

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นชนิดเที่ยงตรงในรูปแบบวงจรรวมซีมอส

Fully Integrable Precision CMOS Full-Wave Rectifier

ปณณวิชญ์ ภัทร์สรณ์ศิริ มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นทำงานที่ความถี่สูงและความเที่ยงตรงสูงโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส วงจรประกอบไปด้วย วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส วงจรเรียงกระแสความถี่สูงและวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน โดยที่สัญญาณแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจรจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณกระแสสองสัญญาณที่สมมาตรกันด้วยวงจรทรานส์คอนดักแตนซ์แบบเอทไฟฟท์ สัญญาณกระแสทั้งสองจะถูกเรียงกระแสด้วยไดโอดที่ได้จากรอยต่อในโครงสร้างแบบซีมอส สัญญาณกระแสที่ผ่านการเรียงกระแสจะถูกนำมารวมกันและกลายเป็นแรงดันด้วยตัวต้านทานแบบมอส วงจรที่นำเสนอเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม เมื่อวงจรที่นำเสนอถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้เทคโนโลยีซีมอส $0.5\ \mu\text{m}$ สามารถแสดงได้ว่าวงจรที่นำเสนอสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดีและมีความเที่ยงตรง

คำสำคัญ : วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น วงจรโหมคกระแส วงจรทรานส์คอนดักแตนซ์แอมพลิไฟเออร์

Abstract

This paper presents a new high frequency and high precision full-wave rectifier, which is very suitable for CMOS technology implementation. The circuit comprises a voltage to current converter, precision full-wave rectifiers and a current to voltage converter. An input voltage signal is converted into two symmetrical current signals by using a dual-output operational transconductance amplifier. Two current signals will be rectified by using junction diodes and convert into output voltage by using a grounded MOS resistor. Simulated rectifier results based on a $0.5\mu\text{m}$ CMOS technology demonstrates very high operating frequency and very precise rectification.

Key words : full-wave rectifier, current-mode circuit, operational transconductance amplifier

1. บทนำ

วงจรเรียงกระแสแบบเที่ยงตรงเป็นวงจรที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ในเครื่องมือวัดไฟฟ้ากระแสสลับ ยกตัวอย่างเช่น เป็นตัวตรวจจับสนามสัญญาณ สร้างสัญญาณกำลังสองของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ประยุกต์ใช้ในแปลงการสัญญาณ RMS เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสแบบเที่ยงตรงเป็นวงจร

ที่ออกแบบเพื่อเรียงกระแสสัญญาณที่มีขนาดเล็กซึ่งไดโอดไม่สามารถทำงานได้ เช่น สัญญาณที่มีขนาดเล็กกว่าค่าแรงดันเทอร์สโวลต์ของไดโอดเพราะไดโอดจะทำงานได้ต้องมีแรงดันตกคร่อมตัวมัน 0.3 โวลต์สำหรับชนิดเยอรมาเนียมและตกคร่อม 0.6 โวลต์สำหรับชนิดซิลิคอน ดังนั้นที่ผ่านมามีวงจรเรียงกระแสที่สามารถเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็กได้เผยแพร่ไว้ในวารสาร

