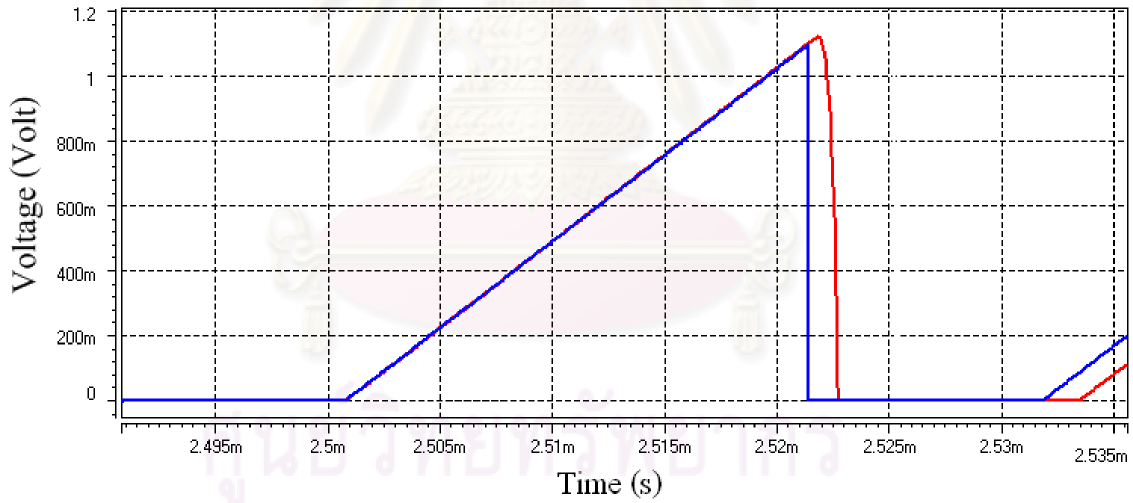
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันที่ได้จากวงจรพื้นฐานของออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคที่แสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งจะวิเคราะห์ในกรณีที่วงจรไม่เป็นอุดมคติ โดยผลที่ได้จะมีปัญหาเกิดขึ้นในกรณีที่ออกแบบให้ความกว้าง (W) ของ NMOS มีค่าน้อยคือ คาบของสัญญาณจากออสซิลเลเตอร์ที่เกิดขึ้นนั้น จะมากกว่าค่าตามสมการที่ (3-2) เล็กน้อย [12] เพราะตัวเก็บประจุ *C* ไม่สามารถคายประจุให้แรงดันตกจาก $2V_{TH}$ เป็น 0 ได้ทันทีดังแสดงในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 สัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ Wn = 3.5 μm โดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS



รูปที่ 3-4 สัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ Wn = 3500 μm โดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS



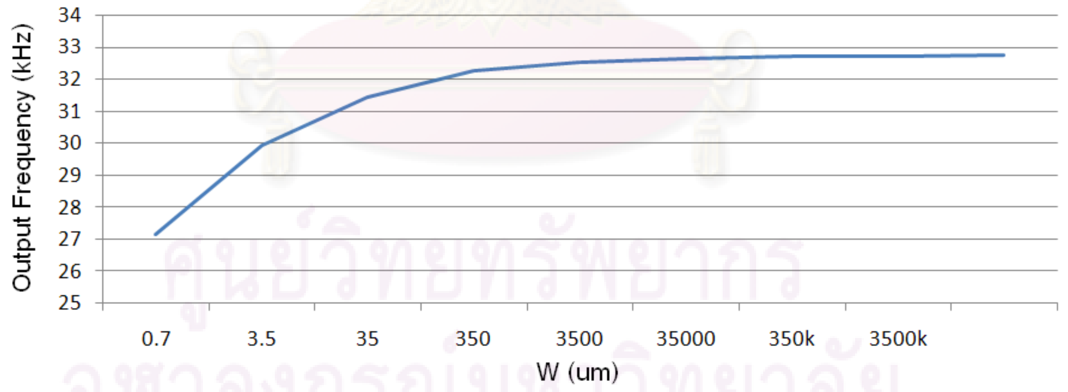
รูปที่ 3-5 สัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ Wn = 3.5 μm และ Wn = 3500 μm โดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

โดยกระแสที่คายประจุออกจากตัวเก็บประจุ C นั้น ได้มาจากกระแสของ NMOS ซึ่งแปรตาม W ของมัน ยิ่ง W มีค่าน้อยเท่าใดจะทำให้กระแสเดรนของ NMOS มีค่าน้อยลงตาม ทำให้ค่ากระแสเดรนดังกล่าวไม่มากพอที่จะทำให้สัญญาณแรงดันขาออกที่ได้ตกจาก $2V_{TH}$ เป็น 0 ทันที โดยจะเห็นว่า

ช่วงเวลาคายประจุจะยิ่งกว้างขึ้น และในกรณีที่ทรานซิสเตอร์มีขนาดใหญ่ (ค่า W มาก) ค่าความต้านทานภายในของทรานซิสเตอร์จะน้อยทำให้ตัวเก็บประจุสามารถคายประจุได้เร็วขึ้นดังรูปที่ 3-4

ดังนั้นสัญญาณแรงดันที่ได้เมื่อพิจารณาช่วงคายประจุของทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่จึงมีความชันมากกว่าสัญญาณแรงดันที่ได้ในช่วงคายประจุของทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก และเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ Wn = 3.5 μm และ Wn = 3500 μm โดยแสดงดังรูปที่ 3-5 ซึ่งทำให้เห็นความแตกต่างที่ได้อย่างชัดเจนของสัญญาณแรงดันที่ได้จากช่วงคายประจุของทรานซิสเตอร์ NMOS ที่ใช้ W ต่างกัน

เราจึงสรุปได้ว่าความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานที่ได้นี้ จึงมีค่าลดลงเมื่อ W มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 3-6 และตารางที่ 3-1 ซึ่งจะแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความถี่ที่ได้ในกรณีที่ W มีค่าต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าความถี่ที่ออกแบบ โดยจะเห็นว่าหากต้องการให้ได้ความถี่ใกล้เคียงสมการที่ (3-3) จะต้องให้ W มีขนาดอย่างน้อย 3500 μm หรือ W/L มีค่ามากกว่า 5000 ซึ่งในการออกแบบเพื่อที่จะนำมาใช้งานจริงไม่สามารถออกแบบขนาดของทรานซิสเตอร์ให้มีค่ามากขนาดนี้ได้ โดยผลการจำลองการทำงานที่ได้ในกรณีข้างต้นนี้จะละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

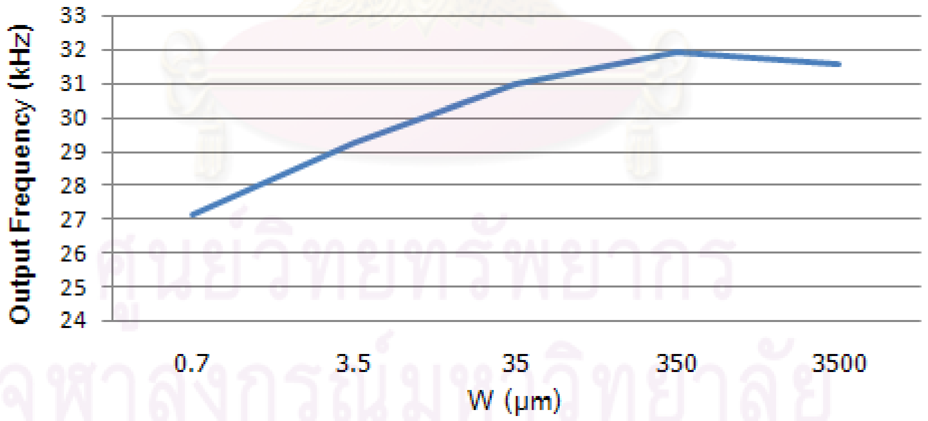


รูปที่ 3-6 ผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากวงจรรูปที่ 3-1 โดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

ตารางที่ 3-1 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่า W ต่างๆของ NMOS ของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานโดยละเลยผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

W(μm)	Output Frequency (kHz)	ความผิดพลาด(%)
0.7	27.1518	17.13928223
3.5	29.2827	10.6362915
35	31.1526	4.92980957
350	32.0513	2.187194824
3500	32.4473	0.97869873

สุดท้ายนี้ได้แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานวงจรเดิมแต่จะคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS ด้วยโดยจะแสดงค่าความถี่ที่ได้เมื่อเปลี่ยนค่า W ต่างๆของ NMOS ดังรูปที่ 3-7 และตารางที่ 3-2 จะเห็นว่าเมื่อ W ของ NMOS มีค่าเพิ่มมากขึ้นสัญญาณความถี่ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะเกิดจากตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นภายใน NMOS ซึ่งตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดภายในทรานซิสเตอร์จะแปลตามขนาดของทรานซิสเตอร์ของมัน จะได้ว่าเมื่อ W ของ NMOS เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นมากจนถึงค่าๆหนึ่งที่จะทำให้ตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นมีค่ามากจนมีผลต่อวงจร ดังนั้นความถี่ที่ได้จึงมีค่าลดลง ด้วยเหตุผลนี้เองจึงไม่นิยมออกแบบขนาดของทรานซิสเตอร์ให้มีขนาดใหญ่มาก



รูปที่ 3-7 ผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากวงจรรูปที่ 3-1 โดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

ตารางที่ 3-2 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่า W ต่างๆของ NMOS ของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานโดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

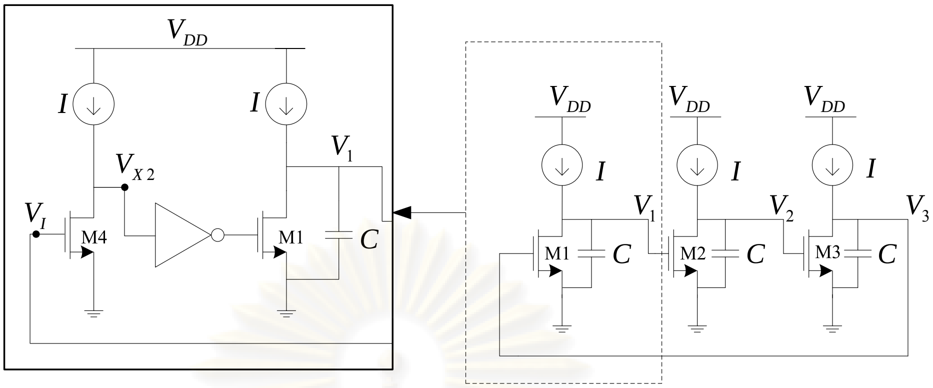
W(μm)	Output Frequency (kHz)	**ความผิดพลาด(%)**
0.7	27.1521	17.1383667
3.5	29.2827	10.6362915
35	31.009	5.368041992
350	31.9426	2.518920898
3500	31.6115	3.52935791

3.3 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน (CMOS Inverting Buffer 3-Stage Ring Oscillator)

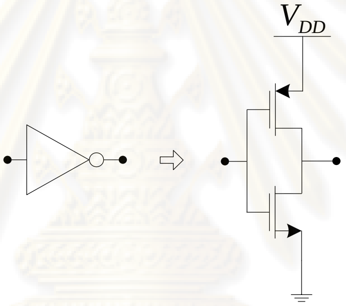
จากวงจรพื้นฐานของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค จะเห็นว่ามี NMOS เพียงแค่หนึ่งตัวเท่านั้นที่ทำหน้าที่อัดประจุ และคายประจุในแต่ละภาค จึงทำให้เกิดปัญหาเมื่อออกแบบขนาดของทรานซิสเตอร์ไม่ใหญ่พอที่จะทำให้สัญญาณแรงดันที่ได้สามารถคายประจุให้แรงดันตกจาก $2V_{TH}$ ลงมาที่ 0 ได้ทันที ดังนั้นจึงได้มีการดัดแปลงวงจรใหม่เรียกว่าวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน โดยจะออกแบบจำนวนของทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นเพื่อมาช่วยในการอัดประจุและคายประจุ ดังแสดงในรูปที่ 3-8 โดยจะดัดแปลงวงจรขยายแต่ละภาคโดยแทรกวงจรผกผันที่ประกอบด้วย วงจรผกผัน (Inverter) แบบเอาแหล่งกำเนิดกระแสเป็นโหลด กับ วงจรผกผันแบบพื้นฐานเข้าระหว่างสัญญาณแรงดันขาเข้ากับเกตของ NMOS ที่ขับกระแส (I) และตัวเก็บประจุ (C) ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ขาเกตของ NMOS ตัวหลัก (M1, M2 และ M3) มีความชันเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้กระแสเดรนของ NMOS มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ไม่จำเป็นต้องออกแบบให้ขนาดของทรานซิสเตอร์ NMOS ตัวหลักให้มีขนาดใหญ่ก็สามารถทำให้สัญญาณแรงดันที่ได้คายประจุให้แรงดันตกจาก $2V_{TH}$ ลงมาที่ 0 ได้ทันที ในรูปที่ 3-9 ได้แสดงส่วนประกอบภายในของวงจรผกผันแบบพื้นฐานที่นำมาใช้ในการดัดแปลง และในการออกแบบวงจรนี้ยังคำนึงถึงการประหยัดพลังงานอีกด้วยโดยจากการที่ต่อวงจรผกผันแบบพื้นฐานโดยจะกล่าวต่อไป

ในหัวข้อ 3.1 เราได้คำนวณหาค่าของกระแสที่จ่ายให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์เพื่อกำเนิดสัญญาณความถี่ 32.768 กิโลเฮิรตซ์มาแล้ว ดังนั้นต่อมาจะนำค่ากระแสที่จ่ายให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่คำนวณได้นั้นมาใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังงานไฟฟ้าของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคโดยใช้สูตรการคำนวณ ดังนี้

จาก $$P = I_{รวม} \times V_{DD} \tag{3-4}$$



รูปที่ 3-8 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน



รูปที่ 3-9 วงจรผกผันแบบพื้นฐาน

หาค่ากำลังงานไฟฟ้าทั้งหมดของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันจากรูปที่ 3-8 ดังนี้ จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวงจรจะประกอบด้วยวงจรผกผันแบบเอาแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเป็นโหลด กับ วงจรผกผันแบบพื้นฐาน แต่เนื่องจากวงจรผกผันแบบพื้นฐานมีการสับสวิตซ์ไปมาทำให้กระแสของวงจรผกผันแบบพื้นฐานมีค่าสูงเฉพาะตอนที่สับสวิตซ์เท่านั้น แต่ช่วงเวลาในการสับสวิตซ์นั้นสั้นมาก ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการสับสวิตซ์จึงมีผลน้อยมากต่อวงจร จึงได้ว่าวงจรผกผันแบบพื้นฐานจะกินกำลังไฟฟ้าน้อยมากจนแทบจะไม่มีผลต่อวงจรเลย ดังนั้นในการคำนวณนี้จึงไม่คิดค่ากระแสของวงจรผกผันแบบพื้นฐานเพราะถือว่ามีค่าน้อยมากแทบไม่มีผล ดังนั้นจะได้

$$I_{รวม} = I_{M3a} + I_{M4a} + I_{M10} + I_{M11} + I_{M12} + I_{M13} + I_{M14} + I_{M15} + I_{M16} + I_{M17} + I_{M18}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

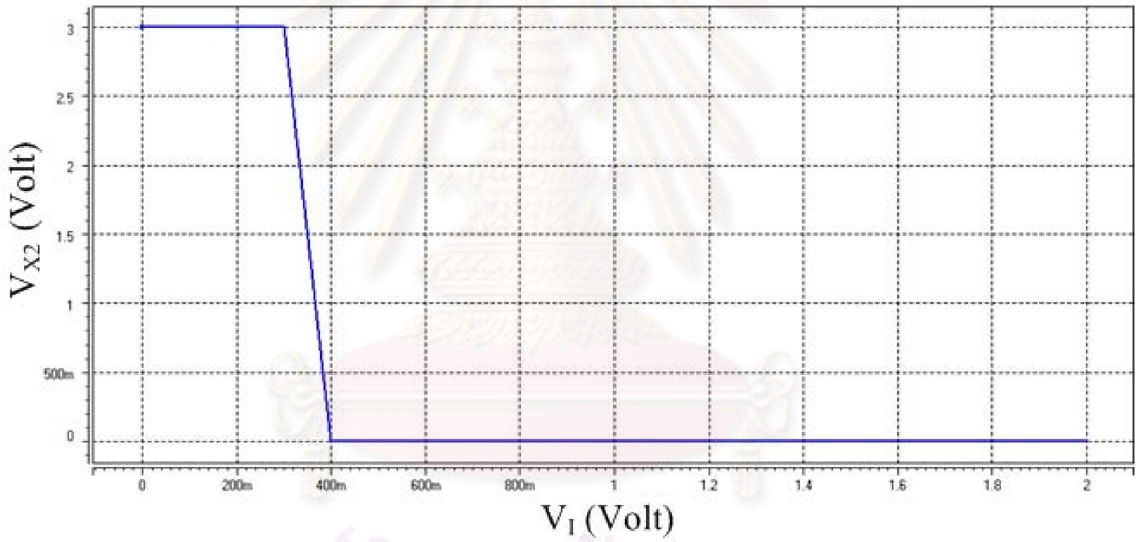
$$= [54.13 \times (20) + 54.13 + 54.13 + 0 + 54.13 + 54.13 + 0 + 54.13 + 54.13 + 0 + 54.13]nA$$

$$\therefore I_{\text{รม}} = 1.4615\mu A$$

นำมาแทนค่าลงในสมการที่ (3-4) จะได้

$$Power = 1.4615\mu A \times 3.3V = 4.82\mu W$$

จากรูปที่ 3-10 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรผกผันแบบเอาแหล่งกำเนิดกระแสเป็นโหลดจากโปรแกรม H-spice ไว้ด้วย โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า (V_I) กับแรงดันขาออก (V_{X2}) จะเห็นว่าเมื่อแรงดัน V_I มีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (V_{TH}) แรงดัน V_{X2} จะเริ่มตกทันทีเป็นผลทำให้สัญญาณแรงดันที่ได้มีความชันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า (V_I) กับแรงดันขาออก (V_{X2}) ของวงจรผกผันแบบเอาแหล่งกำเนิดกระแสเป็นโหลด

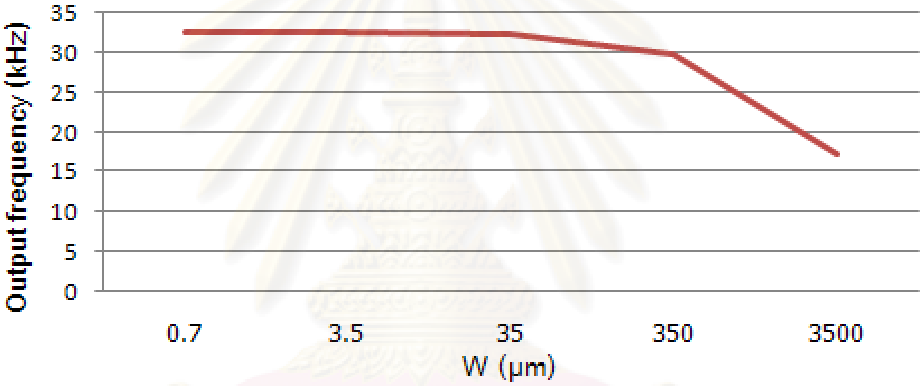
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 3-3 ได้แสดงว่าวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันนี้ สามารถแก้ไขปัญหาผลความกว้างของทรานซิสเตอร์ NMOS ได้จริงตามที่ได้กล่าวมา โดยจะได้ว่าที่ค่า W ของ NMOS เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตรจะมีความผิดพลาดของความถี่เพียงแค่ 0.68 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่างจากกรณีของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบพื้นฐานซึ่งจะมีความผิดพลาดของความถี่เท่ากับ 10.63 เปอร์เซ็นต์ที่ค่า W ของ NMOS เท่ากัน โดยในกรณีนี้ได้คิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นด้วย เพราะเนื่องจากต้องการวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบจริง ดังนั้นในกรณีที่ W ของ

NMOS มีค่ามากความถี่ที่ได้จึงมีค่าลดลงดังรูปที่ 3-11 ซึ่งจะเกิดจากผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นนั่นเอง