ต่างๆ มากมาย [1]-[13] วงจรเรียงกระแสประกอบด้วย ออปแอมป์ ไดโอดและตัวต้านทานได้ถูกนำเสนอไว้ใน [1]-[5] แต่ปัญหาสำคัญของวงจรเรียงกระแสที่ใช้ ออปแอมป์และไดโอดคือระหว่างช่วงหยุดนำกระแสและนำกระแสของไดโอด ออปแอมป์จะถูกจำกัดจากสัญญาณขนาดเล็ก dv/dt ผลก็จะเกิดความเพี้ยนที่บริเวณ zero crossing ของสัญญาณอินพุต [6] นอกจากนี้วงจรเรียงกระแสที่ใช้ ออปแอมป์ไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ เนื่องจากถูกจำกัดจากค่า GBW ในตัวออปแอมป์เอง ยิ่งไปกว่านั้นวงจรเรียงกระแสที่ใช้ ออปแอมป์และตัวต้านทานไม่เหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม วงจรสายพานกระแสเป็นวงจรที่มีคุณสมบัติมีค่าอัตราการสลับสูงและมีแบนด์วิดท์กว้างเมื่อเปรียบเทียบกับออปแอมป์ ดังนั้นจึงทำให้วงจรสายพานกระแสได้รับความนิยมสำหรับวงจรรวมสมัยใหม่ ที่ผ่านมาวงจรสายพานกระแสได้ถูกนำมาสร้างวงจรเรียงกระแสดังนี้ วงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดตัวต้านทานและวงจรสายพานกระแสได้ถูกนำเสนอใน [6]-[8] แต่ข้อเสียของวงจรเหล่านี้คือจะใช้ตัวต้านทานแบบลอยตัวและวงจรสายพานกระแสถึงสองวงจรจึงทำให้ไม่ค่อยเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม วงจรเรียงกระแสด้วยเทคโนโลยีซีมอสทำงานในคลาส AB ได้ถูกนำเสนอใน [9]-[11] เนื่องจากวงจรสร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ดังนั้นสัญญาณกระแสอินพุตจะต้องมีขนาดใหญ่กว่ากระแสไบอัสที่เท่าเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาคุณสมบัติกำลังสองของมอส วงจรเรียงกระแสที่มีความเที่ยงตรง โดยกำหนดให้วงจรทำงานในคลาส B ถูกนำเสนอใน [12] แต่ข้อจำกัดของวงจรเรียงกระแสที่ทำงานในคลาส B คือทำงานได้ที่ความถี่ไม่สูง

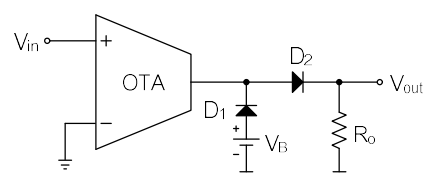
วงจรออปเปอเรชันแนลทรานส์คอนดักแตนซ์แอมพลิไฟเลอร์หรือเรียกย่อๆ ว่า “โอทีเอ” คือวงจรที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานในการสร้างบล็อกวงจรอนาล็อก ระบบที่ใช้วงจรโอทีเอเป็นอุปกรณ์พื้นฐานจะสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และไม่ต้องการตัวต้านทาน ด้วยเหตุนี้วงจรต่างๆ ที่สร้างจากวงจรโอทีเอจึงเหมาะสำหรับการนำไปสร้างวงจรรวมรูปที่ 1 แสดงวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นโดยใช้วงจรโอทีเอ

[13] วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นโดยใช้วงจรโอทีเอเอาต์พุตได้ถูกนำเสนอใน [14] วงจรสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 200MHz

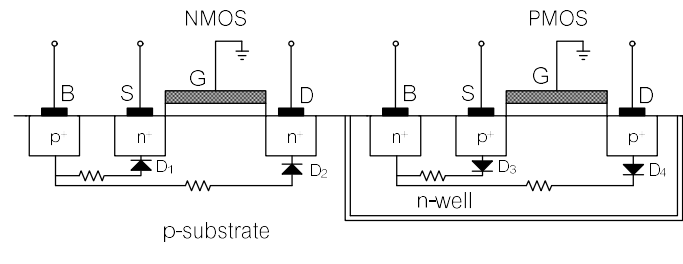
บทความนำเสนอวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบเที่ยงตรงที่ทำงานที่ความถี่สูงด้วยเทคโนโลยีซีมอสโดยพัฒนาต่อจากวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอใน [15] โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอจะใช้วงจรโอทีเอแบบเอาต์พุตหนึ่งวงจร ไดโอดแฟงที่ได้จากโครงสร้างซีมอสและตัวต้านทานแบบมอสหนึ่งตัว ดังนั้นจึงเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมมากกว่าวงจรที่เคยนำเสนอมา วงจรที่นำเสนอมีความเที่ยงตรง จากการจำลองการทำงานวงจรสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงถึง 300MHz

2. วงจรที่นำเสนอ

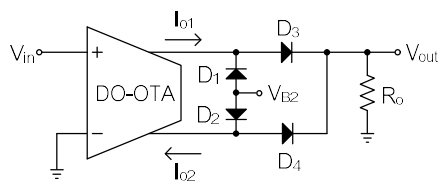
รูปที่ 2 แสดงภาพหน้าตัดของทรานซิสเตอร์ NMOS และ PMOS ที่สร้างบนฐานรองชนิด p (p-substrate) ของเทคโนโลยีซีมอส ดังนั้น PMOS จึงถูกสร้างอยู่บนบ่อของ n-well จากรูปที่ 2 ไดโอด D_1 และ D_2 เป็นไดโอดรอยต่อระหว่าง p-substrate และ n+-diffusion ส่วนไดโอด D_3 และ D_4 เป็นไดโอดของรอยต่อระหว่าง n-well และ p+-diffusion ไดโอด D_1 ถึง D_4 นี้จะถูกใช้เป็นตัวเรียงกระแสแบบความเที่ยงตรง วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่นำเสนอจะพัฒนามาจากวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่แสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นโครงสร้างวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสจากรูปที่ 3 วงจรประกอบด้วยวงจรโอทีเอเอาต์พุตซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันเป็นกระแส ไดโอดทั้งสองตัวจะเรียงกระแสสัญญาณจากเอาต์พุตของวงจรโอทีเอและตัวต้านทานจะแปลงกระแสเป็นแรงดันเอาต์พุต แรงดัน V_{B2} มีค่าประมาณเท่ากับแรงดันเทอร์สโวลต์ของ D_1 และ D_2 รวมกันเพื่อให้ D_1 และ D_2 นำกระแสตลอดเวลา [6]



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น



รูปที่ 2 ภาพหน้าตัดของทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS และ PMOS บนฐานรองชนิด p



รูปที่ 3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น

รูปที่ 4 แสดงวงจรเรียงกระแสที่สมมาตรที่มีคุณสมบัติการทำงานที่เหมือนกับวงจรในรูปที่ 3 จากรูปที่ 4 วงจรโอทีเอประกอบด้วย M_1 ถึง M_{20} และกระแสไบอัส I_{BIAS} ที่ทำงานเป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส โดยกระแสเอาต์พุตของวงจรโอทีเอสามารถกำหนดได้คือ

$$I_{o1} = -I_{o2} = g_m V_{in} \quad (1)$$

โดยที่ I_{o1} และ I_{o2} คือกระแสเอาต์พุต V_1 และ V_2 คืออินพุตและ g_m คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจรโอทีเอ สมมุติว่า M_1 และ M_2 ทำงานในช่วงอิมิต์และมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m สามารถกำหนดได้คือ

$$g_m = \sqrt{(\mu C_{ox} W/L) I_{abc}} \quad (2)$$

โดยที่ μ คือค่าสภาพคล่องตัวของพาหะ C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าของเกตต่อหน่วยพื้นที่ W และ L คือค่าความกว้างและความยาวของมอสทรานซิสเตอร์ตามลำดับ I_{o1} และ I_{o2} คือกระแสเอาต์พุต ไดโอด D_1 ถึง D_4 ตามลำดับในรูปที่ 3 จะถูกแทนด้วยไดโอดในรูปที่ 2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อมีสัญญาณอินพุตซิกเวกบ้อนเข้ามา D_2 และ D_3 จะนำกระแสส่วน D_1 และ D_4 จะหยุดนำกระแส กระแสเอาต์พุต I_{o1} จะไหลผ่าน D_3 และ ตัวต้านทาน R_o ผลที่ได้คือแรงดันซิกเวกบ้อนที่เอาต์พุต V_{out} ในขณะที่เอาต์พุต