ตารางที่ 3-3 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่า W ต่างๆของ NMOS ของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันโดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

W(μm)	Output Frequency (kHz)	ความผิดพลาด(%)
0.7	32.5056	0.80078125
3.5	32.5439	0.683898926
35	32.2257	1.654968262
350	29.6654	9.468383789
3500	17.0862	47.85705566

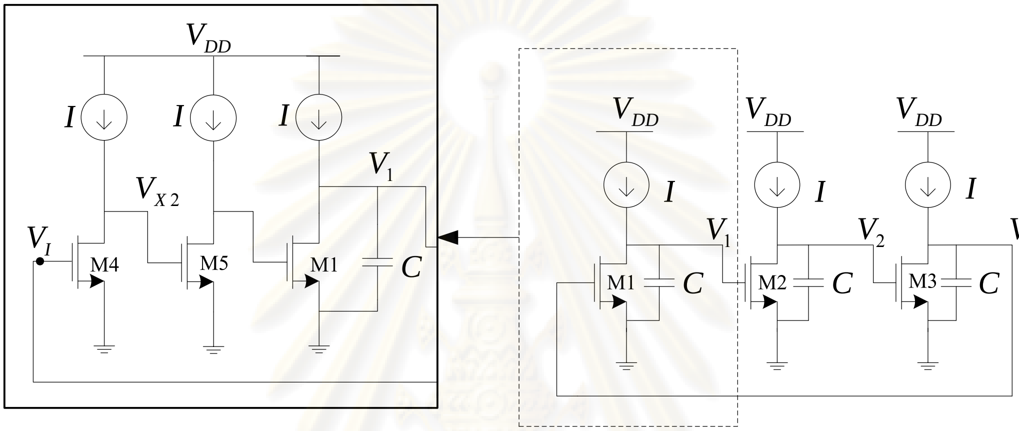


รูปที่ 3-11 ผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากวงจรรูปที่ 3-8 โดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

3.4 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน (CMOS Inverting Amplifier 3-Stage Ring Oscillator)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถชดเชยผลของความกว้างของทรานซิสเตอร์ได้อีกหนึ่งวงจร โดยได้ดัดแปลงโดยการเพิ่มจำนวนของทรานซิสเตอร์มากขึ้นอีก โดยดัดแปลงวงจรขยายแต่ละภาคโดยการแทรกวงจรผกผันแบบเอาแหล่งกำเนิดกระแสเป็นโหลด 2 วงจรเข้าระหว่างสัญญาณแรงดันขาเข้ากับขาเกตของ NMOS ที่ขับกระแส (I) และตัวเก็บประจุ (C) ดังแสดงในรูปที่ 3-12 โดยจะทำให้แรงดันที่ขาเกตของ NMOS ตัวหลัก (M1, M2 และ M3) มีความชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากได้เพิ่มทรานซิสเตอร์มากกว่าหนึ่งตัวมาทำหน้าที่ในการอัดประจุและคายประจุจึงส่งผลให้กระแสเดรนของ NMOS มีค่า

เพิ่มขึ้น ทำให้ไม่จำเป็นต้องออกแบบให้ขนาดของทรานซิสเตอร์ NMOS ตัวหลักให้มีขนาดใหญ่ก็สามารถทำให้สัญญาณแรงดันที่ได้คายประจุให้แรงดันตกจาก $2V_{TH}$ ลงมาที่ 0 ได้ทันที แต่การต่อในลักษณะการต่อของวงจรนี้จะกินกำลังงานไฟฟ้ามากกว่าวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน เนื่องจากในแต่ละภาคได้เพิ่มด้วยวงจรผกผันแบบเอาแหล่งกำเนิดกระแสเป็นโหลดทั้ง 2 วงจรซึ่งจะต้องคิดค่ากำลังงานไฟฟ้าของทั้ง 2 วงจรโดยจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 3-12 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน

นำค่ากระแสที่จ่ายให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่คำนวณได้ในหัวข้อ 3.1 เช่นกัน มาใช้ในการหาค่ากำลังไฟฟ้าของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันโดยในกรณีการออกแบบของวงจรนี้จะไม่มีการละทิ้งค่าของกระแส เนื่องจากเกิดจากการต่อเพิ่มของวงจรผกผันแบบเอาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเป็นโหลดเพียงอย่างเดียว ดังนั้นคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$I_{\text{รวม}} = I_{M3a} + I_{M4a} + I_{M10} + I_{M11} + I_{M12} + I_{M13} + I_{M14} + I_{M15} + I_{M16} + I_{M17} + I_{M18}$$

$$= [54.13 \times (20) + 54.13 + 54.13 + 54.13 + 54.13 + 54.13 + 54.13 + 54.13 + 54.13 + 54.13 + 54.13]nA$$

$$\therefore I_{\text{รวม}} = 1.624\mu A$$

และจากสมการที่ (3-9) เพราะฉะนั้น จะได้

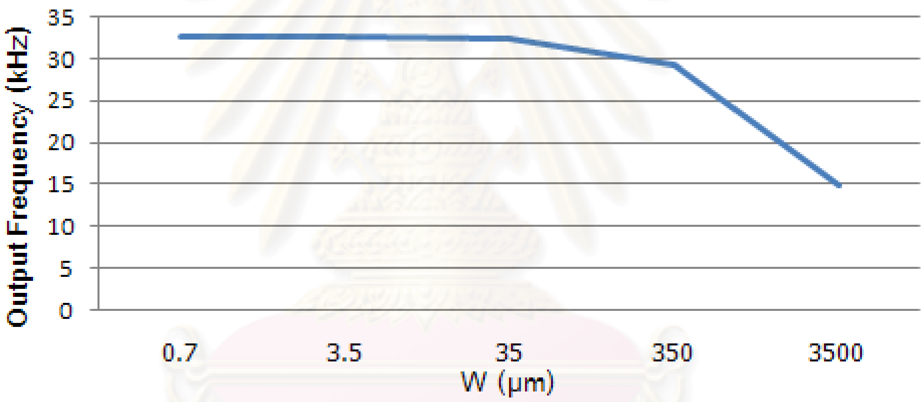
$$Power = 1.624\mu A \times 3.3V = 5.36\mu W$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากค่าของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้ในส่วนของภาคแอนะล็อกของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน กับแบบมีวงจรขยายผกผันจะเห็นว่าแบบมีวงจรขยายผกผัน จะกินกำลังไฟฟ้ามากกว่าแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน

ตารางที่ 3-4 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่า W ต่างๆของ NMOS ของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบมีวงจรขยายผกผันโดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

W(μm)	Output Frequency (kHz)	**ความผิดพลาด(%)**
0.7	32.523	0.747680664
3.5	32.5582	0.640258789
35	32.2379	1.617736816
350	29.2332	10.78735352
3500	14.942	54.40063477

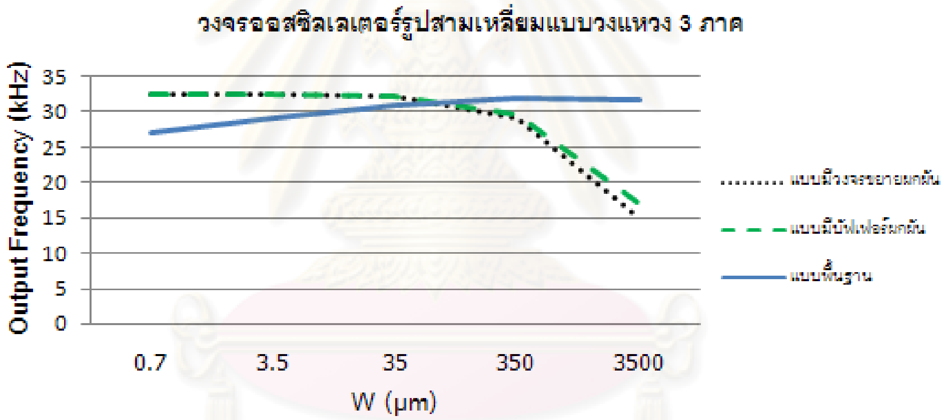


รูปที่ 3-13 ผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากวงจรรูปที่ 3-12 โดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

จากตารางที่ 3-4 ได้แสดงว่าวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันนี้ สามารถแก้ไขปัญหาผลความกว้างของทรานซิสเตอร์ NMOS ได้จริงตามที่ได้กล่าวมา โดยจะได้ว่าที่ค่า W ของ NMOS เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตรจะมีความผิดพลาดของความถี่เพียงแค่ 0.64 เปอร์เซ็นต์ จะได้ว่ามีค่าความผิดพลาดของความถี่น้อยกว่าของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน และต่างจากกรณีของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบพื้นฐานซึ่งจะมีความผิดพลาดของความถี่เท่ากับ 10.63 เปอร์เซ็นต์ที่ค่า W ของ NMOS เท่ากัน โดยในกรณีนี้ได้คิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นด้วย เพราะเนื่องจากต้องการวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้ใน

การออกแบบจริง ดังนั้นในกรณีที่ W ของ NMOS มีค่ามากความถี่ที่ได้จึงมีค่าลดลงดังรูปที่ 3-13 ซึ่งจะเกิดจากผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นนั่นเอง

เปรียบเทียบผลของความกว้างของทรานซิสเตอร์ที่เกิดขึ้นในวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคทั้ง 3 แบบดังรูปที่ 3-14 โดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อ W มีค่าน้อยค่าความถี่ที่ได้ของวงจรที่ดัดแปลงทั้งสองวงจรจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของความถี่ที่ต้องการมากกว่าความถี่ที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบพื้นฐานอย่างเห็นได้ชัด และในกรณีที่ W มีค่ามากขึ้นจะเห็นว่าความถี่ที่ได้ของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบพื้นฐานจะมีค่ามากกว่าความถี่ที่ได้จากวงจรที่ดัดแปลงทั้งสองวงจร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนของทรานซิสเตอร์ในวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานมีจำนวนน้อยกว่าวงจรที่ดัดแปลงทั้งสองวงจร ดังนั้นผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นจึงน้อยไปด้วย



รูปที่ 3-14 เปรียบเทียบผลของ W ของทรานซิสเตอร์ที่เกิดขึ้นในวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้ง 3 แบบโดยคิดผลของตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้นที่เกิดจาก NMOS

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าวงจรที่ดัดแปลงทั้งสองวงจรสามารถแก้ไขผลของความกว้างของทรานซิสเตอร์ที่เกิดกับวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานได้

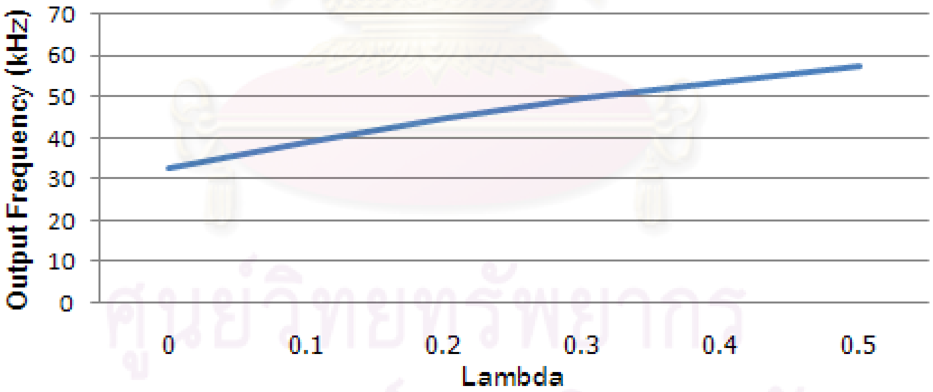
3.5 การลดผลของความยาวช่องนำกระแสโดยใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงผลของความยาวช่องนำกระแสที่มีผลต่อความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคทั้งสองแบบ ได้แก่ แบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน และแบบมีวงจรขยายผกผันเมื่อนำมาต่อกับวงจรกำเนิดกระแสเบื้องต้น และการแก้ไขผลของความยาวช่อง

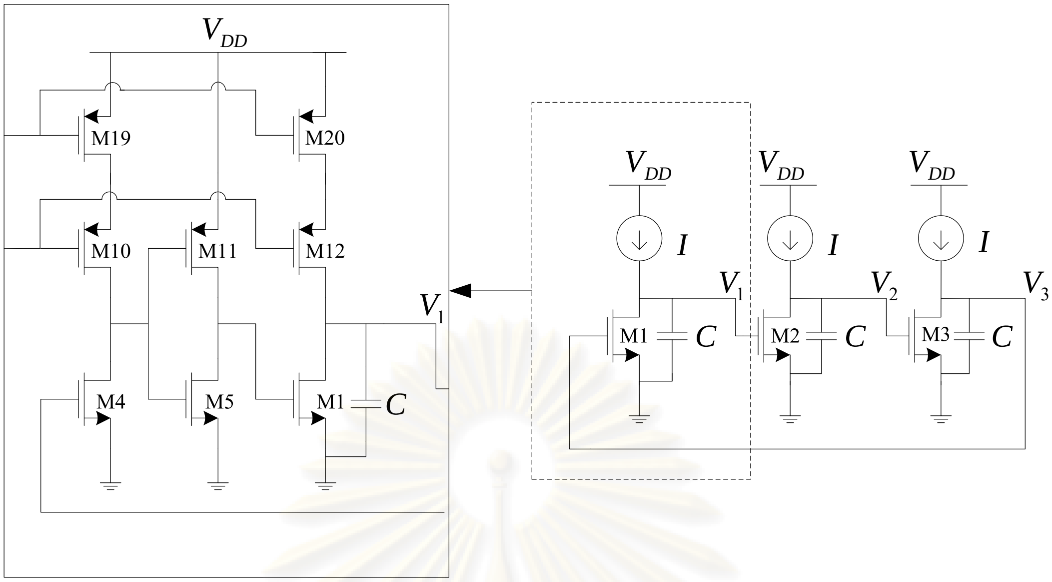
นำกระแสที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบคาสโคด ดังนั้นจึงต้องดัดแปลงวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้งสองแบบนี้ใหม่เพื่อให้สามารถต่อกับวงจรสะท้อนกระแสที่เป็นแบบคาสโคดได้โดยจะกล่าวต่อไป

3.5.1 วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน

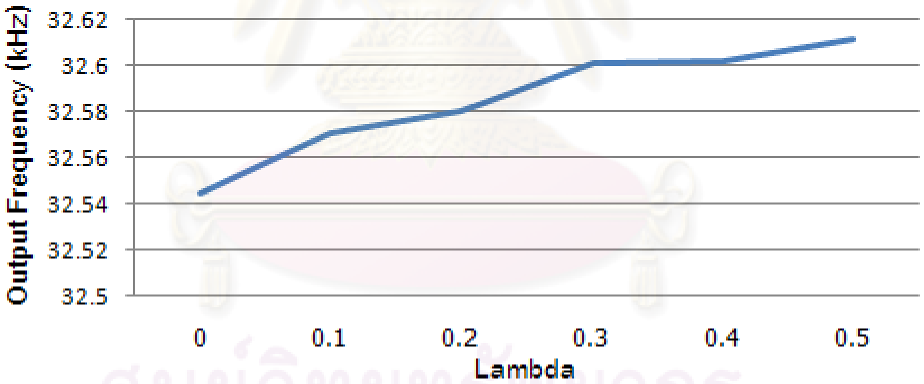
เนื่องจากกระแสที่จ่ายให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันดังรูปที่ 3-8 ต้องใช้วงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นเป็นตัวจ่ายกระแสให้ส่วนต่างๆของวงจรที่ออกแบบ เพราะกระแสที่ใช้จ่ายนั้นมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน แต่วงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นมีข้อด้อยตรงที่กระแสขาออกที่ได้จากวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นจะขึ้นอยู่กับค่าความยาวช่องนำกระแสมาก ทำให้กระบวนการเจือสารซึ่งมีผลต่อความยาวช่องนำกระแสจึงพลอยมีผลต่อกระแสขาออกที่เกิดจากวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นด้วย จึงส่งผลให้ความถี่ที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันมีค่าเปลี่ยนแปลงตามดังรูปที่ 3-15 ดังนั้นในวงจรที่ออกแบบนี้จึงต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบคาสโคดดังรูปที่ 3-16 เพื่อช่วยลดผลของความยาวช่องนำกระแสได้ดังรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องนำกระแสกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันที่ไม่ได้ต่อแบบคาสโคด

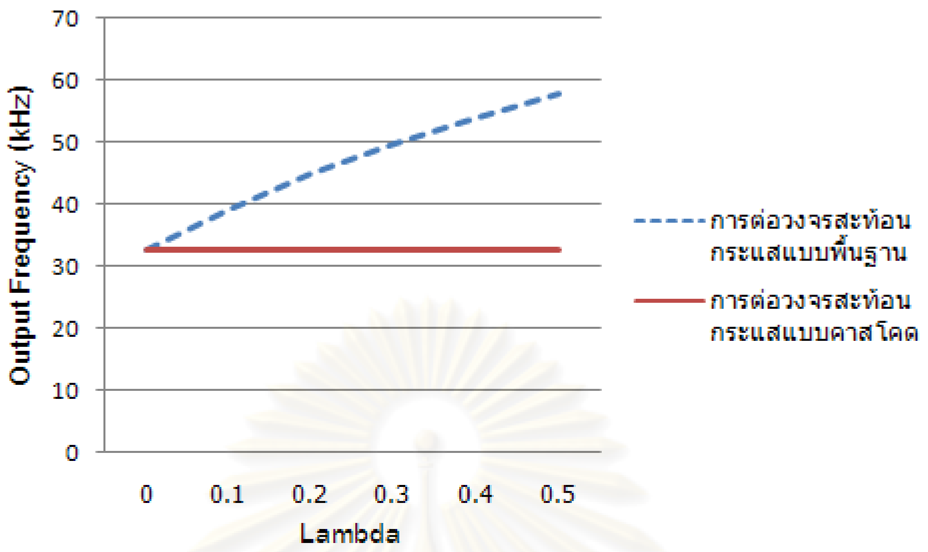


รูปที่ 3-16 การต่อคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันเพื่อเชื่อมกับการต่อคาสโคดของวงจรสะท้อนกระแส



รูปที่ 3-17 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องนำกระแสกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ต่อแบบคาสโคดดังรูปที่ 3-16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



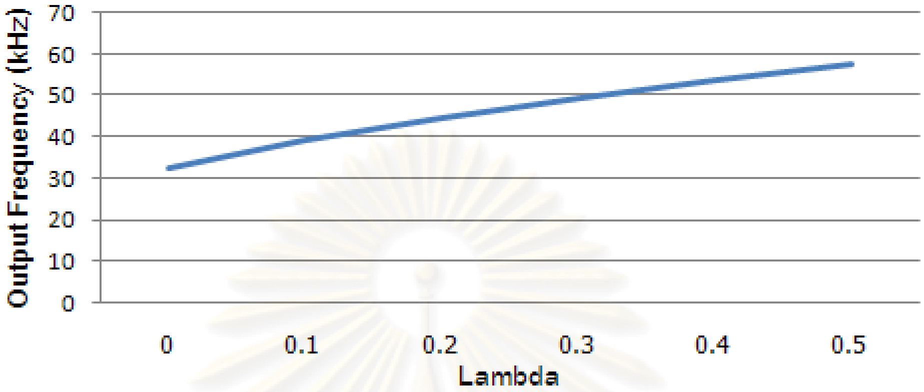
รูปที่ 3-18 เปรียบเทียบผลของความยาวช่องนำกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างการต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบพื้นฐานกับแบบคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน

เปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นของวงจรออสซิลเลเตอร์ในกรณีที่ต่อวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นกับกรณีที่ต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน ดังรูปที่ 3-18 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการต่อวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคดจะสามารถช่วยลดผลของความยาวช่องนำกระแสในวงจรได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการต่อวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้น ในกรณีนี้ได้เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานใน Level 1 เพราะสามารถกำหนดค่าของความยาวช่องนำกระแสได้