I_{o2} จะไหลผ่าน D_2 ลงกราวด์ ต่อมาเมื่อสัญญาณซิกเวกบ้อนไหลเข้ามา D_1 และ D_4 จะนำกระแสส่วน D_3 และ D_2 จะหยุดนำกระแส กระแส I_{o2} จะไหลผ่าน D_4 และตัวต้านทาน R_o และกลายเป็นสัญญาณซิกเวกบ้อนที่สองปรากฏทางเอาต์พุต V_{out} ส่วนกระแส I_{o1} จะไหลผ่าน D_1 ลงกราวด์ จากการทำงานดังกล่าวความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและเอาต์พุตสามารถเขียนดังนี้

$$\begin{aligned} V_{in} > 0: I_{o1} &= +g_m V_{in} \\ V_{in} < 0: I_{o2} &= -g_m V_{in} \end{aligned} \quad (3)$$

ถ้ากำหนดให้ $R_o = 1/g_m$ ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและเอาต์พุตสามารถเขียนได้คือ

$$\begin{aligned} V_{in} > 0: V_{out} &= +V_{in} \\ V_{in} < 0: V_{out} &= -V_{in} \end{aligned} \quad (4)$$

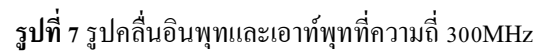
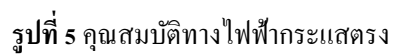
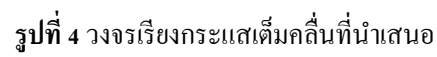
ตัวต้านทาน R_o สามารถสร้างขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์สองตัว สมมุติว่า MR_1 และ MR_2 ทำงานในช่วงอิมิต์และมีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกประการ ค่าความต้านทาน R_o สามารถกำหนดได้คือ [16]

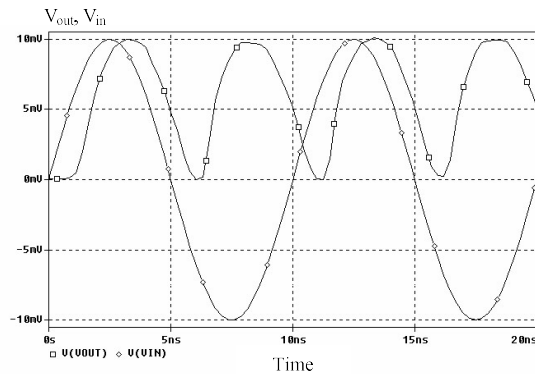
$$R_o = \frac{1}{2K(V_{DD} - V_{TH})} \quad (5)$$

โดยที่ $K = \mu_0 C_{ox} (W/L)$ V_{TH} คือค่าแรงดันเทรชโฮล V_{DD} คือแหล่งจ่ายแรงดัน ($V_{DD} = |V_{SS}|$) ดังนั้นสามารถแสดงได้ว่าวงจรที่นำเสนอสามารถสร้างได้ด้วยมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมดซึ่งเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมอย่างอื่น

3. ผลการทดลอง

วงจรเรียงกระแสในรูปที่ 4 จะถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้เทคโนโลยีซีมอสขนาด $0.5 \mu m$ ของ MEITEC แสดงดังตารางที่ 1





รูปที่ 9 รูปคลื่นอินพุตและเอาต์พุตที่ขนาด 10mV_{peak}

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ 0.5μm ของ MIETECT

.MODEL NMOS LEVEL=3 UO=460.5 TOX=1.0E-8 TPG=1 VTO=0.62 JS=1.08E-6 XJ=0.15U RS=417 RSH=2.73 LD=0.04U VMAX=130E3 NSUB=1.71E17 PB=0.761 ETA=0.00 THETA=0.129 PHI=0.905 GAMMA=0.69 KAPPA=0.10 CJ=76.4E-5 MJ=0.357 CJSW=5.68E-10 MJSW=0.302 CGSO=1.38E-10 CGDO=1.38E-10 CGBO=3.45E-10 KF=3.07E-28 AF=1 WD=0.11U DELTA=0.42 NFS=1.2E11
.MODEL PMOS LEVEL=3 UO=100 TOX=1.0E-8 TPG=1 VTO=-0.58 JS=0.38E-6 XJ=0.10U RS=886 RSH=1.81 LD=0.03U VMAX=113E3 NSUB=2.08E17 PB=0.911 ETA=0.00 THETA=0.120 PHI=0.905 GAMMA=0.76 KAPPA=2 CJ=85E-5 MJ=0.429 CJSW=4.67E-10 MJSW=0.631 CGSO=1.38E-10 CGDO=1.38E-10 CGBO=3.45E-10 KF=1.08E-29 AF=1 WD=0.14U DELTA=0.81 NFS=0.52E11