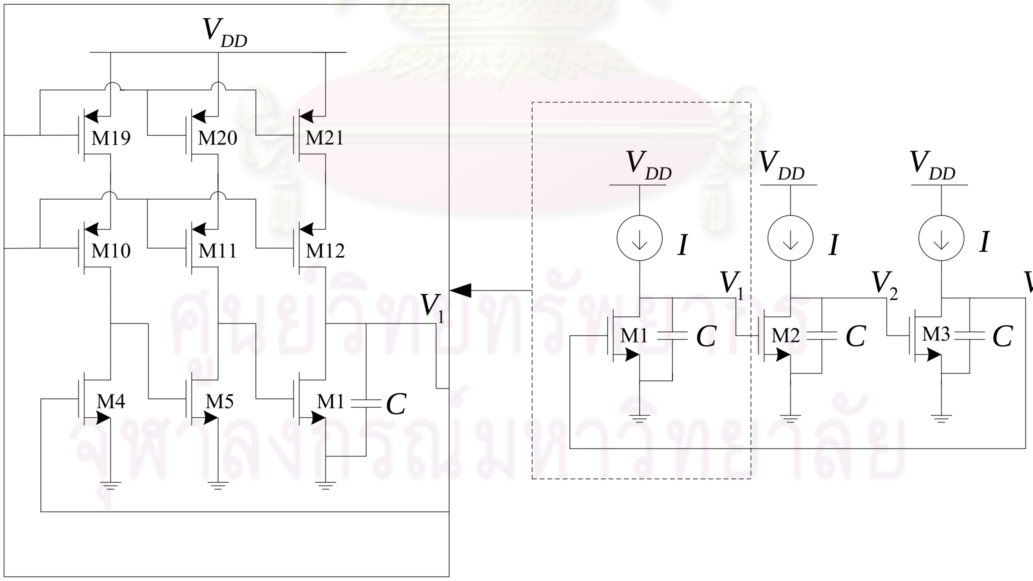
3.5.2 <u>วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน</u>

จากเหตุผลเดียวกันจากในหัวข้อ 3.5.1 นั่นคือกระแสที่จ่ายให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันในรูปที่ 3-12 นั้นต้องใช้วงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นเป็นตัวจ่ายกระแสให้ส่วนต่างๆของวงจรที่ออกแบบ เพราะกระแสที่ใช้จ่ายนั้นมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน แต่วงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นมีข้อด้อยตรงที่กระแสขาออกที่ได้จากวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นจะขึ้นอยู่กับค่าความยาวช่องนำกระแส ทำให้กระบวนการเจือสารซึ่งมีผลต่อความยาวช่องนำกระแสจึงพลอยมีผลต่อกระแสขาออกที่เกิดจากวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นด้วย จึงส่งผลให้ความถี่ที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยาย

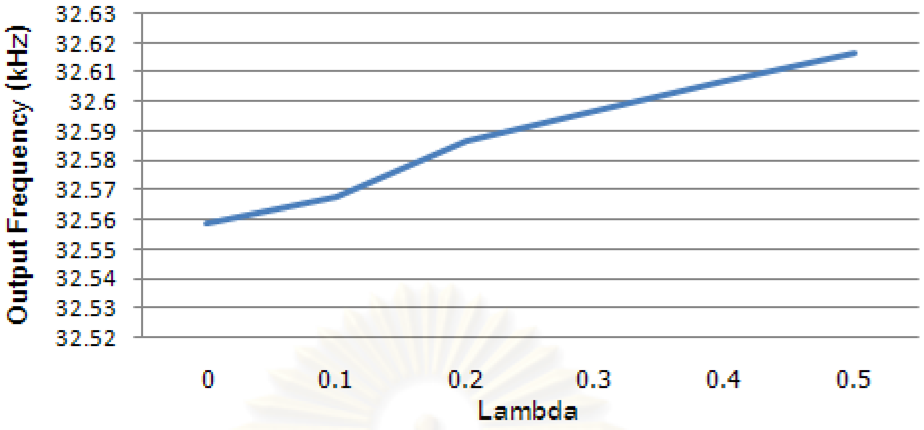
ผกผันมีค่าเปลี่ยนแปลงตามดังรูปที่ 3-19 ดังนั้นในวงจรที่ออกแบบนี้จึงต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบคาสโคดดังรูปที่ 3-20 เพื่อช่วยลดผลของความยาวช่องนำกระแสได้ดังรูปที่ 3-21



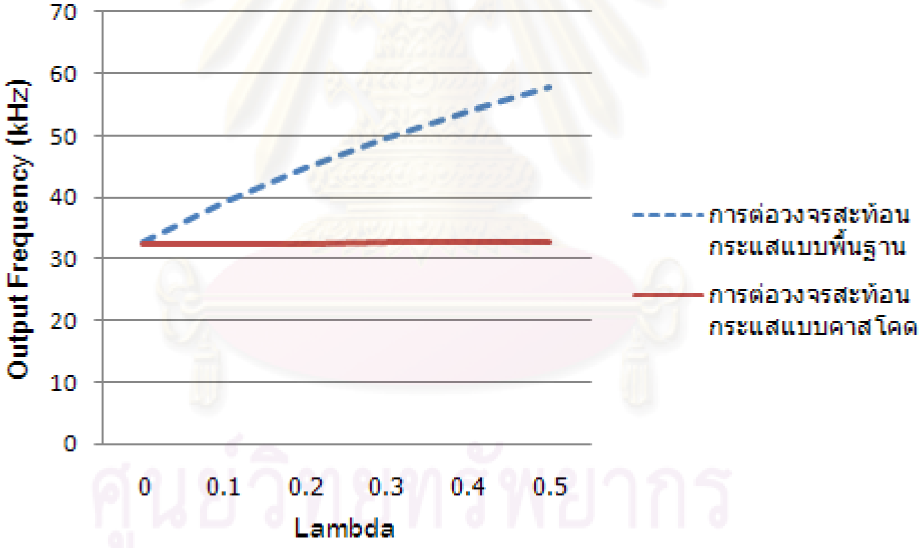
รูปที่ 3-19 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องนำกระแสกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่ไม่ได้ต่อแบบคาสโคด



รูปที่ 3-20 การต่อคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันเพื่อเชื่อมกับการต่อคาสโคดของวงจรสะท้อนกระแส



รูปที่ 3-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องนำกระแสกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ต่อแบบคาสโคดดังรูปที่ 3-20



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

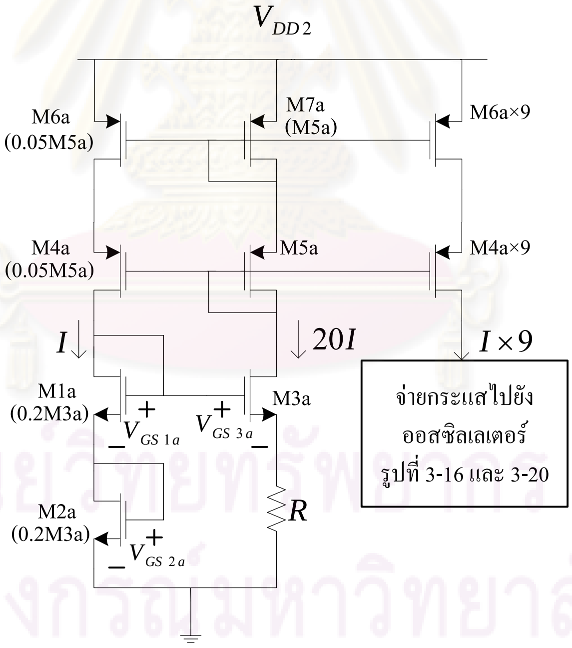
รูปที่ 3-22 เปรียบเทียบผลของความยาวช่องนำกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างการต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบพื้นฐานกับแบบคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบมีวงจรขยายผกผัน

เปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นของวงจรออสซิลเลเตอร์ในกรณีที่ต่อวงจรสะท้อนกระแสเบื้องต้นกับกรณีที่ต่อวงจรสะท้อนกระแสเป็นแบบคาสโคดของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน ดังรูปที่ 3-22 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการต่อวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคดจะสามารถช่วยลดผลของความยาวช่องนำกระแสในวงจรได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการต่อวงจร

สะท้อนกระแสเบื้องต้น ในกรณีนี้ได้เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานใน Level 1 เพราะสามารถกำหนดค่าของความยาวช่องนำกระแสได้

3.6 **วงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน** (Threshold Voltage Compensated Current Generator)

วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคที่ออกแบบดังรูปที่ 3-8 และรูปที่ 3-12 เมื่อชดเชยผลของความยาวช่องนำกระแสแล้ว ยังมีข้อด้อยอีกประการหนึ่งคือ คาบ (T) หรือความถี่ (f) ของสัญญาณขึ้นอยู่กับ V_{TH} ดังสมการที่ (3-2) และ (3-3) ทำให้กระบวนการเจือสาร (Fabrication Process) และอุณหภูมิ [7] ซึ่งมีผลต่อ V_{TH} พลอยมีผลต่อความถี่ของวงจรด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเสนอวงจรกำเนิดกระแส (I) ที่แปรตาม V_{TH} [13] เพื่อลดผลของ V_{TH} ที่มีผลต่อความถี่ โดยจะใช้วงจรนี้เป็นวงจรกำเนิดกระแสดังแสดงในรูปที่ 3-23 โดยจากอัตราส่วนของขนาดที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 3-23 จะได้



รูปที่ 3-23 วงจรกำเนิดกระแสที่แปรตาม V_{TH} จ่ายกระแสไปยังวงจรรูปที่ 3-16 และรูปที่ 3-20 โดยได้ชดเชยผลของความยาวช่องนำกระแส

$$V_{GS2a} + V_{GS1a} = V_{GS3a} + 20IR \tag{3-5}$$

หรือ

$$\left(V_{GS2a} - V_{TH}\right) + \left(V_{GS1a} - V_{TH}\right) = \left(V_{GS3a} - V_{TH}\right) + \left(20IR - V_{TH}\right) \tag{3-6}$$

แทนค่า

$$V_{GS} - V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu C_{OX} W/L}} \tag{3-7}$$

และ

$$I_{D2} = I_{D1} = \frac{I_{D3}}{20} \tag{3-8}$$

ลงในสมการที่ (3-6) จะได้ว่า

$$20IR = V_{TH} = 0 \tag{3-9}$$

หรือ

$$I = \frac{V_{TH}}{20R} \tag{3-10}$$

แทนค่า I ลงในสมการที่ (3-2) จะได้

$$T = \frac{1}{f} = 60RC \tag{3-11}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-11) จะได้ว่า T และ f จะไม่ขึ้นกับ V_{TH}

เมื่อนำวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนมาใช้เป็นวงจรกำเนิดกระแสให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ดัดแปลง โดยนำค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบและความถี่ที่ต้องการแทนลงไปในสมการที่ (3-11) จะได้ความต้านทาน (R) ที่ใช้ในวงจรกำเนิดกระแส ดังนี้

$$R = \frac{1}{60 \times (32.768kHz) \times (1pF)} = 508.626k\Omega$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นำค่าความต้านทานที่คำนวณได้ในข้างต้นมาใช้ในการออกแบบ โดยในการจำลองผลการทำงานนั้นเราจะเลือกออกแบบโดยการใช้วิธีปรับค่าความต้านทาน โดยจะเริ่มปรับจากค่าความต้านทานที่คำนวณได้ เพื่อหาค่าความต้านทานที่ทำให้ความถี่ที่ได้ใกล้เคียงกับค่าความถี่ที่ต้องการมากที่สุด เพื่อที่จะนำค่าความต้านทานที่ได้มาใช้ในการผลิตจริง

3.7 สรุปท้ายบท

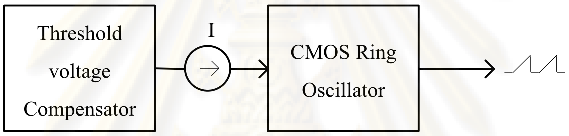
ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคพื้นฐานโดยจะวิเคราะห์หาสมการความถี่ออกมาซึ่งจะพิจารณาในกรณีที่วงจรอยู่ในอุดมคติ และได้แสดงสัญญาณแรงดันที่ได้จากผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานในกรณีที่วงจรไม่เป็นอุดมคติ โดยสัญญาณแรงดันที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเกิดผลความกว้างของทรานซิสเตอร์ จึงได้แก้ไขโดยดัดแปลงวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน กับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่สามารถชดเชยผลของความกว้างของทรานซิสเตอร์ได้ และได้ดัดแปลงโดยต่อวงจรแบบคาสโคดเพื่อชดเชยผลของความยาวช่องนำกระแสอีกด้วย และสุดท้ายได้ชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนโดยนำวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนมาเป็นวงจรกำเนิดกระแสให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ โดยจะกล่าวถึงผลการจำลองการทำงานในบทต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการจำลองการทำงานของวงจร

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาซึ่งจะประกอบด้วย 2 วงจรดังแสดงในรูปที่ 4-1 โดยวงจรแรกได้แก่ วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคเป็นวงจรหลักที่ออกแบบ แต่เนื่องจากความถี่หรือคาบที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้นั้นมีค่าขึ้นกับค่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน โดยที่ค่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจะเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการเจือสาร และ อุณหภูมิ ดังนั้นจึงได้ลดผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนโดยนำวงจรที่สองคือวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนมาต่อกับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ



รูปที่ 4-1 แผนภาพโดยรวมของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่

วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคซึ่งเป็นวงจรหลักในการให้กำเนิดสัญญาณความถี่นี้จะมีอยู่สองแบบด้วยกันโดยได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยวงจรออสซิลเลเตอร์นี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อกินพลังงานต่ำ และเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนได้ ซึ่งทำให้มีข้อจำกัดเกิดขึ้น คือ วงจรจะทำงานได้ในภาวะที่มีแรงดันไฟเลี้ยงไม่ต่ำกว่า 2.5 โวลต์ ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 5 แรงดันไฟเลี้ยงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขณะทำงาน และต้องการออกแบบให้กินกำลังงานไม่เกิน 10 ไมโครวัตต์ ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองการทำงานของวงจรที่ได้ออกแบบไว้ โดยวงจรออกแบบใช้เทคโนโลยี 0.35 ไมโครเมตร จะจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม H-spice

4.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน

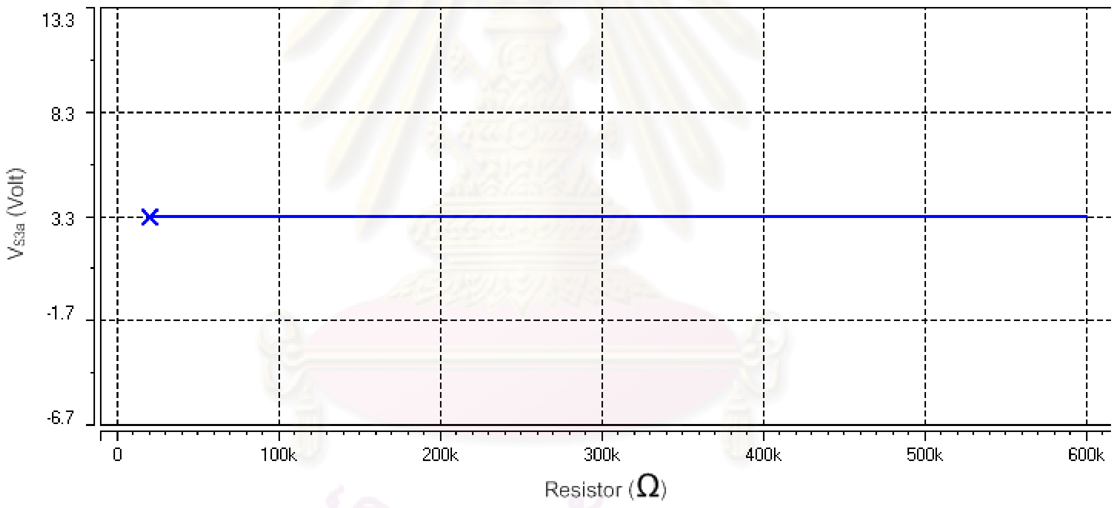
เนื่องจากได้ออกแบบให้วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาครับกระแสจากวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน ดังนั้นจึงได้ทดสอบวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนโดยศึกษาผลของความต้านทาน โดยจะใช้ค่าในตารางที่ 4-1 ใช้แรงดันไฟเลี้ยงเท่ากับ 3.3 โวลต์ อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสทดสอบใน Level 53 โดยเปลี่ยนค่าความต้านทานจาก 2 kΩ ถึง 600kΩ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะได้ผลการจำลองการทำงานดังรูปที่ 4-2 ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับแรงดันที่ซอสของ M3a ของวงจรในรูปที่ 3-23 โดยจะได้ว่าค่าความต้านทานไม่มีผลต่อการทำงานของวงจร ดังนั้นในการจำลองการทำงานที่จะกล่าวถึงต่อไปเราจะสามารถกำหนดค่าของความต้านทานนี้ได้ตามต้องการ

ตารางที่ 4-1 ขนาดทรานซิสเตอร์ของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน

Size(μm)	NMOS			PMOS			
	M1a	M2a	M3a	M4a	M5a	M6a	M7a
W	0.7	0.7	3.5	0.7	14	0.7	14
L	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7



รูปที่ 4-2 ผลของความต้านทานต่อแรงดันที่ซอสของ M3a

4.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบคาสโคดเมื่อใช้กระแสจากวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน

วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคได้ออกแบบทั้งหมด 2 แบบด้วยกัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งจะเขียนวงจรตามรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-8 โดยออกแบบให้มีความถี่ 32.768 กิโลเฮิรตซ์ เพื่อใช้ทดแทนวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริงที่ใช้ผลึกควอตซ์ โดยจะจำลองค่าของความถี่ให้ได้ตามที่ออกแบบโดยการปรับค่าความต้านทานซึ่งได้กล่าวไว้

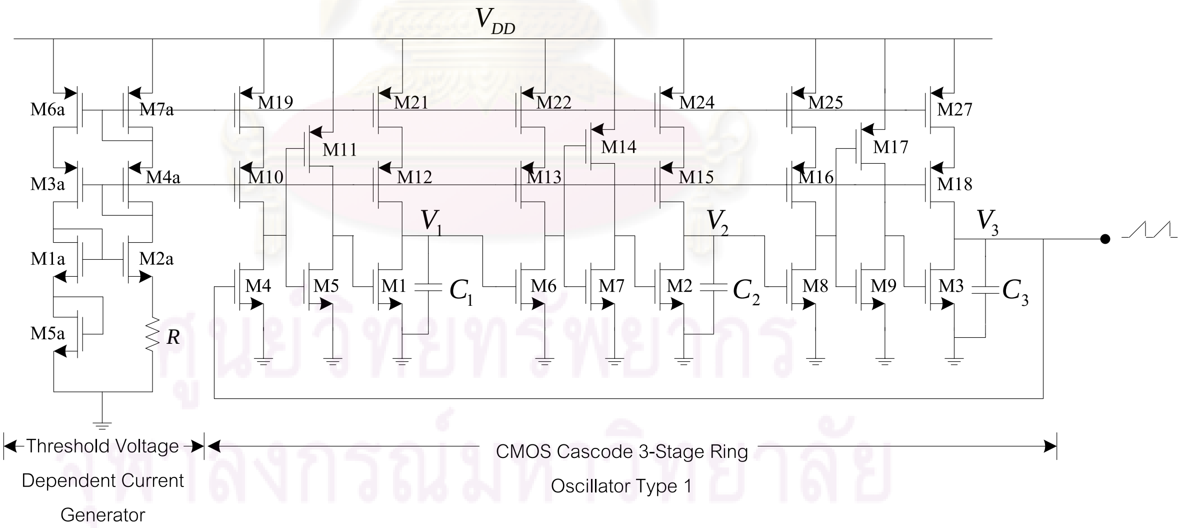
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แล้วในหัวข้อที่ 3.6 และศึกษาผลกระทบต่างๆที่จะเปลี่ยนแปลงได้เมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตหรือสภาพแวดล้อมภายนอกเปลี่ยนแปลง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และค่าแรงดันไฟเลี้ยง ในการจำลองการทำงานนี้จะใช้ค่าในตารางที่ 4-2 แรงดันไฟเลี้ยงเท่ากับ 3.3 โวลต์ ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 1 พิโคฟารัด อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสโดยจะทดสอบใน Level 53 และหาค่าความผิดพลาดไปจากสมการที่ (3-11) ของความถี่ใน Level 1 เพื่อแสดงว่าผลที่ได้จากการจำลองการทำงานเป็นจริงตามสมการที่ (3-11)

ตารางที่ 4-2 ขนาดทรานซิสเตอร์ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาค

Size(μm)	NMOS	PMOS
W	3.5	0.7
L	0.7	0.7

4.2.1 <u>ผลการจำลองของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน</u>



รูปที่ 4-3 โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันที่ใช้ในการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4-3 โดยได้แบ่งการจำลองการทำงานของวงจรออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ได้ทดสอบโดยออกแบบค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (3-11) และดูค่าความผิดพลาดของความถี่ที่ได้จากผลการจำลองการทำงานใน Level 1 เปรียบเทียบกับความถี่ที่ได้จากการคำนวณของสมการที่ (3-11) ส่วนที่ 2 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรใน Level 53 ซึ่งได้แก่สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆและสัญญาณขาออกของวงจรรวมทั้งค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดของวงจร

<u>ส่วนที่ 1: Level 1</u>

หาค่าความผิดพลาดของความถี่ที่ได้มาจากผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันเทียบกับสมการที่ (3-11) ดังนี้

เมื่อวัดค่าความถี่ของผลการจำลองการทำงานจากสัญญาณแรงดันขาออกจะได้เท่ากับ 32543.9 เฮิรตซ์

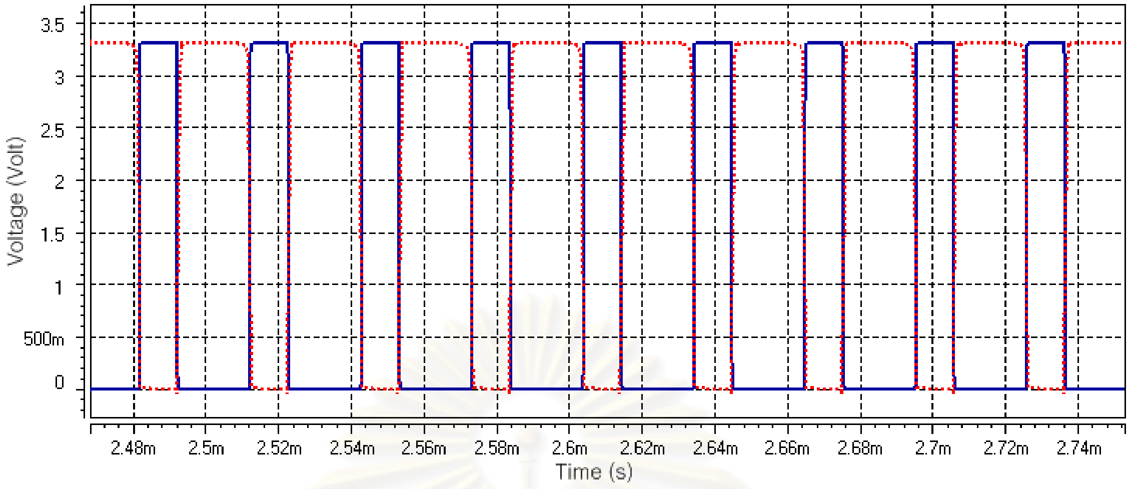
$$\therefore \text{ความผิดพลาด} = \left(\frac{32768 - 32543.9}{32768}\right) \times 100\% = 0.68\ \%$$

ความผิดพลาดนี้เกิดได้จากการวัดค่าจากผลการจำลองการทำงานซึ่งเราต้องกำหนดเองด้วยสายตา ดังนั้นจึงไม่มีความแม่นยำเพียงพอ ทำให้ค่าความถี่ที่ได้ออกมาผิดไปจากสูตรได้

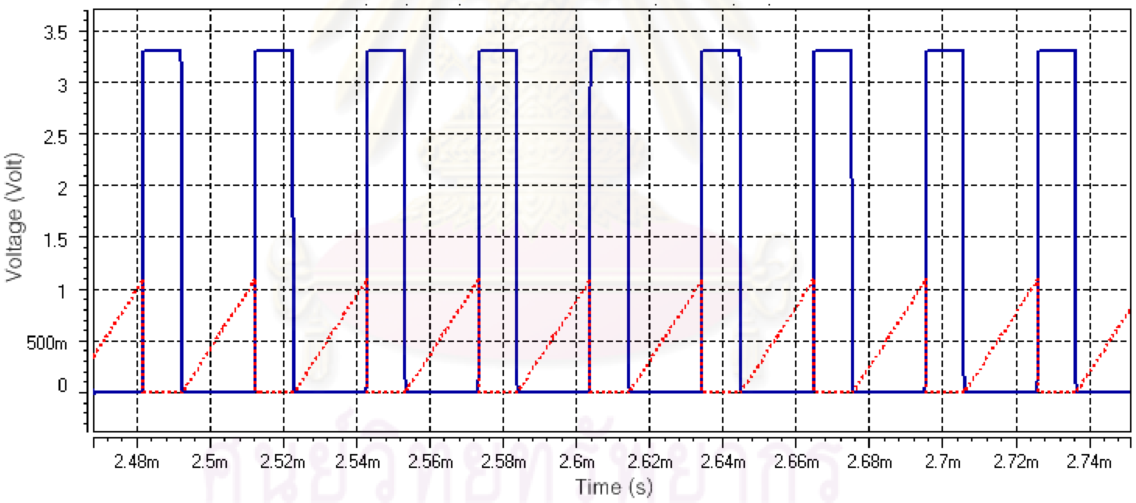
<u>ส่วนที่ 2: Level 53</u>

ผลการจำลองการทำงานของวงจรดังรูปที่ 4-3 แสดงสัญญาณแรงดันที่จุดต่างๆ รวมทั้งคาบของสัญญาณขาออก ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

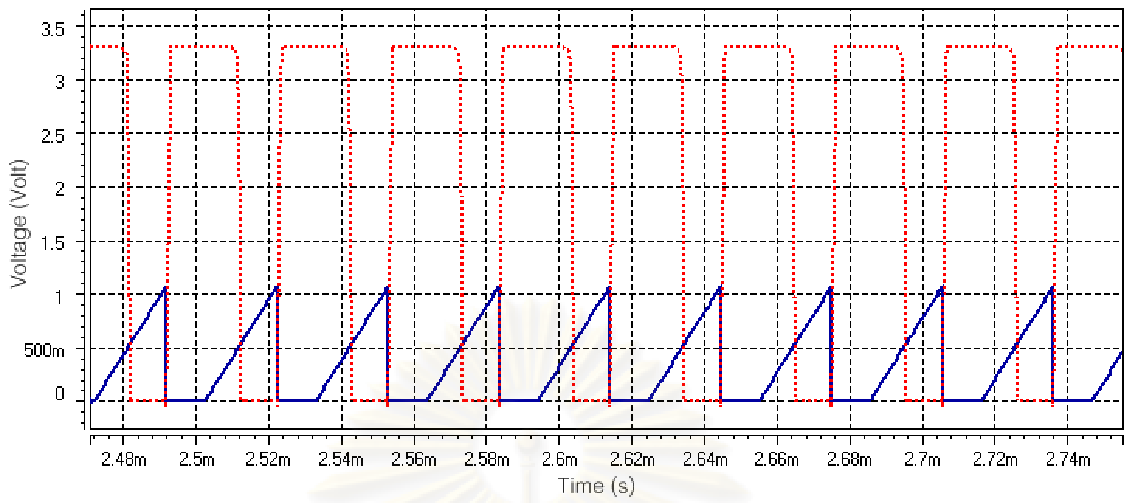


รูปที่ 4-4 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นประ) กับสัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 (เส้นทึบ)



รูปที่ 4-5 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 (เส้นทึบ) กับสัญญาณแรงดันขาออก V_1 (เส้นประ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-6 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นประ) กับสัญญาณแรงดันขาออก V_3 *(เส้นทึบ)*

เมื่อเราออกแบบวงจรตามรูปที่ 4-3 ทำให้แรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{DD} และแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 จะได้สัญญาณที่กลับกันดังรูปที่ 4-4 จึงส่งผลให้กระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ M1 เพิ่มขึ้น และจากผลการจำลองในรูปที่ 4-5 จะได้ว่า เมื่อแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{DD} จะทำให้กระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ M1 มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้แรงดันขาออก V_1 คายประจุจาก $2V_{th}$ ลงมาที่ 0 ทันที และสุดท้ายจากรูปที่ 4-6 ได้แสดงให้เห็นสัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของ M4 จะมีค่าลดลงเท่ากับ 0 เมื่อสัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่อยู่ในช่วงอัดประจุมีค่าเท่ากับ V_{th} ซึ่งทำให้ M4 เริ่มเปิด(ON) และเมื่อสัญญาณแรงดันขาออก V_3 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ $2V_{th}$ สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของ M4 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{DD} เพราะ M4 จะเริ่มปิด (OFF) เนื่องจากเป็นช่วงที่ตัวเก็บประจุที่แรงดันขาออก V_3 ได้คายประจุจนหมด ซึ่งการต่อวงจรดังรูปที่ 4-3 จะช่วยเพิ่มอัตราขยายวงรอบของแต่ละภาคจึงส่งผลให้กระแสเดรนของแต่ละภาคเพิ่มขึ้น ดังนั้นสัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จึงลดลงจาก $2V_{th}$ เป็น 0 ทันทีและรอจนกระทั่งสัญญาณแรงดันขาออก V_3 ในช่วงอัดประจุมีค่าเท่ากับ V_{th} ใหม่ถึงจะเริ่มเปิดใหม่อีกครั้งหนึ่งซึ่งจะเห็นว่าสามารถแก้ปัญหาผลของความกว้างของทรานซิสเตอร์ได้

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.6 เราจะปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ได้ค่าความถี่ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด เพราะเนื่องจากการจำลองผลการทำงานใน Level 53 จะมีสมการที่ซับซ้อน

มากเกินกว่าที่จะคำนวณมือได้ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่เป็นไปตามสมการที่ (3-11) เหมือนกับการจำลองผลการทำงานใน Level 1 เราจึงต้องใช้วิธีปรับค่าความต้านทานแทนเพื่อให้ได้ความถี่ออกมาใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด

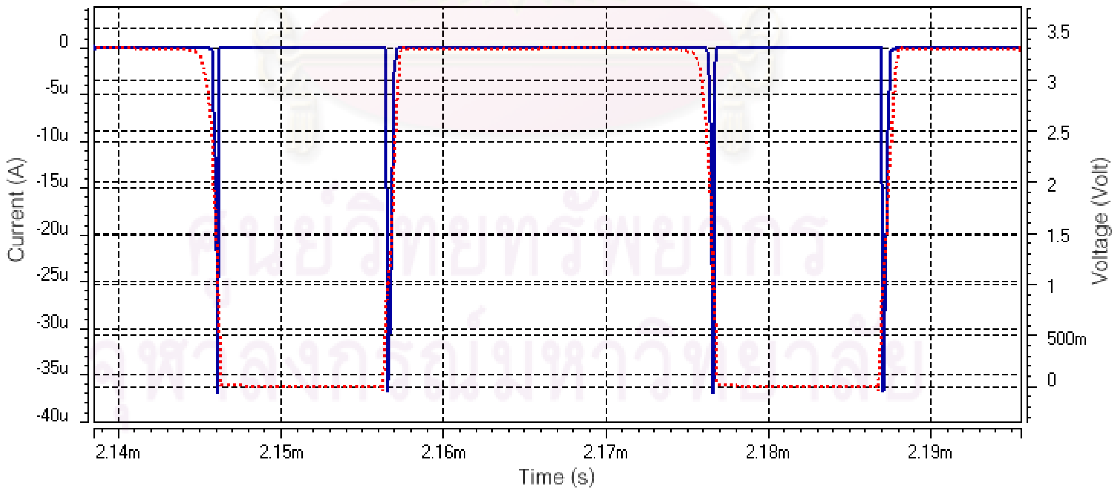
ทำการวัดค่าของคาบจากผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแรงดันขาออก V_3 เมื่อปรับค่าความต้านทานแล้ว โดยใช้ความต้านทานเท่ากับ 452.675 กิโลโอห์ม จะได้คาบเท่ากับ 30.5162 ไมโครวินาที และจะคำนวณเป็นค่าความถี่ได้เท่ากับ 32769.48 เฮิรตซ์ ดังนั้นจะหาค่าความผิดพลาดของความถี่ที่ได้มาจากผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน เทียบกับค่าความถี่ที่ต้องการ ได้ดังนี้

เมื่อวัดค่าความถี่ของผลการจำลองการทำงานได้เท่ากับ 32769.48 เฮิรตซ์

$$\therefore \text{ความผิดพลาด} = \left(\frac{32768 - 32769.48}{32768}\right) \times 100\% = 0.004\ \%$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการจำลองการทำงาน จะได้

ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 10.47 ไมโครวัตต์

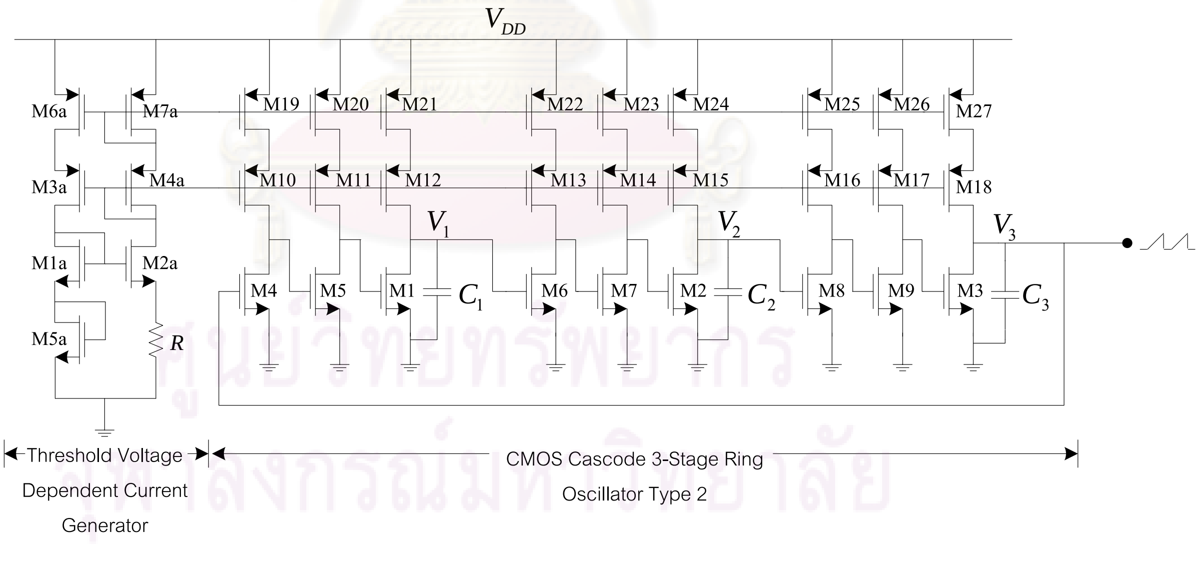


รูปที่ 4-7 กระแสที่เกิดขึ้นของวงจรผกผันแบบพื้นฐาน (เส้นทึบ) กับแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นประ)

จากการจำลองการทำงานจะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 10.47 ไมโครวัตต์ เป็นค่าที่สูง และไม่ตรงกับค่าที่คำนวณมาได้ในหัวข้อที่ 3.3 ที่เป็นเช่นนี้เกิดเนื่องจากกระแสที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการสับสวิตซ์ของวงจรผกผันแบบพื้นฐานที่เกิดขึ้นเป็นช่วงๆนั้นมีค่ามากซึ่งมีค่าเท่ากับ 37 ไมโครแอมป์ดังรูปที่ 4-7 จึงทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าของวงจรนี้มีค่ามาก

4.2.2 ผลการจำลองของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน

โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรแสดงดังรูปที่ 4-8 โดยได้แบ่งการจำลองการทำงานของวงจรออกเป็น 2 ส่วนเหมือนกับในหัวข้อ 4.2.1 ดังนี้ ส่วนที่ 1 ได้ทดสอบโดยออกแบบค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (3-11) และดูค่าความผิดพลาดของความถี่ที่ได้จากผลการจำลองการทำงานใน Level 1 เปรียบเทียบกับความถี่ที่ได้จากการคำนวณของสมการที่ (3-11) ส่วนที่ 2 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรใน Level 53 ซึ่งได้แก่สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆและสัญญาณขาออกของวงจรรวมทั้งค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดของวงจร



รูปที่ 4-8 โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ส่วนที่ 1: Level 1

หาค่าความผิดพลาดของความถี่ที่ได้มาจากผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันเทียบกับสมการที่ (3-11) ดังนี้

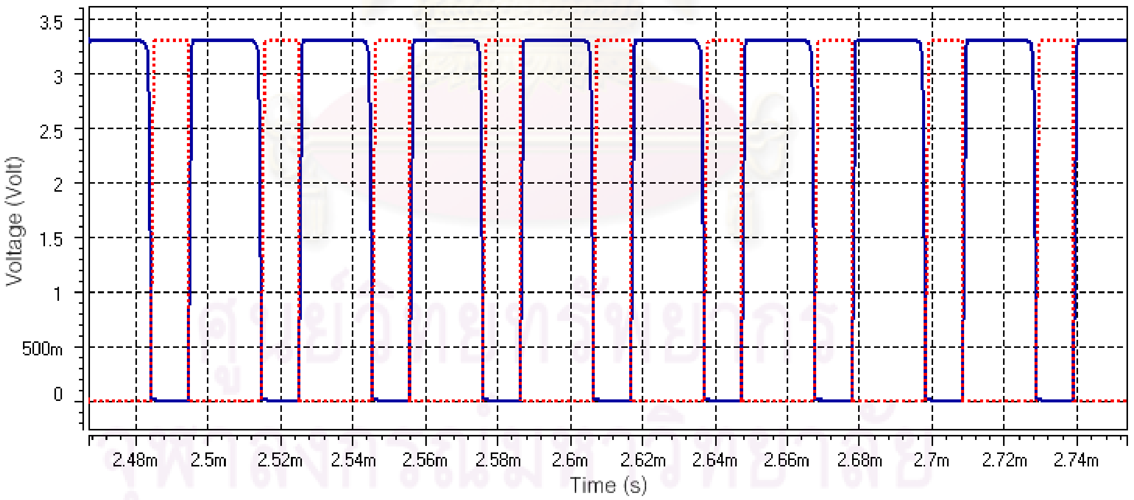
เมื่อวัดค่าความถี่ของผลการจำลองการทำงานจากสัญญาณแรงดันขาออกจะได้เท่ากับ 32558.2 เฮิรตซ์

$$\therefore \text{ความผิดพลาด} = \left(\frac{32768-32558.2}{32768}\right)\times 100\% = 0.64\ \%$$

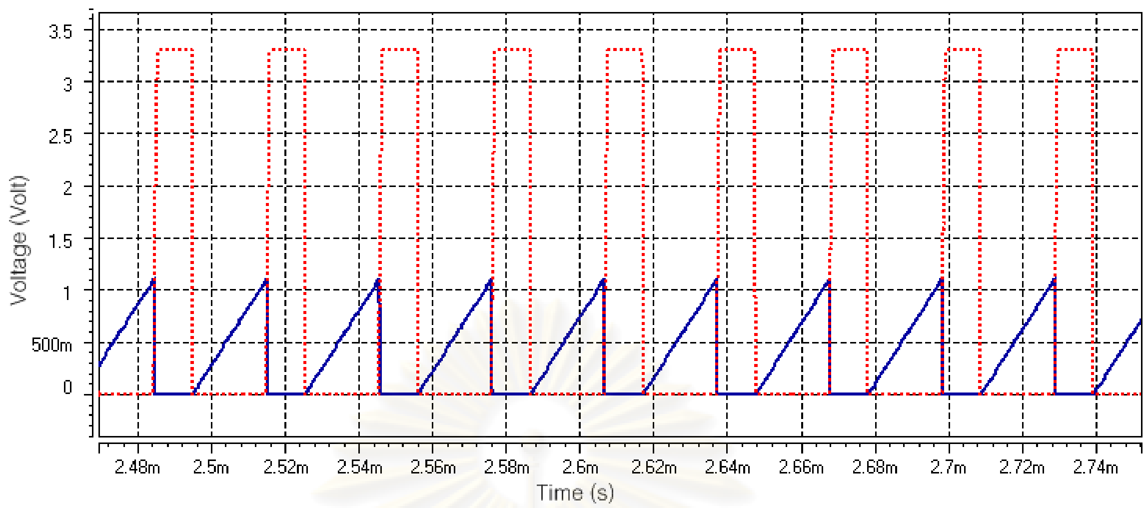
ความผิดพลาดนี้เกิดได้จากการวัดค่าจากผลการจำลองการทำงานซึ่งเราต้องกำหนดเองด้วยสายตา ดังนั้นจึงไม่มีความแม่นยำเพียงพอ ทำให้ค่าความถี่ที่ได้ออกมาผิดไปจากสูตรได้

ส่วนที่ 2: Level 53

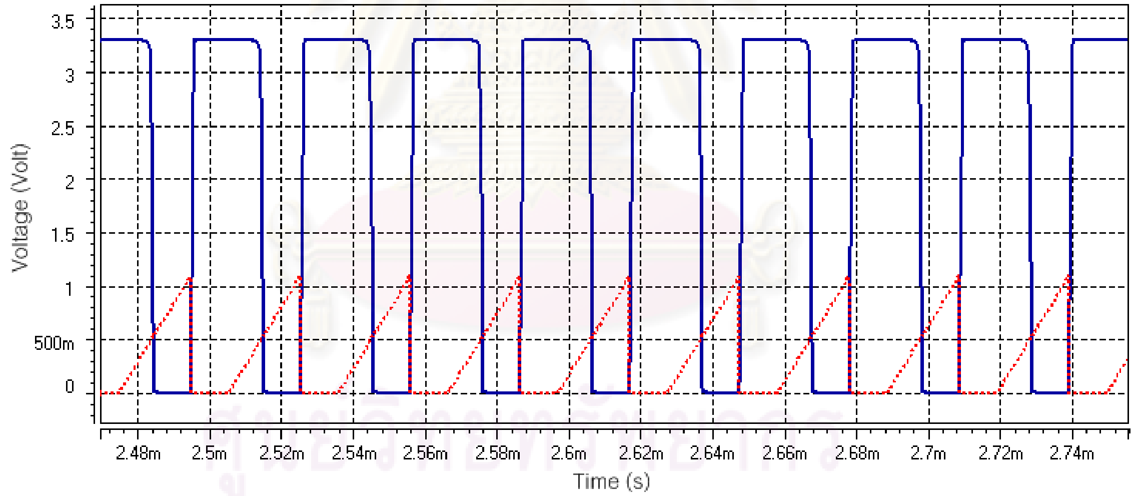
ผลการจำลองการทำงานของวงจรดังรูปที่ 4-8 แสดงสัญญาณแรงดันที่จุดต่างๆ รวมทั้งคาบของสัญญาณขาออก ดังนี้



รูปที่ 4-9 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นทึบ) กับสัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 (เส้นประ)



รูปที่ 4-10 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 (เส้นประ) กับสัญญาณแรงดันขาออก V_1 (เส้นทึบ)



รูปที่ 4-11 สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 (เส้นทึบ) กับสัญญาณแรงดันขาออก V_3 (เส้นประ)

เมื่อเราออกแบบวงจรตามรูปที่ 4-8 ทำให้แรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M4 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{DD} และแรงดันเดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 จะได้สัญญาณที่กลับกันดังรูปที่ 4-9 จึงส่งผลให้กระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ M1 เพิ่มขึ้น จากผลการจำลองในรูปที่ 4-10 จะได้ว่า เมื่อแรงดัน

เดรน-ซอสของทรานซิสเตอร์ M5 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{DD} จะทำให้กระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ M1 มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้แรงดันขาออก V_1 คายประจุจาก $2V_{th}$ ลงมาที่ 0 ทันที และสุดท้ายจากรูปที่ 4-11 ได้แสดงให้เห็นสัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของ M4 จะมีค่าลดลงเท่ากับ 0 เมื่อสัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่อยู่ในช่วงอัดประจุมีค่าเท่ากับ V_{th} ซึ่งทำให้ M4 เริ่มเปิด(ON) และเมื่อสัญญาณแรงดันขาออก V_3 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ $2V_{th}$ สัญญาณแรงดันเดรน-ซอสของ M4 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{DD} เพราะ M4 จะเริ่มปิด (OFF) เนื่องจากเป็นช่วงที่ตัวเก็บประจุที่แรงดันขาออก V_3 ได้คายประจุจนหมด ซึ่งการต่อวงจรดังรูปที่ 4-8 จะช่วยเพิ่มอัตราขยายวงรอบของแต่ละภาคจึงส่งผลให้กระแสเดรนของแต่ละภาคเพิ่มขึ้น ดังนั้นสัญญาณแรงดันขาออก V_3 ที่ได้จึงลดลงจาก $2V_{th}$ เป็น 0 ทันทีและรอจนกระทั่งสัญญาณแรงดันขาออก V_3 ในช่วงอัดประจุมีค่าเท่ากับ V_{th} ใหม่ถึงจะเริ่มเปิดใหม่อีกครั้งหนึ่งซึ่งจะเห็นว่าสามารถแก้ปัญหาผลของความกว้างของทรานซิสเตอร์ได้ จากที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันนั้นมีหลักการทำงานของวงจรแบบเดียวกับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผัน

ออกแบบวงจรโดยใช้วิธีปรับค่าความต้านทานแทนเพื่อให้ได้ความถี่ออกมาใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด จะทำแบบเดียวกับกรณีของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันดังนี้ ทำการวัดค่าของคาบจากผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแรงดันขาออก V_3 เมื่อปรับค่าความต้านทานแล้ว โดยใช้ความต้านทานเท่ากับ 448 กิโลโอห์ม จะได้คาบเท่ากับ 30.5175 ไมโครวินาที และจะคำนวณเป็นค่าความถี่ได้เท่ากับ 32768.08 เฮิรตซ์ จะหาค่าความผิดพลาดของความถี่ที่ได้มาจากผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันเทียบกับค่าความถี่ที่ต้องการ ได้ดังนี้

เมื่อวัดค่าความถี่ของผลการจำลองการทำงานได้เท่ากับ 32768.08 เฮิรตซ์

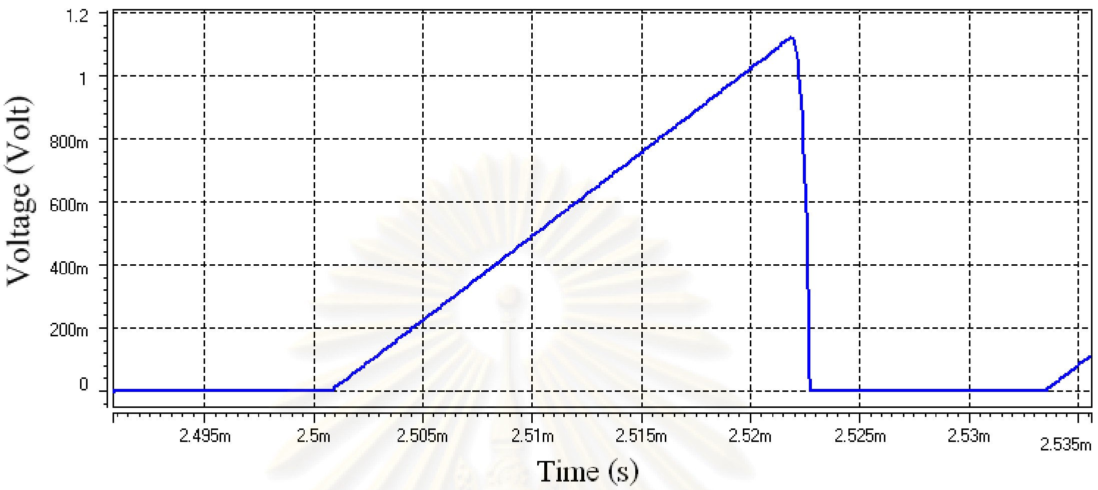
$$\therefore \text{ความผิดพลาด} = \left(\frac{32768 - 32768.08}{32768}\right) \times 100\% = 0.0002\ \%$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการจำลองการทำงาน จะได้

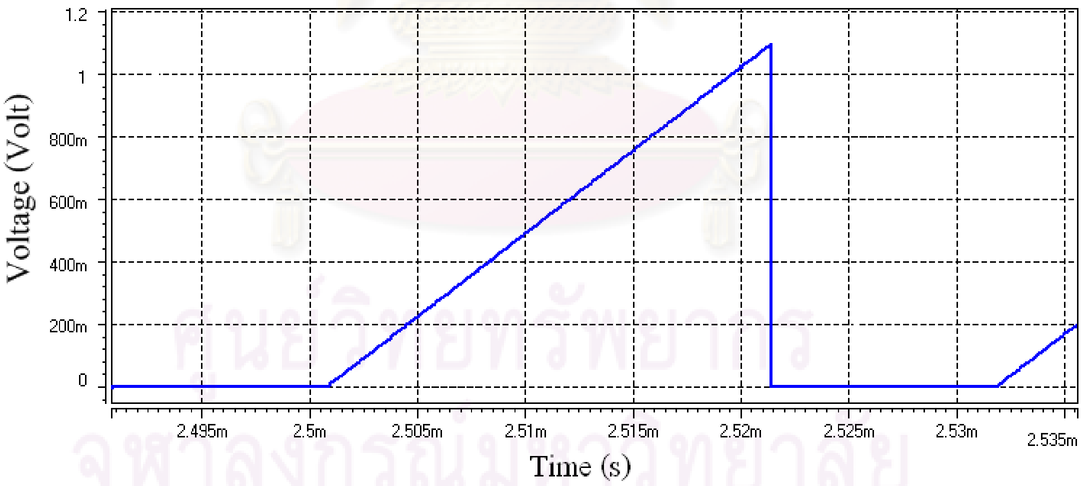
ค่ากำลังไฟฟ้า = 5.08 ไมโครวัตต์

จากค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการจำลองการทำงานในข้างต้นจะได้ว่ามีค่าน้อยตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการออกแบบ และใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 3.4 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึง

ออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันเพื่อเป็นวงจรให้กำเนิดสัญญาณความถี่ให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง



รูปที่ 4-12 สัญญาณแรงดันขาออก (V_3) ของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3-1 เมื่อใช้ W_n เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร

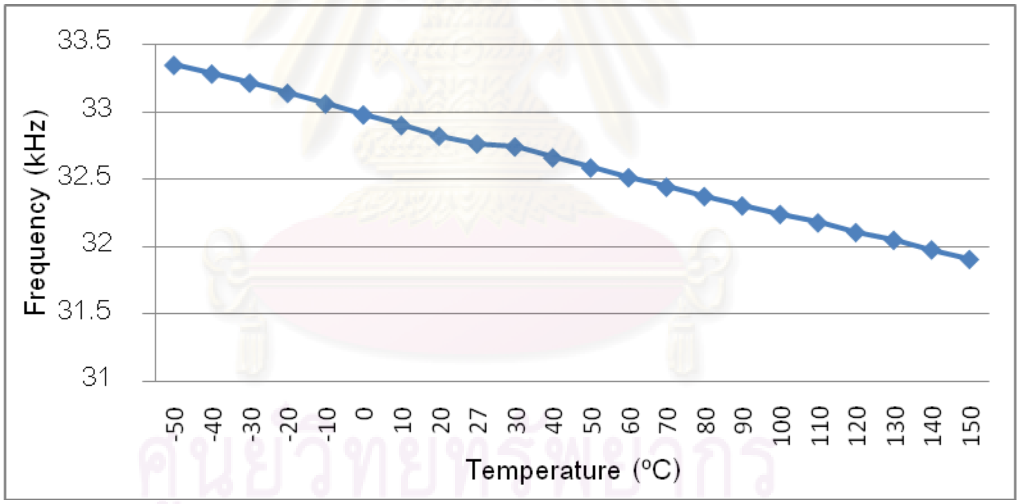


รูปที่ 4-13 สัญญาณแรงดันขาออก (V_3) ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 4-8 เมื่อใช้ W_n เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันขาออกของวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐานดังรูปที่ 4-12 กับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันที่ได้ออกแบบดังรูปที่ 4-13 จะพบว่าสัญญาณแรงดันขาออกของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบสามารถคายประจุได้ทันทีโดยออกแบบที่ค่าความกว้างของ NMOS (W_n) เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตรเหมือนกัน

นอกจากเราจะทดสอบค่าของความถี่และค่าของกำลังไฟฟ้าให้ได้ค่าที่อยู่ในช่วงตามต้องการแล้วนั้น ยังต้องคำนึงถึงกระบวนการผลิตและการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอกอีกด้วย เพราะการเปลี่ยนแปลงทั้งสองอย่างนี้จะมีผลต่อพารามิเตอร์ภายในของวงจรที่ออกแบบโดยตรง โดยจะทำให้สัญญาณความถี่ที่ออกมามีค่าไม่แม่นยำได้ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ภายในที่เปลี่ยนแปลงตามกระบวนการผลิตและสภาพแวดล้อมภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ และค่าแรงดันไฟเลี้ยงโดยจะกล่าวต่อไป

4.3 **ผลของอุณหภูมิ**



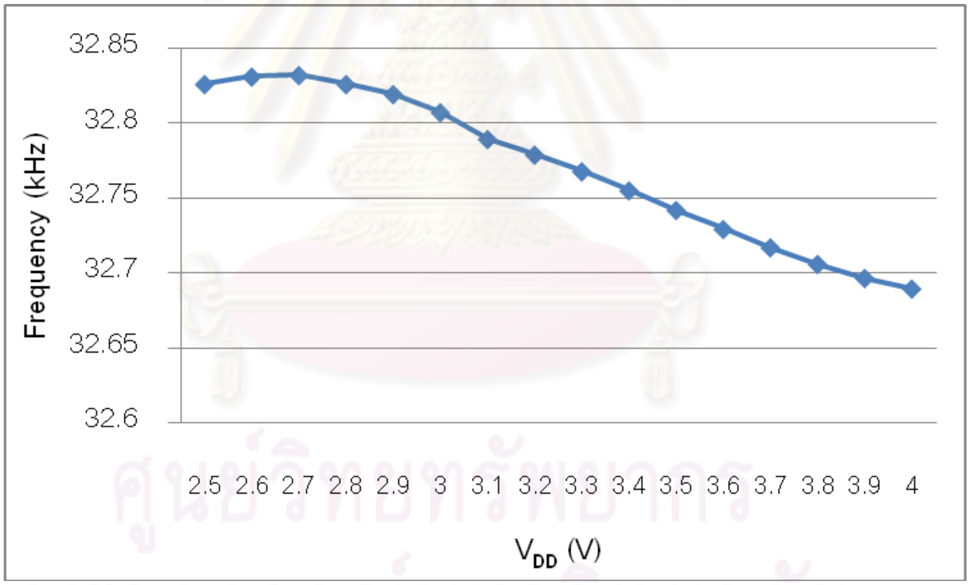
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.2 เราได้เลือกวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันเพื่อใช้เป็นวงจรให้กำเนิดสัญญาณความถี่ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้แสดงผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน โดยจะได้ว่าเนื่องจากอุณหภูมิมีผลโดยตรงกับค่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนซึ่งได้กล่าว

ไปแล้วในบทที่ 2 เราจึงชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนโดยการต่อวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นตัวให้กำเนิดกระแสให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบซึ่งจะสามารถชดเชยผลของอุณหภูมิได้ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันดังรูปที่ 4-14 ซึ่งจะได้ว่าในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -50 ถึง 110 องศาเซลเซียสเป็นค่าที่ยอมรับได้เพราะมีความผิดพลาดของความถี่ไม่เกิน $\pm 2\%$ จึงสรุปได้ว่าวงจรให้กำเนิดสัญญาณความถี่ที่ออกแบบนี้สามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -50 ถึง 110 องศาเซลเซียส

4.4 ผลของแรงดันไฟเลี้ยง

แรงดันไฟเลี้ยงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขณะที่วงจรทำงาน ดังนั้นเราจึงแสดงผลของแรงดันไฟเลี้ยงที่มีผลต่อวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันดังรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟเลี้ยงกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน

ซึ่งวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบนี้มีข้อจำกัดในการใช้ค่าของแรงดันไฟเลี้ยงจะขึ้นอยู่กับวงจรกำเนิดกระแสที่แปรตามแรงดันขีดเริ่มโดยจะกล่าวอีกทีในบทที่ 5 ซึ่งจากผลการจำลองการทำงานจะ

เห็นว่าในช่วงที่แรงดันไฟเลี้ยงใกล้เคียงกันจะได้ว่าความถี่ที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยค่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ได้เมื่อแรงดันไฟเลี้ยงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงประมาณ 0.04%

4.5 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการจำลองการทำงานของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อศึกษาผลของความต้านทานของวงจร และศึกษาผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบทั้งสองแบบโดยจะได้ว่าวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันเหมาะสมที่จะใช้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่มากกว่าวงจรแบบมีวงจรบัฟเฟอร์ผกผันเพราะกินกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า โดยมีช่วงของอุณหภูมิที่ใช้งานได้เท่ากับ -50 ถึง 110 องศาเซลเซียสซึ่งได้จากผลการจำลองของโปรแกรม H-spice และสุดท้ายได้แสดงผลของแรงดันไฟเลี้ยงของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบโดยจะได้ว่าค่าของความถี่ที่ได้จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากในแต่ละช่วงประมาณ 0.04% เมื่อค่าของแรงดันไฟเลี้ยงเปลี่ยนแปลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

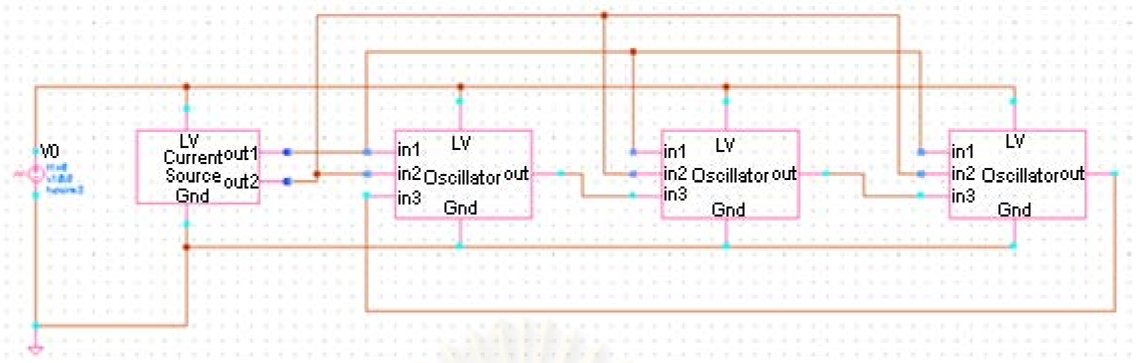
บทที่ 5

การวาดลายวงจร

เมื่อได้ออกแบบวงจรให้สามารถทำงานได้ตามที่กำหนดแล้ว ขั้นต่อไปในการออกแบบคือการนำวงจรที่ได้ออกแบบไว้มาเขียนเป็นลายวงจร เพื่อส่งลายวงจรดังกล่าวให้กับทางโรงงานเจือสารเพื่อทำการผลิตวงจรรวมต่อไป การวาดลายวงจร [14] ทำได้โดยใช้โปรแกรมวาดลายวงจร (Layout) ลายวงจรที่วาดนั้นจะต้องไม่ขัดกับข้อกำหนดของโรงงาน โดยสามารถตรวจสอบได้โดยกระบวนการดีอาร์ซี (DRC หรือ Design Rule Check) หลังจากวาดลายวงจรเสร็จสิ้นแล้วจะต้องทำการตรวจสอบลายวงจรโดยการสกัด (Extract) ข้อมูลจากลายวงจรมาเป็นอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ ตลอดจนโหนดต่างๆของวงจร จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับผังวงจร (Schematic) ที่ได้ออกแบบโดยเรียกกระบวนการนี้ว่าแอลวีเอส (LVS หรือ Layout Versus Schematic) ซึ่งเมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้วจึงส่งข้อมูลผังวงจรทั้งหมดให้กับโรงงานเจือสารต่อไป

รายละเอียดของการวาดลายวงจรที่จะกล่าวถึงคือ ส่วนของวงจรภาคแอนะล็อกซึ่งได้แก่ วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันโดยจะใช้กระแสจากวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน และแสดงการหาค่าสัญญาณแรงดันไฟเลี้ยงในช่วงที่สามารถใช้ได้ของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบโดยต้องคำนึงถึงวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน โดยการวาดวงจรในส่วนนี้จะทำการวาดด้วยมือทั้งหมด