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบวงจรที่นำเสนอและวงจรในวารสาร

พารามิเตอร์	วงจรที่นำเสนอ	วงจรใน [12]	วงจรใน [14]
อุปกรณ์	มอส 24 ตัว	มอส 44 ตัว	มอส 26 ตัว
ส่วนประกอบ	แหล่งจ่าย กระแส 1 แหล่ง	แหล่งจ่าย กระแส 4 แหล่ง	แหล่งจ่าย กระแส 1 แหล่ง
แหล่งจ่ายแรงดัน	±5V	±1.2V	±5V
ช่วงปฏิบัติงาน	-0.5V ถึง 0.5V	-0.2V ถึง 0.2V	-0.5V ถึง 0.5V
ช่วงความถี่ปฏิบัติงาน	300MHz	100MHz	200MHz
เหมาะกับการสร้าง IC	ใช่	ใช่	ใช่

กำหนดแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{DD}=|V_{SS}|=5V$ แหล่งจ่ายกระแส I_{BIAS} เท่ากับ 500 μA ส่วนแรงดันคงที่ V_{B1} และ V_{B2} มีค่าเท่ากับ 2 โวลต์ และ 0.9 โวลต์ ตามลำดับ สำหรับทรานซิสเตอร์ M_1 ถึง M_{10} มีค่า W/L เท่ากับ 25 $\mu m/1 \mu m$ M_{11} ถึง M_{20} มีค่า W/L เท่ากับ 40 $\mu m/1 \mu m$ MR_1 และ MR_2 มีค่า W/L เท่ากับ 1 $\mu m/1 \mu m$ ส่วน MD_1 และ MD_2 มีค่า W/L เท่ากับ 0.6 $\mu m/0.6 \mu m$ คุณสมบัติทางไฟฟ้า

กระแสตรงของวงจรที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 5 จากรูปช่วงปฏิบัติงานทางอินพุตมีค่าประมาณ -500mV ถึง 500mV เมื่อทำการป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ขนาด 100mV_{peak} เข้าที่อินพุตของวงจร สัญญาณเอาต์พุตและอินพุตที่มีความถี่ 100MHz และ 300MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จากรูปขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ลดทอนลงไปเป็นผลมาจากอัตราขยายของวงจรเรียงกระแสลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น การลดขนาดทางเอาต์พุตสามารถทำได้สองวิธี วิธีแรกคือเพิ่มค่าความต้านทาน R_0 ให้สูงขึ้นโดยการลดอัตราส่วน W/L ของ MR_1 และ MR_2 ลง วิธีที่สองคือการเพิ่มค่าทรานซิสเตอร์คอนดักแตนซ์ของวงจรโอทีเอดด้วยการเพิ่มกระแสไบอัส I_{BIAS} ต่อมาที่ความถี่ 100 MHz ได้จำลองการทำงานเพื่อทดสอบประสิทธิภาพทางอุณหภูมิของวงจรโดยการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 25 °C ถึง 75 °C ผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 จากผลการจำลองการทำงานสามารถสรุปได้ว่าวงจรสามารถเรียงกระแสได้ดีที่อุณหภูมิสูงถึง 75 °C อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่านี้จะปรากฏสัญญาณ DC เกิดขึ้นมากทางเอาต์พุต เพื่อทดสอบความเที่ยงตรงของวงจร วงจรเรียงกระแสจะถูกจำลองที่ความถี่ 100 MHz อีกครั้งโดยลดขนาดสัญญาณอินพุตลงมาเป็น 10mV_{peak} รูปคลื่นอินพุตและเอาต์พุตของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งสามารถแสดงได้ว่าวงจรที่นำเสนอสามารถเรียงกระแสที่สัญญาณขนาดเล็กถึง 10mV_{peak} ได้สุดท้ายตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอและวงจรที่นำเสนอในวารสารต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบเที่ยงตรงที่ทำงานที่ความถี่สูงโดยใช้เทคโนโลยีซิลิคอนวงจรที่นำเสนอสามารถออกแบบโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรเรียงกระแสที่ได้เคยนำเสนอมาก่อนหน้านี้ วงจรที่นำเสนอจะใช้จำนวนทรานซิสตอร์น้อยกว่าและทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่า เมื่อจำลองการ

ทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $\pm 5V$ และเทคโนโลยีซีมอสขนาด $0.5\mu m$ ของ MIETEC สามารถแสดงได้ว่าช่วงปฏิบัติงานทางอินพุตมีค่า $-500mV$ ถึง $500mV$ และทำงานได้ที่ความถี่สูงถึง $300MHz$ ซึ่งสูงกว่าวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอใน [15]

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. E. Allen, D. R. Holberg, CMOS Analog circuit design, Holt Rinehart and Winston, Inc., 1987.
- [2] Z. Wang, "Full-wave precision rectification that is performed in current domain and very suitable for CMOS implementation," IEEE Transactions on Circuit and Systems-I, vol. 39, pp. 456–462, 1992.
- [3] S. J. G. Gift, "A high-performance full-wave rectifier circuit," International Journal of Electronics, vol. 89, pp. 467–476, 2000.
- [4] P. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, R. G. Meyer, Analysis and design of analog integrated circuit, John Wiley & Sons, 2001.
- [5] S. J. G. Gift, "Versatile precision full-wave rectifiers for instrumentation and measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 56, pp. 1703–1709, 2007.
- [6] C. Toumazou, F. J. Lidgley, S. Chattong, "High frequency current conveyor precision full-wave rectifier," Electronics Letters, vol. 30, pp. 745–746, 1994.
- [7] A. A. Khan, M. A. El-Ela, M. A. Al-Turaigi, "Current-mode precision rectification," International Journal of Electronics, vol. 79, pp. 853–859, 1995.
- [8] K. Hayatleh, S. Porta, F. J. Lidgley, "Temperature independent current conveyor," Electronics Letters, vol. 30, pp. 2091–2093, 1995.
- [9] J. Ramirez-Angulo, "High frequency low voltage CMOS diode," Electronics Letters, vol. 28, pp. 298–299, 1992.
- [10] V. Surakumponorn, V. Riewruja, "Integrable CMOS sinusoidal frequency doubler and full-wave rectifier," International Journal of Electronics, vol. 73, pp. 627–632, 1992.
- [11] S. J. G. Gift, "New precision rectifier circuits with high accuracy and wide bandwidth," International Journal of Electronics, vol. 73, pp. 627–632, 1992.
- [12] A. Monpapassorn, K. Dejhan, F. Cheevasuvit, "A full-wave rectifier using a current conveyor and current mirrors," International Journal of Electronics, vol. 88, pp. 751–758, 2001.
- [13] E. Sanchez-Sineccio, J. Ramirez-Angulo, B. Linares-Barranco, A. Rodriguez-vazquez, "Operational transconductance amplifier-based nonlinear function syntheses," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 24, pp. 1576–1586, 1989.
- [14] M. Kumngern, K. Dejhan, "High frequency and high precision CMOS full-wave rectifier," International Journal of Electronics, vol. 93, pp. 185–199, 2006.
- [15] มนตรี คำเงิน สุรพันธุ์ สุวรรณไพบูลย์ พิพัฒน์ พรหมมี กอบชัย เดชหาญ "วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นความถี่สูงและเที่ยงตรงสูงด้วยเทคโนโลยีซีมอส," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, หน้า 12-26, 2547.
- [16] Z. Wang, "2-MOSFET transistor with extremely low distortion for output reaching supply voltage," Electronics Letters, vol. 26, pp. 951–952, 1990.