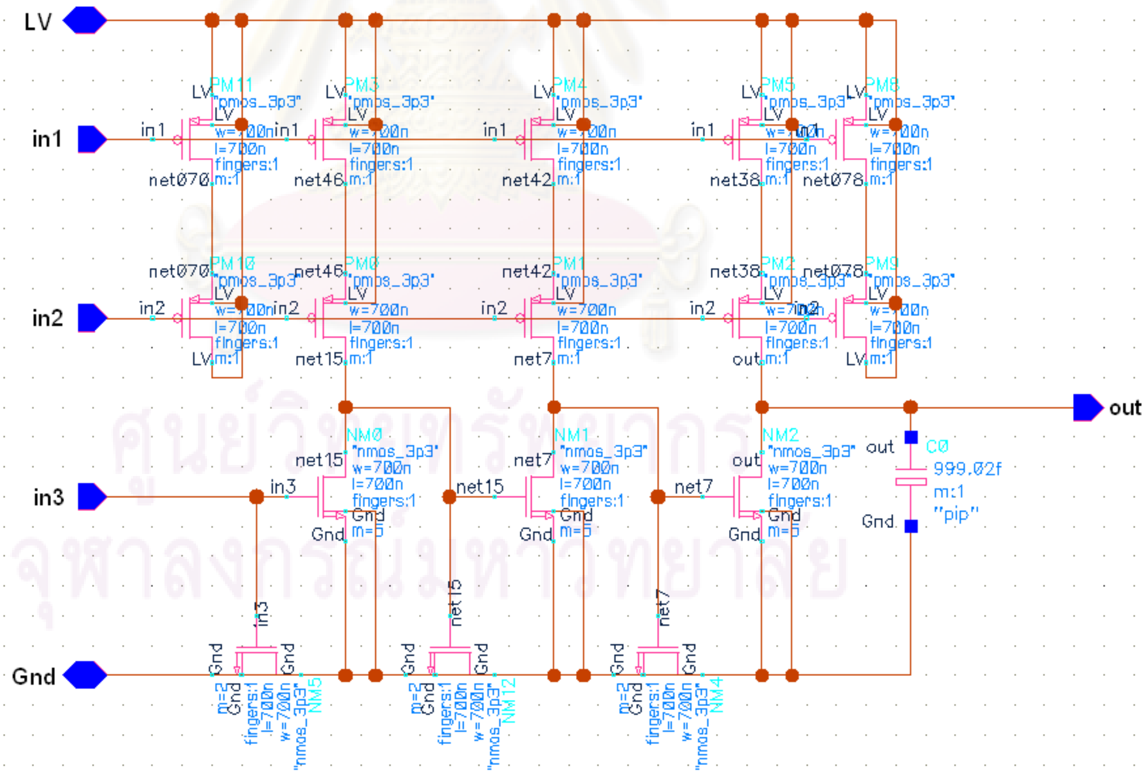
เนื่องจากวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบมีทั้งหมด 3 ภาคโดยที่ในแต่ละภาคจะมีองค์ประกอบภายในที่เหมือนกัน ดังนั้นในการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบเราจะวาดลายวงจรเพียงภาคเดียวแล้วเขียนสัญลักษณ์ของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานขึ้นมาดังรูปที่ 5-1 เพื่อใช้แสดงภาพรวมของวงจรทั้งหมด และเชื่อมวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนกับวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้ง 3 ภาคที่ออกแบบเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะใช้ในการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรต่อไป



รูปที่ 5-1 สัญลักษณ์ของวงจรออสซิลเลเตอร์ 3 ภาคที่รับกระแสจากวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน

5.1 การวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ

การหาผลการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรจำเป็นต้องเขียนผังวงจรควบคู่ไปด้วยเสมอโดยผังวงจรจะต้องมีองค์ประกอบภายในที่เหมือนกับลายวงจรที่วาดเสมอ

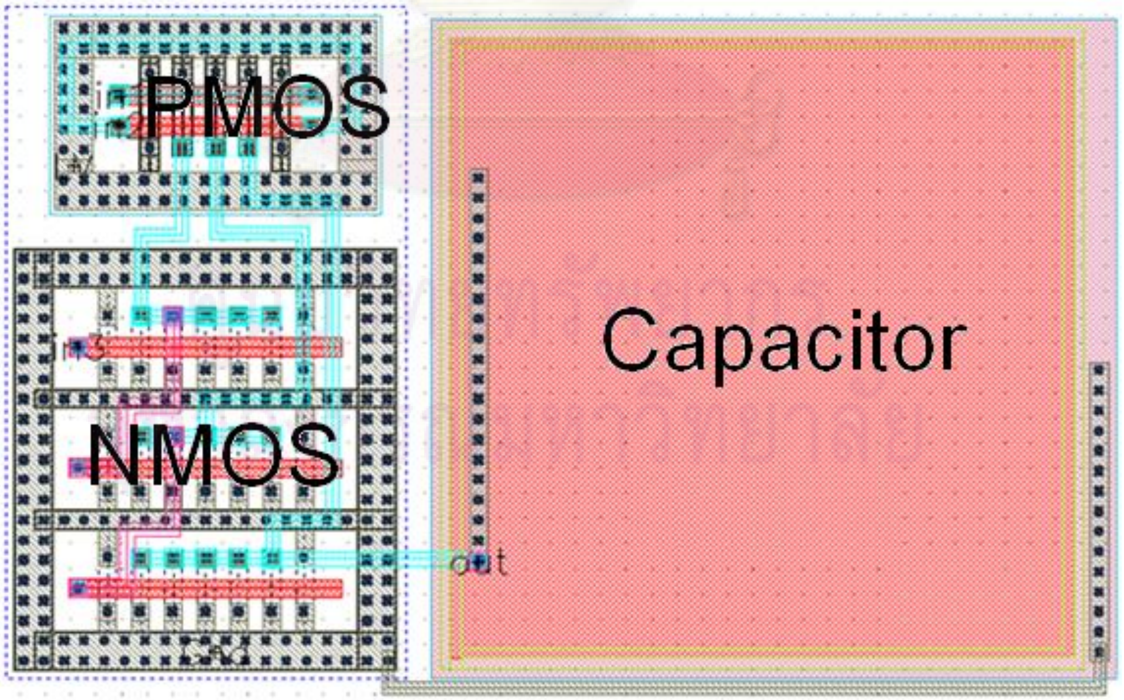


รูปที่ 5-2 ผังวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

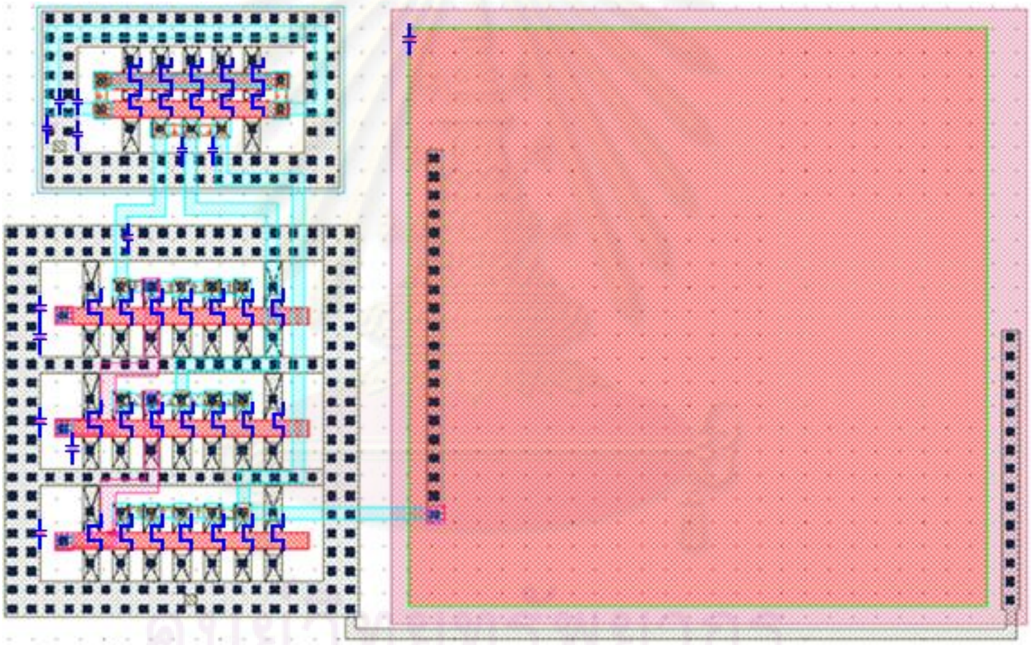
ผังวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบตามการวาดลายวงจรแสดงดังรูปที่ 5-2 โดยจะเห็นว่าทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในผังวงจรที่ออกแบบมีจำนวนมากกว่าทรานซิสเตอร์ที่อยู่ภายในโครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบเพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของโปรแกรม H-spice ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4-8 ที่เป็นเช่นนี้เกิดจากข้อกำหนดในการวาดลายวงจรโดยจะกล่าวต่อไป

การวาดลายวงจรดังรูปที่ 5-3 แสดงให้เห็นว่าหากเป็นอุปกรณ์ที่ต้องการความเข้าคู่กัน (matching) ในที่นี้ได้แก่วงจรสะท้อนกระแสจะใช้หลักการวางให้มีจุดศูนย์ถ่วงอยู่ที่เดียวกันและวางให้ใกล้กันมากที่สุด และจะเห็นว่าทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด PMOS และ NMOS ต่างก็มีทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันนั้นคร่อมปิดทั้งสองด้าน (เรียกว่า Dummy gate) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากต้องการให้ผลการจำลองที่ได้ไม่ผิดไปจากที่ต้องการ เพราะการต่อแบบนี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ต้องการใช้จริงนั้นมองเห็นว่ารอบข้างก็เป็นทรานซิสเตอร์เหมือนกัน ชนิดเดียวกัน และมีขนาดเท่ากันจึงทำให้ไม่ผิดปกติในการจำลองการทำงาน เมื่อวาดลายวงจรเสร็จแล้วต้องนำมาผ่านการตรวจสอบโดยกระบวนการดีอาร์ซีก่อนเพื่อที่จะตรวจสอบวงจรที่วาดให้ผ่านข้อกำหนดตามที่โรงงานต้องการ เช่น จะตรวจสอบว่าการเว้นระยะห่างในสารชนิดต่างๆอยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ และจุดเชื่อมต่อต่างๆได้มีการเชื่อมต่อกันจริงหรือไม่ เป็นต้น โดยในการวาดลายวงจรนี้ได้ใช้เทคโนโลยี 0.35 ไมโครเมตร

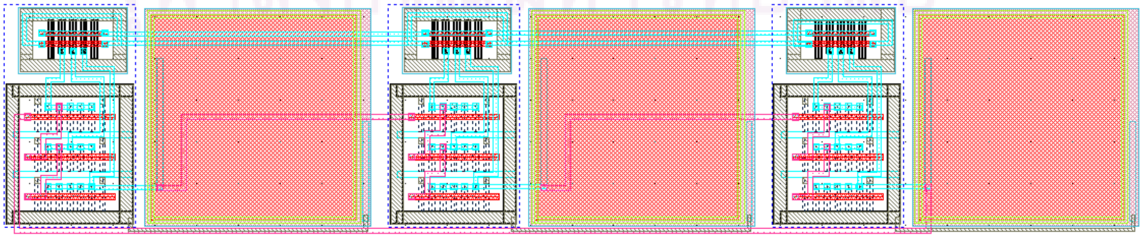


รูปที่ 5-3 การวาดลายวงจรใน 1 ภาคของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ

เมื่อวาดลายวงจรกับเขียนผังวงจรใน 1 ภาคของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบและตรวจสอบโดยกระบวนการดีอาร์ซีเสร็จแล้วจะนำลายวงจรมาทำการสกัด (Extract) ดังรูปที่ 5-4 โดยจะสกัดข้อมูลจากลายวงจรมาเป็นอุปกรณ์ต่างๆซึ่งจะเห็นว่าประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุตลอดจนโหนดต่างๆของวงจร จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการแอลวีเอสโดยจะเปรียบเทียบลายวงจรกับผังวงจรที่ได้ออกแบบ และเมื่อผ่านกระบวนการแอลวีเอสแล้วจะนำมาจำลองการทำงานเพื่อแสดงผลการจำลองการทำงานที่ได้จากการวาดลายวงจร ซึ่งเมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้วจึงส่งข้อมูลผังวงจรทั้งหมดให้กับโรงงานเจือสารต่อไป ส่วนในรูปที่ 5-5 ได้แสดงการวาดลายวงจรรวมของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบทั้ง 3 ภาค และเมื่อวัดขนาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้ง 3 ภาคที่ออกแบบนี้จะได้ 135.925×27.525 นาโนเมตร ดังนั้นจะได้พื้นที่เท่ากับ 3.741 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ 5-4 การสกัดข้อมูลจากลายวงจรใน 1 ภาคของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ



รูปที่ 5-5 การวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบทั้ง 3 ภาค

5.2 ผลการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ

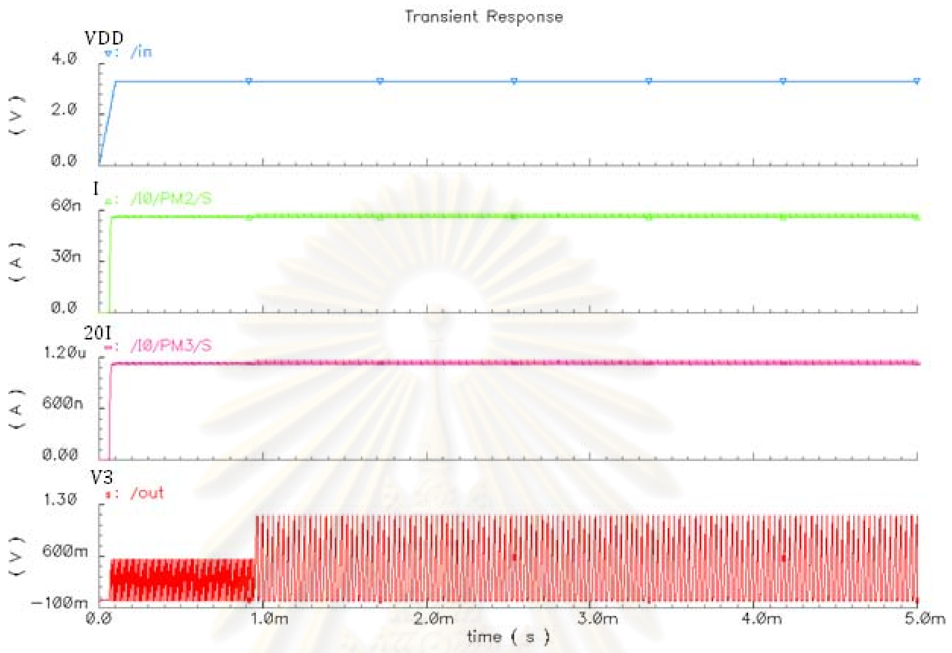
ผลการจำลองการทำงานทั้งหมดของวงจรรูปที่ 5-1 แสดงดังรูปที่ 5-6 โดยจะประกอบด้วยสัญญาณของแรงดันไฟเลี้ยง ค่ากระแสทั้งสองด้านของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนซึ่งเป็นกระแสที่มาจากรูปที่ 3-23 และสัญญาณแรงดันขาออกของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบที่ได้จากการวาดลายวงจรแสดงดังรูปที่ 5-7 ซึ่งจะแสดงการวัดสัญญาณแรงดันขาออกที่ได้จากการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบโดยเลือกค่าความต้านทานที่ได้ปรับค่ามาแล้วจากการจำลองในโปรแกรม H-spice ซึ่งมีค่าเท่ากับ 448 กิโลโอห์ม ดังนั้นจะวัดความถี่ได้เท่ากับ 32006.86 เฮิรตซ์ ในการจำลองนี้ได้ทดสอบในอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส แรงดันไฟเลี้ยงเท่ากับ 3.3 โวลต์ ส่วนขนาดของทรานซิสเตอร์และค่าของตัวเก็บประจุใช้ค่าเดียวกับค่าที่ใช้ในการจำลองของโปรแกรม H-spice โดยได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ในเมื่อความถี่ที่วัดได้ยังไม่ได้ตามค่าที่ต้องการ ดังนั้นเราจะปรับค่าความต้านทานใหม่เพื่อหาค่าความถี่ให้ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากยิ่งขึ้นโดยจะได้ค่าความต้านทานที่ปรับใหม่เท่ากับ 435 กิโลโอห์ม และวัดค่าความถี่ของผลการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรได้เท่ากับ 32767.44 เฮิรตซ์

$$\therefore \text{หาความผิดพลาด} = \left(\frac{32768-32767.44}{32768}\right) \times 100\% = 0.0017\ \%$$

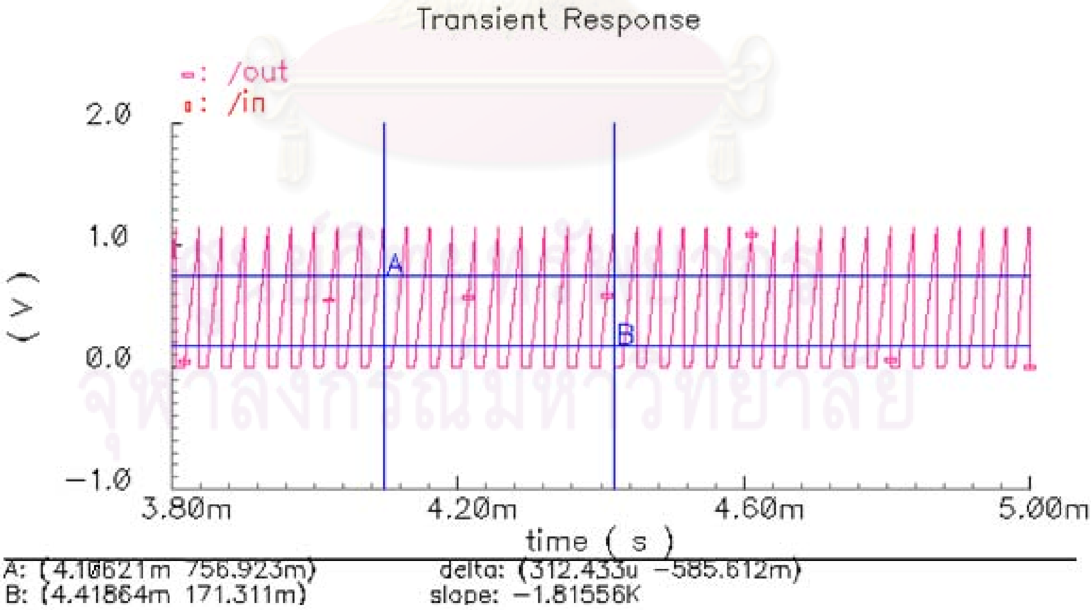
และจากรูปที่ 5-8 จะแสดงผลของอุณหภูมิที่ได้จากผลการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบโดยจะได้ว่าวงจรสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -25 ถึง 85 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าความผิดพลาดของความถี่ไม่เกิน ±2% ตามที่ได้กำหนดไว้ โดยจะเห็นว่าผลของอุณหภูมิที่ได้จากการวาดลายวงจรจะมีช่วงของอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงของอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้จากการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม H-spice

จากผลการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจะใช้ค่าของความต้านทานเท่ากับ 435 กิโลโอห์มโดยในการออกแบบเราจะใช้วิธีการทริมความต้านทานเพื่อให้ค่าของความต้านทานที่ได้ออกมามีความแม่นยำมากที่สุด และวิธีการทริมนี้ยังทำให้ความต้านทานที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยมากจึงทำให้ไม่มีปัญหากับวงจรที่ออกแบบ และการที่เราเลือกความต้านทานที่ได้จากการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจร เนื่องจากจะได้ว่าการวาดลายวงจรเป็นการจำลองการทำงานใกล้เคียงความจริงมากกว่าการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม H-spice

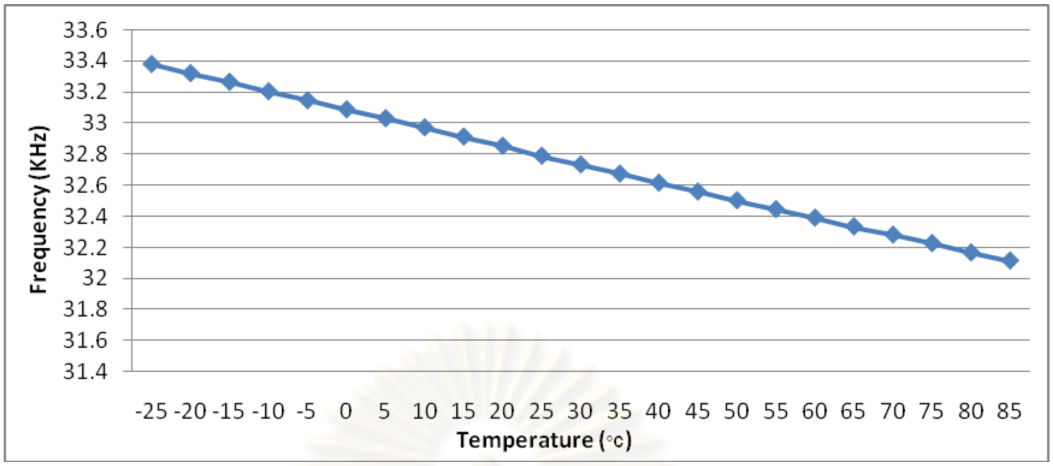
เพราะหลังจากขั้นตอนนี้ก็จะเป็นการส่งข้อมูลไปยังโรงงานเจือสารเพื่อที่จะทำการผลิตอุปกรณ์ออกมาใช้งาน



รูปที่ 5-6 ผลการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรรูปที่ 5-1

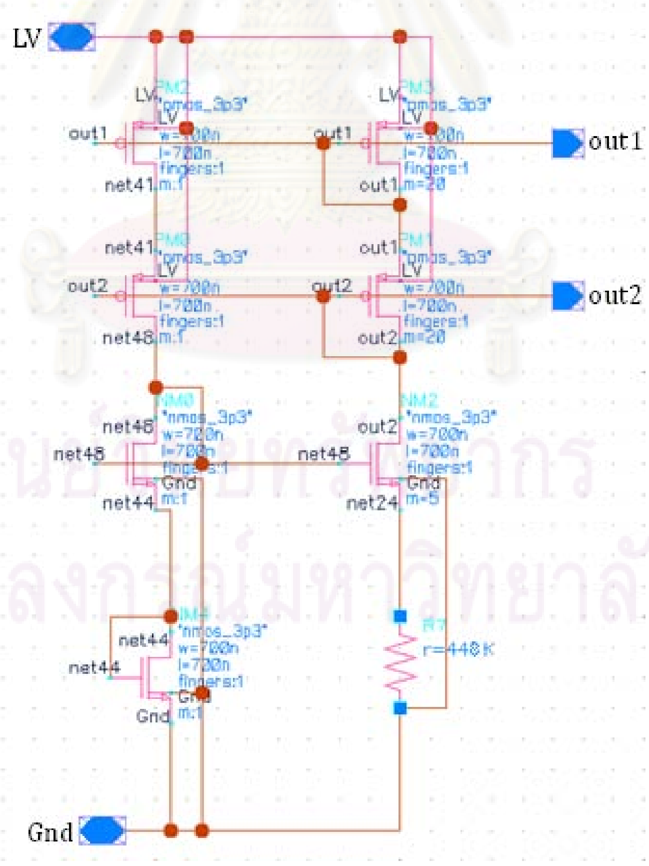


รูปที่ 5-7 สัญญาณแรงดันขาออกที่ได้จากการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ

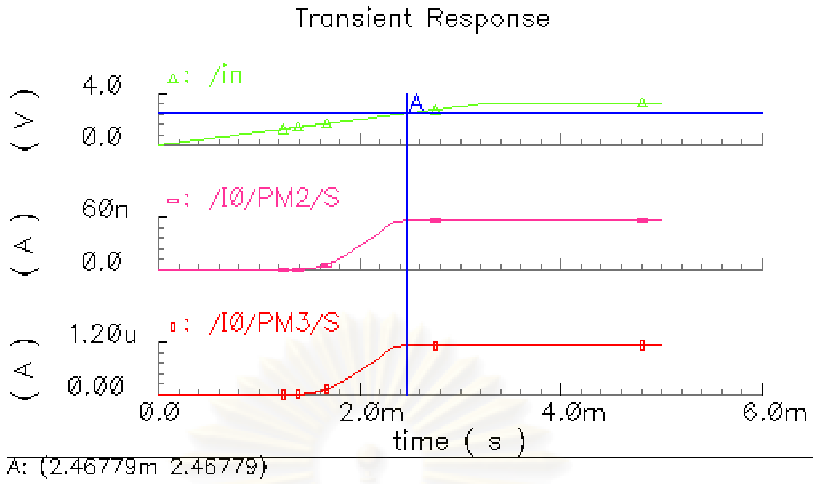


รูปที่ 5-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความถี่ที่ได้จากการจำลองการทำงานของการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ

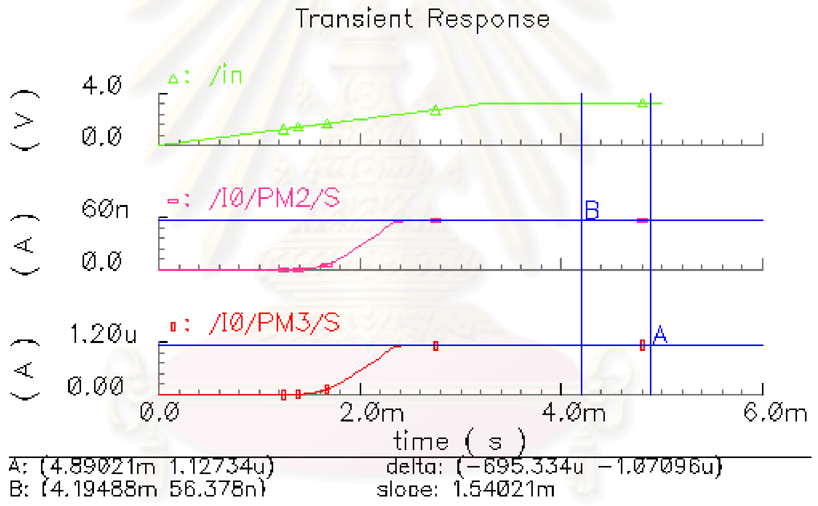
5.3 การหาขนาดจำกัดของแรงดันไฟเลี้ยงที่ควรใช้ในวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ



รูปที่ 5-9 ผังวงจรของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน



รูปที่ 5-10 สัญญาณแรงดันไฟเลี้ยงกับค่ากระแสของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน



รูปที่ 5-11 ค่ากระแสของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน

เนื่องจากวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นวงจรจ่ายกระแสให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ ดังนั้นการหาขนาดจำกัดของแรงดันไฟเลี้ยงที่ใช้จึงต้องคำนึงถึงวงจรกำเนิดกระแส โดยในรูปที่ 5-9 จะแสดงผังวงจรของวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนที่ใช้สำหรับการจำลองผลการทำงานเพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟเลี้ยงกับกระแสของวงจรดังรูปที่ 5-10 โดยจะเห็นว่าค่ากระแสที่เกิดขึ้นจะมีช่วงที่ไม่คงที่ซึ่งจะทำให้วงจรไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นเราจะพิจารณาค่าของแรงดันไฟเลี้ยงตั้งแต่ช่วงที่กระแสมีค่าคงที่เป็นต้นไปโดยจะได้ว่ากระแสจะ

ทำงานได้ต่อเมื่อแหล่งดันไฟเลี้ยงมีค่ามากกว่า 2.46779 โวลต์ และจากรูปที่ 5-11 แสดงให้เห็นว่าค่ากระแสที่วัดได้จากวงจรกำเนิดกระแสมีค่าใกล้เคียงกับกระแสที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 3.5

5.4 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการวาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบโดยการจำลองผลการทำงานด้วยวิธีนี้จะใกล้เคียงกับผลที่จะได้เมื่อนำไปผลิตจริงมากที่สุด ในการจำลองนี้ใช้เทคโนโลยี 0.35 ไมโครเมตร ใช้ความต้านทานเท่ากับ 435 กิโลโอห์มในการออกแบบ อุณหภูมิที่ใช้งานได้ของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบเมื่อจำลองการทำงานจากโปรแกรมวาดลายวงจรจะอยู่ในช่วง -25 ถึง 85 องศาเซลเซียส แรงดันไฟเลี้ยงที่ใช้ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าประมาณ 2.5 โวลต์ และเมื่อวัดขนาดลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้ง 3 ภาคที่ออกแบบนี้จะมีค่าไม่เกิน 4 ไมโครเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

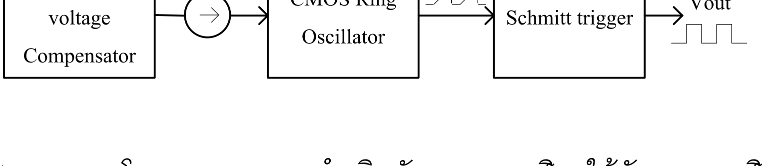
บทที่ 6

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบวงจรให้กำเนิดสัญญาณความถี่เพื่อประยุกต์ใช้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริงโดยใช้ซี-มอสเฟตขึ้นแทนผลึกควอทซ์ เพราะว่ามีขนาดเล็กกว่าและสามารถนำไปใส่รวมกับวงจรรวมได้ซึ่งจะสามารถช่วยประหยัดพื้นที่ได้มากกว่าวงจรผลึกควอทซ์ ซึ่งวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ที่ออกแบบโดยใช้ซี-มอสเฟตนี้จะมีความแม่นยำมากโดยจะมีความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 2\%$ สามารถทำงานได้ที่แรงดัน 2.5 ถึง 3.3 โวลต์ และทำงานได้เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง -25 ถึง 85 องศาเซลเซียส กินกำลังงานไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 5.08 ไมโครวัตต์ การออกแบบใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.35 ไมโครเมตร และวัดขนาดพื้นที่ของลายวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคที่นำเสนอได้เท่ากับ 3.741 ตารางไมโครเมตร

ในบทนี้จะกล่าวสรุปถึงการออกแบบองค์ประกอบในส่วนต่างๆของวงจรเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริงโดยจะแบ่งออกเป็น 2 ภาคคือภาคแอนะล็อกและภาคดิจิตอล โดยในส่วนของภาคแอนะล็อกจะเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาเพื่อป้อนให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง ซึ่งจะประกอบด้วยวงจรทั้งหมดสามส่วนดังแสดงในรูปที่ 6-1 ดังนี้ ส่วนแรกคือวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันซึ่งทำหน้าที่ผลิตสัญญาณความถี่ออกมาโดยวงจรนี้จะกินกำลังไฟฟ้าน้อยมาก และให้ความถี่ที่มีความแม่นยำได้ ส่วนที่สองคือวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกำเนิดกระแสให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ เพราะเนื่องจากวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบมีค่าขึ้นกับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจะเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการเจือสารและอุณหภูมิโดยตรง ดังนั้นจึงต่อวงจรในส่วนที่สองนี้มาเพื่อชดเชยค่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนที่เกิดขึ้น ส่วนที่สาม ได้แก่ วงจรจุดชนวนของชมิตต์ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เพื่อที่จะส่งไปใช้กับวงจรภาคดิจิทัลต่อไป



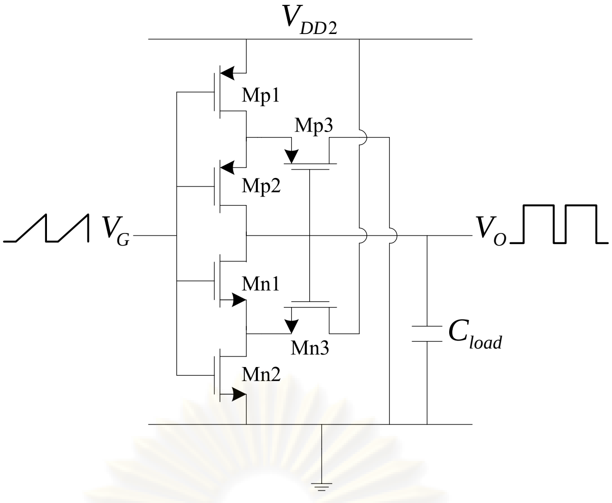
รูปที่ 6-1 แผนภาพโดยรวมของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง

ส่วนในภาคดิจิทัลแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนของวงจรหารความถี่โดยจะทำหน้าที่หารความถี่ 32768 เฮิรตซ์ จนถึง 1 เฮิรตซ์ และส่งสัญญาณต่อไปยังวงจรในส่วนที่สองซึ่งคือ ส่วนของวงจรนาฬิกาเวลาจริงโดยจะประกอบด้วย วงจรนับและวงจรถอดรหัส โดยวงจรนับและวงจรถอดรหัสนี้จะกินพลังงานน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรหารความถี่ ดังนั้นจะละทิ้งในการหาค่าพลังงาน

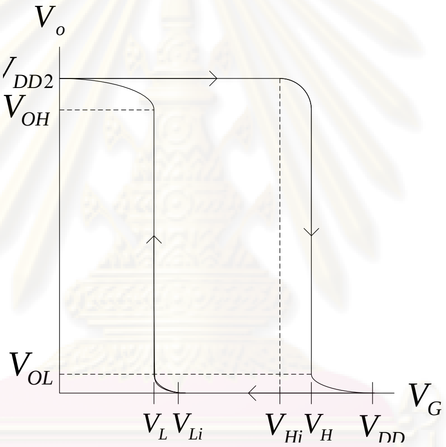
โดยในบทก่อนหน้านี้เราได้ศึกษาวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผัน และวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนซึ่งเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่แล้ว โดยความต้านทานที่ใช้ในวงจรชดเชยผลของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจะใช้วิธีการทริมเพื่อให้ค่าความต้านทานที่ออกแบบมีความแม่นยำ โดยการทริม (trim) คือเทคโนโลยีที่ใช้เลเซอร์ (laser) ในการตัดตัวต้านทานเพื่อทำให้ได้ค่าที่ต้องการ โดยเทคโนโลยีการทริมนี้จะมีความแม่นยำสูงและไม่ขึ้นกับอุณหภูมิโดยมีวิธีการทริมดังนี้ เริ่มจากการทริมค่าความต้านทานให้ได้ค่าที่แม่นยำที่สุดทำได้โดยการเพิ่มแรงดันพัลส์ (pulse) [15] ในการทริมมากขึ้นเรื่อยๆเพื่อให้ความต้านทานลดลงและได้ค่าใกล้เคียงค่าที่ต้องการมากที่สุด ดังนั้นวิธีการทริมทำได้โดยคำนวณแรงดันพัลส์จากค่าความต้านทานที่ต้องการและนำค่าแรงดันพัลส์ที่ได้มาตัดตัวต้านทานเพื่อได้ค่าที่ต้องการ การทริมตัวต้านทานนี้ได้ถูกทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง -25 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยจะมีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า $\pm 1\%$ เราจึงสรุปได้ว่าเทคโนโลยีการทริมตัวต้านทานนี้สามารถทำให้ตัวต้านทานมีค่าที่แม่นยำและไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และต่อไปจะกล่าวถึงการนำวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ที่ได้ศึกษามานั้นมาประยุกต์ใช้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง โดยจะพิจารณาส่วนที่เหลือทั้งหมดดังต่อไปนี้

6.1.1 วงจรจุดชนวนของชมิตต์ (Schmitt Trigger)

วงจรจุดชนวนของชมิตต์ [16] คือวงจรสุดท้ายของวงจรภาคแอนะล็อกที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณไปยังภาคดิจิทัล ซึ่งเป็นวงจรที่เปลี่ยนสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เนื่องจากวงจรจุดชนวนของชมิตต์สามารถเลือกใช้และสร้างได้หลากหลายตามความเหมาะสมกับวงจร ณ ที่นี้จะยกตัวอย่างวงจรจุดชนวนของชมิตต์ที่จะใช้ในการออกแบบดังรูปที่ 6-2 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า (V_G) กับแรงดันขาออก (V_o) แสดงในรูปที่ 6-3



รูปที่ 6-2 วงจรจุดชนวนของชมิตต์



รูปที่ 6-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า (V_G) กับแรงดันขาออก (V_o)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 6-3 สามารถหาค่าของ V_{Hi}, V_{Li} ได้ดังนี้

$$V_{Hi} = \frac{V_{DD} + V_{TN}}{2}$$
$$V_{Li} = \frac{V_{DD} - |V_{TP}|}{2} \qquad (6\text{-}1)$$

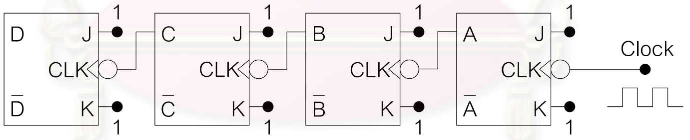
6.1.2 <u>การออกแบบวงจรหารความถี่และการหาพลังงานของวงจรหารความถี่</u>

เนื่องจากวงจรนับ [17] เป็นวงจรพื้นฐานที่สำคัญและนิยมใช้กันมากในระบบดิจิตอล เพราะวงจรนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรต่างๆมากมาย เช่น วงจรนาฬิกา วงจรหารความถี่ วงจรนับในงานอุตสาหกรรม และ อื่นๆ หลักการทำงานของวงจรนับส่วนใหญ่จะเป็นวงจรการนับแบบ

เลขไบนารี่ และจะเป็นการนับสัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้าในวงจร วงจรนับประกอบไปด้วยฟลิบฟลอปที่ต่อกันเป็นวงจร วงจรนับสามารถแบ่งเป็น 2 แบบใหญ่ คือ

1. วงจรนับแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous หรือ Ripple Counter) คือ การทำงานของวงจรทั้งหมดจะเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน และไม่พร้อมกับสัญญาณความถี่ที่ป้อนให้กับวงจร
2. วงจรนับแบบซิงโครนัส (Synchronous) คือ การทำงานของวงจรทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมกัน และพร้อมกับสัญญาณความถี่ที่ป้อนให้กับวงจร(สังเกตขาที่รับสัญญาณมาจากวงจรให้กำเนิดสัญญาณความถี่ของฟลิบฟลอปทุกตัวจะต่อร่วมกัน สัญญาณขาออกของฟลิบฟลอปจะเปลี่ยนพร้อมกันทั้งหมดและพร้อมกับสัญญาณความถี่ที่ป้อนให้กับวงจร)

ดังนั้นในการออกแบบวงจรหารความถี่จะเลือกเป็นแบบอะซิงโครนัสดังรูปที่ 6-4 เพราะง่ายกว่า โดยสัญญาณขาออกของฟลิบฟลอปแต่ละตัวจะไม่เปลี่ยนพร้อมกัน โดยฟลิบฟลอปแต่ละตัวจะทำงานเชื่อมต่อกัน จะได้ว่าเมื่อสัญญาณความถี่ป้อนให้กับฟลิบฟลอปตัวแรกฟลิบฟลอปตัวที่ 2 จะยังไม่ทำงานจนกว่าจะได้รับสัญญาณขาออกของฟลิบฟลอปตัวแรก และจะทำงานไปเรื่อยๆแบบนี้จนถึงฟลิบฟลอปตัวสุดท้าย



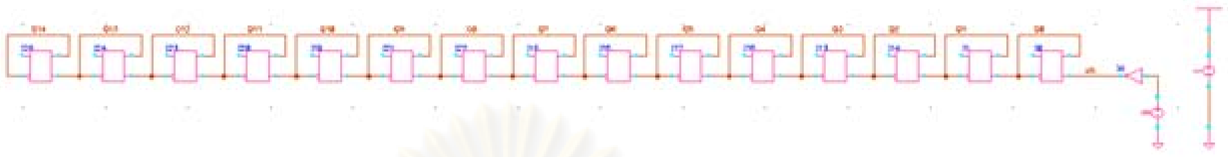
รูปที่ 6-4 วงจรนับแบบอะซิงโครนัส

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของภาคแอนะล็อกในหัวข้อข้างต้นจะให้กำเนิดสัญญาณความถี่เท่ากับ 32.768 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าที่ป้อนให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง โดยจะต้องนำสัญญาณความถี่ที่ได้นี้มาหารให้เหลือ 1 เฮิรตซ์ เพื่อที่จะส่งไปยังวงจรนาฬิกาเวลาจริงต่อไป โดยวงจรหารความถี่ที่เราออกแบบจะเริ่มหารความถี่จาก 32.768 กิโลเฮิรตซ์จนถึง 1 เฮิรตซ์ ดังนั้นจะใช้ฟลิบฟลอปทั้งหมด 15 ตัวซึ่งได้มาจาก 2^{15} เท่ากับ 32768 เฮิรตซ์

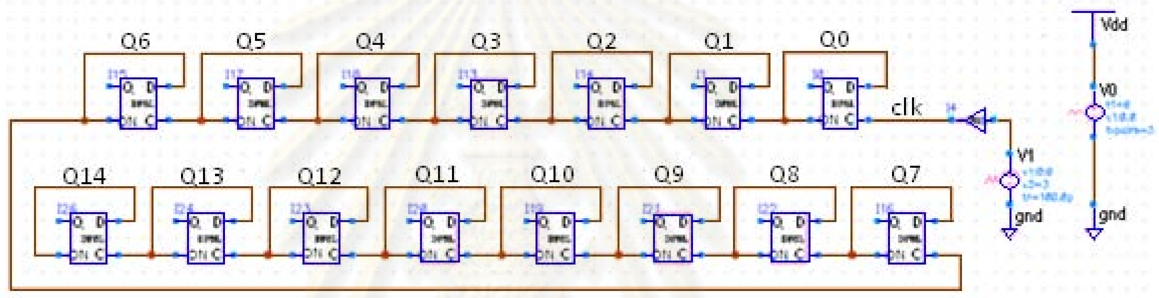
ออกแบบวงจรหารความถี่เพื่อนำมาจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมวาดลายวงจร โดยในการวาดลายวงจรของวงจรหารความถี่ในภาคดิจิทัลจะถูกวาดด้วยโปรแกรมช่วยในการสร้างลายอัตโนมัติ เพื่อที่จะหาค่ากระแสทั้งหมดของวงจรหารความถี่ซึ่งประกอบด้วย ฟลิบฟลอป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

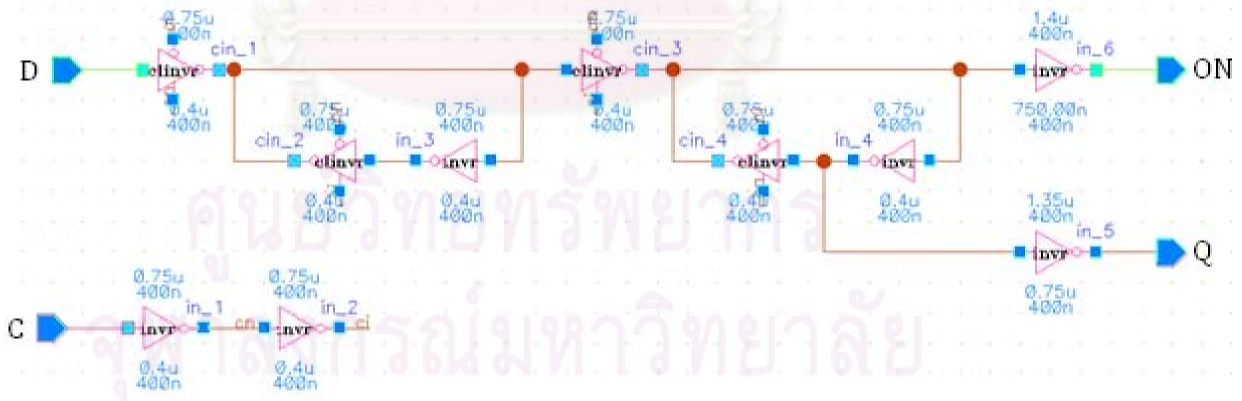
ทั้งหมด 15 ตัวต่อกันแบบอะซิงโครนัส ดังรูปที่ 6-5 การที่ใช้ฟลิบฟลอป 15 ตัวได้มาจากการที่เราออกแบบความถี่เท่ากับ 32768 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรนาฬิกาเวลาจริง โดยมาจาก 2^{15} ซึ่งจะเท่ากับ 32768 เฮิรตซ์ดังนั้นจึงใช้ฟลิบฟลอปทั้งหมด 15 ตัว และรูปที่ 6-6 แสดงวงจรขยายของรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-5 ผังวงจรของวงจรหารความถี่ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโปรแกรมวาดลายวงจร

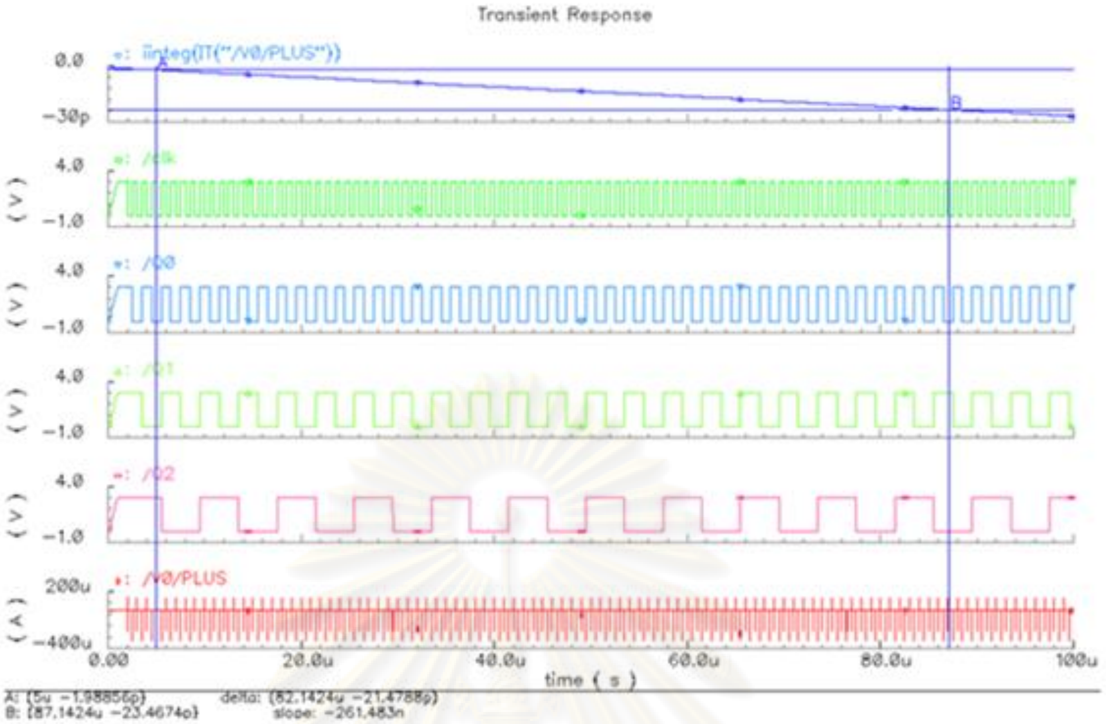


รูปที่ 6-6 วงจรขยายของรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-7 ส่วนประกอบภายในของวงจรฟลิบฟลอป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6-8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรหารความถี่

จากรูปที่ 6-7 ได้แสดงส่วนประกอบภายในของวงจรฟลิบฟลอปโดยจะประกอบด้วยวงจรผกผันเพียงอย่างเดียวซึ่งมีทั้งหมด 10 ตัว และจากรูปที่ 6-8 ได้แสดงผลการจำลองของวงจรหารความถี่ซึ่งจะประกอบด้วย สัญญาณนาฬิกาที่ป้อนให้ฟลิปฟลอปตัวแรก สัญญาณขาออกของฟลิบฟลอปตัวแรก (Q0) สัญญาณขาออกของฟลิบฟลอปตัวที่สอง (Q1) สัญญาณขาออกของฟลิบฟลอปตัวที่สาม (Q2) โดยจากสัญญาณที่ได้จากผลการจำลองจะได้ว่าวงจรจะมีการหารความถี่ไปเรื่อยๆ ตั้งแต่ 1 เท่า 2 เท่า 3 เท่า จนไปถึง 15 เท่า ต่อมาได้แสดงกระแสของแรงดัน V0 ซึ่งจะเห็นว่าจะเปลี่ยนตามสัญญาณนาฬิกาทั้งขอบขาขึ้นและขอบขาลง และนำมาหาค่ากระแสที่ใช้ทั้งหมดโดยจะอินทิเกรต (integrate) ค่ากระแสของแรงดัน V0 โดยจะได้ว่ากราฟอินทิเกรตค่ากระแสที่ได้จะมีค่าความชันเท่ากับ 261.687 นาโนแอมป์ และในการจำลองการทำงานนี้ได้ใส่ค่าสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนให้กับวงจรหารความถี่เท่ากับ 10^{6} เมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของวงจรหารความถี่ได้ดังนี้

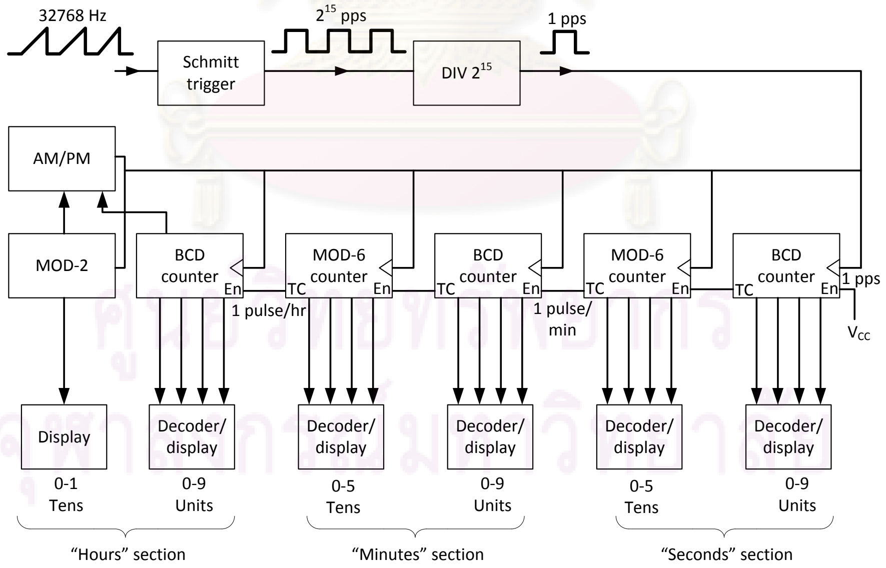
โดยค่าที่คำนวณนี้จะต้องเผื่อด้วยเนื่องจากวงจรหารความถี่จากรูปที่ 6-5 จะถูกวาดด้วยโปรแกรมช่วยในการสร้างลายอัตโนมัติหรือกล่าวได้ว่าใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวาดลายวงจร ดังนั้นการวาดลายวงจรจะเกิดจากสองชั้นคือ ชั้นโลหะ (metal) และชั้นโพลีซิลิกอน (polysilicon)

เลยทำให้ชั้นสองชั้นนี้โดนทับมากเลยทำให้เกิดค่าที่ไม่ต้องการ (parasitic) มาก ดังนั้นในการคำนวณค่ากระแสจึงต้องคิดเผื่อไว้ 3.5 เท่า

∴ วงจรหารความถี่จะกินกระแส = $(261.483 \times 3.5 \times 32768)/10^6 = 29.98896$ นาโนแอมป์

6.1.3 <u>การออกแบบวงจรนับและวงจรถอดรหัส (Counter and Decoder Circuit)</u>

จากรูปที่ 6-5 ซึ่งจะนำสัญญาณที่ได้จากวงจรจุดชนวนของชมิตต์ที่มีความถี่เท่ากับ 32768 Hz มาหารให้เหลือ 1 Hz โดยนำไปป้อนให้กับวงจรนับทุกตัวเพื่อทำให้สัญญาณตรงกันโดยที่วงจรนับจะต่อแบบอนุกรมกัน ส่วนแรกคือส่วนของวินาทีซึ่งเริ่มจากวงจรนับ BCD (BCD Counter) จะถูกนับและแสดงเป็นวินาทีจาก 0 ถึง 9 โดยวงจรนับ BCD จะนับ 1 ครั้งต่อวินาทีและเมื่อนับถึง 9 วงจรนับ BCD จะกระตุ้นที่ขา TC เพื่อให้ขา En ในส่วนของวงจรนับ MOD-6 (MOD-6 counter) ทำงานซึ่งจะส่งผลให้ส่วนของวงจรนับ MOD-6 เริ่มนับ ในขณะเดียวกันวงจรนับ BCD จะเริ่มนับจาก 0 ใหม่ โดยวงจรจะนับแบบนี้ไปเรื่อยๆจนกระทั่งครบ 60 วินาทีและวงจรจะเริ่มนับส่วนของนาทีต่อไปจนถึงชั่วโมงซึ่งจะใช้ AM กับ PM เป็นตัวกำหนดช่วงเวลา โดยจะนำวงจรนับและวงจรถอดรหัส [18] ในแผนภาพที่แสดงดังรูปที่ 6-9 นี้มาใช้ในการเขียนรหัส (Code) VHDL เพื่อสังเคราะห์เป็นวงจรเกตออกมาเพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่าพลังงานอย่างคร่าวๆ ต่อไป



รูปที่ 6-9 แผนภาพของวงจรนาฬิกา

โดย TC คือ Terminal Count และ En คือ Enable

แต่เนื่องจากค่าพลังงานที่คำนวณได้จากโปรแกรม VHDL มีค่ามากเนื่องจากใช้ชิป (Chip) หลายตัวในการคำนวณ ซึ่งมากกว่าที่ใช้ในการออกแบบจริง ทำให้กินพลังงานมากทั้งๆที่ในการใช้จริงกินพลังงานเพียงแค่นิดเดียว ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงละเลยการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าของวงจรนับและวงจรถอดรหัสเพราะถือว่ามีค่าน้อยมาก

6.1.4 การหาค่าพลังงานทั้งหมดของวงจรแอนะล็อกและวงจรดิจิทัล

ในภาคแอนะล็อกจะประกอบด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบ วงจรกำเนิดกระแสที่แปรตามแรงดันขีดเริ่ม และวงจรจุดชนวนของชมิตต์ ซึ่งในหัวข้อที่ 4.2.2 เราได้หาค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบกับวงจรกำเนิดกระแสที่แปรตามแรงดันขีดเริ่มโดยจะได้ค่า ดังนี้

ค่ากำลังไฟฟ้า = 5.08 ไมโครวัตต์

และเมื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าของวงจรจุดชนวนของชมิตต์จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.0705 ถึง 59.9 นาโนวัตต์ ดังนั้นจะหาค่าพลังงานที่มากที่สุดที่ใช้ของวงจรแอนะล็อกได้เท่ากับ 5.14 ไมโครวัตต์

ส่วนในภาคดิจิทัลแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนของวงจรหารความถี่โดยจะทำหน้าที่หารความถี่ 32768 เฮิรตซ์ จนถึง 1 เฮิรตซ์ และส่งสัญญาณต่อไปยังวงจรในส่วนที่สองซึ่งคือ ส่วนของวงจรนาฬิกาเวลาจริงโดยจะประกอบด้วย วงจรนับและวงจรถอดรหัส โดยวงจรนับและวงจรถอดรหัสนี้จะกินพลังงานน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรหารความถี่ ดังนั้นจะละทิ้งในการหาค่าพลังงาน ทำให้หาค่ากระแสที่ใช้ในส่วนของภาคดิจิทัลทั้งหมดได้ไม่เกิน 30 นาโนแอมป์

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบวงจรให้กำเนิดสัญญาณความถี่โดยใช้ซี-มอสเฟต และการนำไปใช้ประยุกต์ใช้ในอนาคตเป็นดังนี้

1. พิจารณาสัญญาณรบกวน (Jitter and Phase Noise) ที่เกิดขึ้นในวงจรที่นำเสนอและหาวิธีแก้ไขสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น
2. แก้ไขวงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวน 3 ภาคแบบมีวงจรขยายผกผันเพื่อให้กินพลังงานไฟฟ้าน้อยลง
3. สามารถพัฒนาได้โดยใช้วงจรดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) มาต่อแทนวงจรผกผัน

รายการอ้างอิง

[1] Ying-Wen Bai, and Hsiao-Chung Chen. An Adjustable Design For The Real Time Clock of High-End Server Systems, In IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering, 4-7 May 2008.

[2] Yusuke Tokunaga, Shiro Sakiyama, Akinori Matsumoto, and Shiro Dosho. An On-Chip CMOS Relaxation Oscillator With Voltage Averaging Feedback, In IEEE Journal Of Solid-State Circuits, vol.45, NO.6, June 2010.

[3] Maxim Integrated Products. Silicon Oscillator with Low-Power Frequency Switching [Online]. 2007. Available from: http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX7383.pdf [2007, July]

[4] Leung, K.N., Lo, C.H., Mok, P.K.T., Mai, Y.Y., Leung, W.Y., and Chan, M.J. Temperature-Compensated CMOS Ring Oscillator for Power-Management Circuits, In Electronics Letters, Vol.43, No.15, 19^{th} July 2007.

[5] Xuan Zhang, and Alyssa B. Apsel. A Low-Power, Process-and-Temperature-Compensated Ring Oscillator With Addition-Based Current Source, In IEEE Transactions on circuits and systems, 2010.

[6] Behzad Razavi. Oscillators, In Design of Analog CMOS Integrated Circuits, pp.482-492. Singapore: Mc Graw Hill, 2001.

[7] Behzad Razavi. Basic MOS Device Physics, In Design of Analog CMOS Integrated Circuits, pp.9-33. Singapore: Mc Graw Hill, 2001.

[8] R. Jacob Baker. The MOSFET, In CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation, PP.83-103. New York: A John Wiley & Sons, INC., 1997.

[9] สิทธิชัย โภไคยอุดม, วงจรป้อนกลับแบบลบและออสซิลเลเตอร์, กรุงเทพ: ฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2537.

[10] ธนันต์ ศรีสกุล, ภมร ศิลาพันธ์ และ รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์. วงจรกรองความถี่และการออกแบบวงจรกรองความถี่ [ออนไลน์], 2537. แหล่งที่มา: http://www.te.kmutnb.ac.th/~msn/bsflf351.pdf [2537, พฤศจิกายน]

[11] Hui Zhou, Charles Nicholls, Thomas Kunz, and Howard Schwartz, Frequency Accuracy & Stability Dependencies of Crystal Oscillators, In System and Computer Engineering, November 2008.

[12] Prapto Nugroho, and Ekachai Leelarasmee. Analysis and design of a 3-stage CMOS Current Controlled Ring Oscillator. Master's thesis, Department of Electrical Engineering Chulalongkorn University, 2006.

[13] Franco Fiori, and Paolo Stefano Crovetti, A New Compact Temperature-Compensated CMOS Current Reference, In IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol 52, NO.11, November 2005.

[14] Alan Hastings. MOS Transistor Matching, In The Art of Analog Layout, pp.426-442. America: Prentice-Hall Upper Saddle River, 2001.

[15] Toshio Tobita, and Hayato Takasago, New Trimming Technology of a hick Film Resistor by the Pulse Voltage Method, In IEEE Transactions on Components, vol.14, NO 3, September 1991.

[16] Filanovsky, I.M., and Baltes, H. CMOS Schmitt Trigger Design, In IEEE Transactions Circuits Systems, pp.46-49. vol.41, no.1, 1994.

[17] ผศ.ดร.วิชัย ประเสริฐเจริญสุข, ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์, ขอนแก่น: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2006.

[18] Ronald, J., Tocci Neal, S., Widmer Gregory L, and Moss. Counters and Registers, In Digital Systems Principles and Applications, PP.360-486. America: Pearson Education, 2006.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์
ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐนิช เกียรติมณีรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ ๑๗ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๓๐ ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตเกียรตินิยมอันดับสองจากภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ กำลังและสื่อสาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา ๒๕๕๑ ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์เชิงเลข ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา ๒๕๕๒ และได้รับการตีพิมพ์บทความชื่อ วงจรออสซิลเลเตอร์รูปสามเหลี่ยมแบบวงแหวนที่มีความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน ในวารสารชื่อ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓ ฉบับที่ ๒ พุทธศักราช ๒๕๕๓ หน้า ๑๐๔๑-๑๐๔๔

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย