

# วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรงสูง และทำงานที่ความถี่สูง\*

มนตรี คำเงิน<sup>1)</sup> และ กอบชัย เดชหาญ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า  
คุณทหารลาดกระบัง 10520

<sup>2)</sup> รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศสถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

Email: montree\_kumngern@yahoo.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณครึ่งคลื่นแบบ  
บวกและครึ่งคลื่นแบบลบได้ในวงจรเดียว วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยตัวแปลงแรงดันเป็นกระแส วงจร  
เรียงกระแสแบบที่ยังตรงทำงานในคลาส AB ซึ่งช่วยให้วงจรสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดีและตัวแปลง  
กระแสเป็นแรงดันโดยใช้ตัวต้านทาน สัญญาณแรงดันอินพุตจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณกระแสด้วยวงจร  
แปลงแรงดันเป็นกระแส ตัวเรียงกระแสโหมดกระแสแบบครึ่งคลื่นทำงานในคลาส AB จะทำการเรียง  
กระแสเหล่านั้น ผลก็คือจะได้สัญญาณกระแสครึ่งคลื่นแบบบวกและแบบลบ สัญญาณกระแสครึ่งคลื่น  
แบบบวกและแบบลบจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันเอาต์พุตด้วยวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน วงจรที่นำเสนอ  
มีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือสามารถสร้างได้ด้วยมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมด ทำงานได้ที่ความถี่สูง มี  
เสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมากและเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมด้วยเทคโนโลยีซีมอส ผลการ  
จำลองสามารถยืนยันได้โดยใช้โปรแกรม PSPICE เมื่อวงจรที่นำเสนอถูกจำลองการทำงานด้วย  
พารามิเตอร์ซีมอส 0.5 $\mu$ m ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน  $\pm 1.2V$  สามารถแสดงได้ว่าวงจรที่นำเสนอทำงานได้ดีที่  
ความถี่สูงเกินกว่า 250MHz และมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมาก

**คำสำคัญ:** วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น, วงจรสายพานกระแส, วงจรเรียงกระแสคลาส AB, ซีมอส

---

\* รับผิดชอบเมื่อวันที่ 13 ธันวาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2550

# High Frequency and High Precision CMOS Half-Wave Rectifier<sup>\*</sup>

Montree Kumngern<sup>1)</sup> and Kobchai Dejhan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Lecturer, Faculty of Engineering and Research Center for Communication and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang10520

<sup>2)</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering and Research Center for Communication and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang10520

Email: montree\_kumngern@yahoo.com

## ABSTRACT

In this paper, a CMOS precision half-wave rectifier circuit with positive and negative outputs is presented. The proposed circuit composes of a voltage-to-current converter, a precision current-mode rectifier circuit with operating in class-AB to provide the high-frequency capability, and two current-to-voltage converters. A voltage input signal is changed into a current signal by the voltage-to-current converter. The class AB current mode half-wave rectifiers rectify these current signals, resulting in positive and negative half-wave current signals that are converted to positive and negative half-wave voltage signals by the current-to-voltage converters. The circuit exhibits low MOS counts, high frequency operation, good temperature stability, and suitable of IC fabrication. The simulation results are used to verify the performance of the proposed circuit. Simulated rectifier performance with 0.5 $\mu$ m CMOS model using  $\pm 1.2$ V supply voltage shows the proposed half-wave rectifier circuit provides an operating frequency more than 250MHz and excellent temperature stability.

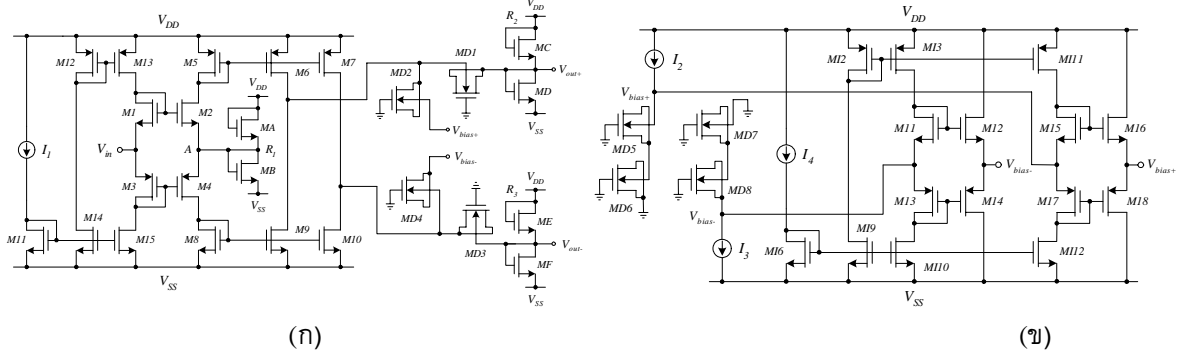
**Keywords :** Half-wave rectifier, Current conveyor, Class AB rectifier, CMOS

---

<sup>\*</sup> Original manuscript submitted: December 13, 2006 and Final manuscript received: February 19, 2007

## บทนำ

วงจรเรียงกระแสแบบเที่ยงตรงเป็นวงจรที่มีความสำคัญที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ใน เครื่องมือวัดไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวดีมอดภาค RF การสร้างสัญญาณกำลังสองของสัญญาณรูปคลื่น สามเหลี่ยม ตัวแปลงสัญญาณ RMS เป็นสัญญาณ DC วงจรเรียงกระแสแบบเที่ยงตรงเป็นวงจรที่ ออกแบบเพื่อสามารถเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็กซึ่งไดโอดไม่สามารถทำงานได้เพราะไดโอดจะ ทำงานได้ต้องมีแรงดันตกคร่อมตัวมัน 0.3V สำหรับชนิดเยอมาเนียมและตกคร่อม 0.6V สำหรับชนิด ซิลิคอน ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีการออกแบบวงจรเรียงกระแสที่สามารถเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็ก เผยแพร่ไว้ในวารสารต่างๆ มากมายดังเอกสารอ้างอิง (Allen *et al.*, 1987), (Ramirez-Angulo, 1992), (Surakumpontorn and Riewruja, 1992), (Wang, 1992), (Toumazou *et al.*, 1994), (Khan *et al.*, 1995), (Chaoui, 1995), (Gift, 2000), (Gray *et al.*, 2001), (Monpapassorn *et al.*, 2001a), (Monpapassorn *et al.*, 2001b), (Riewruja and Guntapong, 2002), (Kumngern and Dejhan 2006) วงจรเรียงกระแสใช้ ออปแอมป์ ไดโอดและตัวต้านทานได้ถูกนำเสนอไว้ใน (Allen *et al.*, 1987), (Wang, 1992), (Gift, 2000), (Gray *et al.*, 2001) แต่ปัญหาสำคัญของวงจรเรียงกระแสที่ใช้ออปแอมป์และไดโอดคือระหว่าง ช่วงหยุดนำกระแสและนำกระแสของไดโอด ออปแอมป์จะต้องคืนตัวด้วยสัญญาณขนาดเล็ก  $dv/dt$  ที่ จำกัด ผลก็คือจะเกิดความเพี้ยนที่บริเวณ zero crossing ของสัญญาณอินพุท นอกจากนี้วงจรเรียงกระแส ที่ใช้ออปแอมป์จะไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้เนื่องจากถูกจำกัดจากค่า G.BW (Gain-bandwidth product) ในตัวออปแอมป์เอง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยออกแบบวงจรเรียงกระแสให้ทำงานในโหมด กระแส (Ramirez-Angulo, 1992), (Toumazou *et al.*, 1994), (Khan *et al.*, 1995), (Monpapassorn *et al.*, 2001a), (Monpapassorn *et al.*, 2001b) วงจรเรียงกระแสทำงานในโหมดกระแสใช้วงจรสายพาน กระแสและไดโอดนำเสนอใน (Toumazou *et al.*, 1994), (Khan *et al.*, 1995) แต่อย่างไรก็ตามวงจร ดังกล่าวใช้ตัวต้านทานทั้งแบบลอยตัวและแบบต่อลงกราวด์ซึ่งทำให้ไม่เหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจร รวม วงจรเรียงกระแสทำงานในโหมดกระแสใช้วงจรสายพานกระแสหนึ่งวงจรและวงจรสะท้อนกระแสได้ ถูกนำเสนอใน (Monpapassorn *et al.*, 2001a) วงจรดังกล่าวออกแบบโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และ กำหนดให้วงจรทำงานในคลาส B ซึ่งทำให้วงจรสามารถเรียงกระแสที่สัญญาณขนาดเล็กได้ดี แต่ เนื่องจากวงจรทำงานในคลาส B จึงทำให้วงจรไม่สามารถเรียงกระแสที่สัญญาณความถี่สูงได้ดี นอกจากนี้วงจรยังต้องการตัวต้านทานแบบต่อลงกราวด์อีกสองตัวอีกด้วย วงจรเรียงกระแสทำงานใน โหมดกระแสทำงานในคลาส AB ได้ถูกนำเสนอไว้ใน (Surakumpontorn and Riewruja, 1992), (Ramirez-Angulo, 1992), (Riewruja and Guntapong, 2002) วงจรเรียงกระแสที่ทำงานในคลาส AB จะต้องการกระแสอินพุทที่ใหญ่กว่ากระแสไบอัสสี่เท่าเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดอันเกิดจากคุณสมบัติ กำลังสองของทรานซิสเตอร์ดังนั้นถ้าสัญญาณอินพุทที่มีขนาดเล็กมากๆ วงจรชนิดนี้จะไม่สามารถเรียง กระแสได้ แต่ข้อดีของวงจรที่ทำงานในคลาส AB คือวงจรเรียงกระแสสามารถทำงานที่สัญญาณความถี่ สูงได้ดีเพราะทรานซิสเตอร์ไม่ต้องหยุดนำกระแสในขณะที่ไม่มีสัญญาณเหมือนคลาส B วงจรเรียงกระแส เต็มคลื่นสร้างด้วยมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมดเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมและทำงานได้ที่ ความถี่สูงถึง 200MHz ได้ถูกนำเสนอไว้ใน (Kumngern and Dejhan, 2006)



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นเอาต์พุตคู่ใน (Monpapassorn et al., 2001b) (ก) วงจรเรียงกระแส (ข) วงจรไบอัสแรงดันแรงดัน

เมื่อเร็ว ๆ นี้วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นเอาต์พุตคู่ได้ถูกนำเสนอไว้ใน (Monpapassorn et al., 2001b) โดยวงจรสร้างขึ้นจากส่วนประกอบสองส่วนคือ ส่วนแรกคือวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่ประกอบด้วยวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสเพื่อเปลี่ยนแรงดันอินพุตให้เป็นกระแสจากนั้นจะใช้ไดโอดเพื่อเรียงกระแสดังกล่าว กระแสที่ผ่านไดโอดจะถูกแปลงเป็นแรงดันด้วยตัวต้านทาน วงจรแสดงได้ดังรูปที่ 1 (ก) ส่วนที่สองคือวงจรไบอัสแรงดัน ไดโอดจะถูกไบอัสด้วยแรงดันเพื่อลดความเพี้ยนที่บริเวณ zero crossing จากวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 1(ข) ข้อดีของวงจรมันที่กล่าวไว้ในบทความโดยผู้เขียนสรุปได้คือ

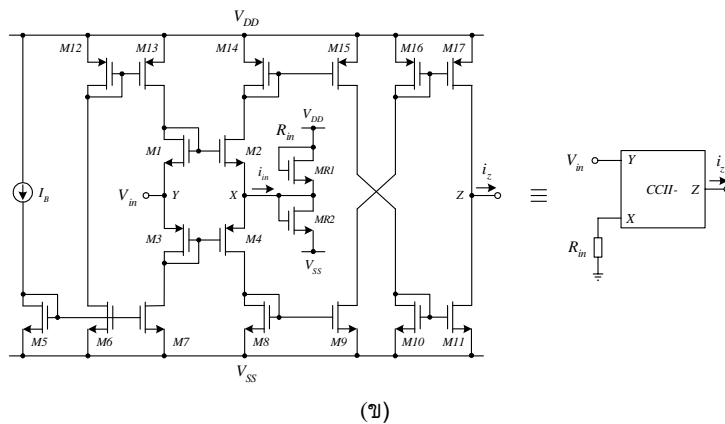
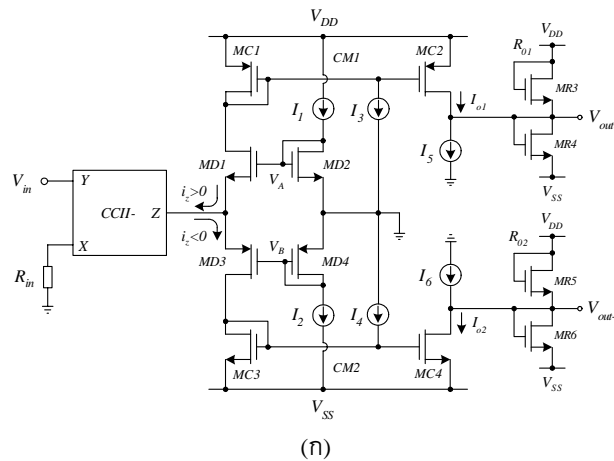
- 1) วงจรเรียงกระแสสร้างได้ด้วยมอสทั้งหมดจึงเหมาะกับการนำมาสร้างเป็นวงจรรวม
- 2) วงจรเรียงกระแสใช้แหล่งจ่าย  $\pm 1.2V$  และทำงานได้ที่ความถี่สูงถึง 100MHz
- 3) วงจรเรียงกระแสมีความเที่ยงตรงและเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมากโดยใช้วงจรไบอัสแรงดันที่แสดงในรูปที่ 1(ข)

ในบทนี้นำเสนอวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่ทำงานที่ความถี่สูง วงจรที่นำเสนอสร้างขึ้นจากวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส วงจรเรียงกระแสแบบเที่ยงตรงและวงจรแปลงกระแสให้เป็นแรงดัน ดังนั้นวงจรที่นำเสนอจึงมีหลักการที่เหมือนกับวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอใน (Monpapassorn et al., 2001b) แต่มีข้อดีที่โดดเด่นกว่าวงจรที่เคยนำเสนอมาก่อนหน้านี้คือ

- 1) วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่นำเสนอใช้มอสทรานซิสเตอร์ 31 ตัว ในขณะที่วงจรที่นำเสนอใน (Monpapassorn et al., 2001b) ใช้มอสทรานซิสเตอร์ 44 ตัว ดังนั้นวงจรที่นำเสนอจึงเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมมากกว่าวงจรที่นำเสนอใน (Monpapassorn et al., 2001b)
- 2) วงจรเรียงกระแสที่นำเสนอใช้แหล่งจ่าย  $\pm 1.2V$  เท่ากับวงจรที่นำเสนอใน (Monpapassorn et al., 2001b) แต่วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่นำเสนอสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่า 250MHz ในขณะที่ (Monpapassorn et al., 2001b) ทำงานได้ที่ 100MHz เมื่อจำลองการทำงานด้วยพารามิเตอร์เดียวกัน ( $0.5\mu m$  CMOS) และยังทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่าใน (Chaoui, 1995)
- 3) วงจรเรียงกระแสที่นำเสนอมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมาก
- 4) วงจรเรียงกระแสที่นำเสนอมีความไวต่อสัญญาณอินพุต

### วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่นำเสนอ

วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่นำเสนอสร้างจากมอสทรานซิสเตอร์มีส่วนประกอบสามส่วนด้วยกัน คือวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส วงจรเรียงกระแสแบบโหมตกระแสทำงานในคลาส AB และตัวแปลงกระแสเป็นแรงดัน วงจรที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 2 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสประกอบด้วยวงจรสายพานกระแสแบบลบ (CCII-) ที่สร้างจาก M1 ถึง M17 และตัวต้านทาน  $R_{in}$  ที่สร้างจาก MR1 และ MR2 วงจรเรียงกระแสแบบเที่ยงตรงใช้มอสไดโอด MD1 ถึง MD4 วงจรสะท้อนกระแส MC1 และ MC2 และแหล่งจ่ายกระแส  $I_1$  ถึง  $I_6$  ส่วนตัวแปลงกระแสเป็นแรงดันใช้ตัวต้านทาน  $R_{O1}$  (MR3 และ MR4) และตัวต้านทาน  $R_{O2}$  (MR5 และ MR6) การทำงานของวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นมีดังนี้ เมื่อแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ถูกป้อนเข้ามา แรงดันอินพุตจะถูกแปลงเป็นกระแส  $i_z$  ด้วย CCII- และตัวต้านทาน  $R_{in}$  สำหรับตัวต้านทานแบบต่อลงกราวด์สามารถสร้างได้ด้วยมอสทรานซิสเตอร์สองตัวที่มีคุณสมบัติเหมือนกันซึ่งกล่าวไว้ใน (Wang, 1998) จากวงจรรูปที่ 2 สมมุติว่า MR1 และ MR2 ทำงานในช่วงอิมิตัวและมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ค่าความต้านทานสามารถกำหนดได้คือ (Wang, 1998)



รูปที่ 2 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น (ก) วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นสองเอาต์พุตที่นำเสนอ (ข) วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

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

เมื่อ  $K = \mu_0 C_{OX}(W/L)$   $V_{TH}$  = ค่าแรงดันวิกฤต  $V_{DD}$  และ  $V_{SS}$  = แหล่งจ่ายแรงดัน  $\mu_0$  = ค่าสภาพคล่องของพื้นผิวแชนแนล  $C_{OX}$  = ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดต่อหน่วยพื้นที่  $W$  และ  $L$  คือค่าความกว้างและความยาวของแชนแนล จากคุณสมบัติของวงจร CCII กระแส  $i_z$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$i_z = \frac{V_{in}}{R_{in}} \quad (2)$$

มอสไดโอด MD2 และกระแส  $I_1$  จะสร้างแรงดัน  $V_A$  มอสไดโอด MD4 และกระแส  $I_2$  จะสร้างแรงดัน  $V_B$  เพื่อไบอัสให้กับมอสไดโอด MD1 และ MD3 ตามลำดับ แรงดันคงที่  $V_A$  และ  $V_B$  ควรจะมีค่าเท่ากับแรงดันวิกฤตของมอสไดโอด MD1 และ MD3 เพื่อให้วงจรเรียงกระแสมีความเที่ยงตรงและทำงานในคลาส AB วงจรสะท้อนกระแส CM1 และ CM2 จะถูกไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกระแส  $I_3$  และ  $I_4$  ตามลำดับ เพื่อให้วงจรสะท้อนกระแสทำงานตลอดเวลาซึ่งจะช่วยทำให้วงจรทำงานที่ความถี่สูงดีขึ้นและทำให้ระบบมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้นด้วย เมื่อ  $i_z > 0$  กระแสนี้จะถูกป้อนผ่าน MD1 และถูกสะท้อนโดย CM1 เป็นกระแสเอาต์พุตของ CM1 คือ  $I_{o1} (+i_z)$  ต่อมาเมื่อ  $i_z < 0$  กระแสนี้จะถูกป้อนผ่าน MD3 และถูกสะท้อนโดย CM2 เป็นกระแสเอาต์พุตของ CM2 คือ  $I_{o2} (+i_z)$  ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุต  $i_z$  และกระแส  $I_{o1}$  และกระแส  $I_{o2}$  สามารถแสดงได้คือ

$$i_z > 0; I_{o1} = +i_z + I_5 \quad (3)$$

$$i_z < 0; I_{o2} = +i_z + I_6 \quad (4)$$

เมื่อแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_5$  และ  $I_6$  ชดเชยกระแสคงที่  $I_3+I_1$  และ  $I_4+I_2$  ตามลำดับ ดังนั้นสมการที่ (3) และ (4) สามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$i_z > 0; I_{o1} = +i_z \quad (5)$$

$$i_z < 0; I_{o2} = +i_z \quad (6)$$

เมื่อใช้สมการที่ (2) และกำหนดให้  $R_{o1}=R_{o2}=R_{in}$  ดังนั้นจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{in}$  และ  $V_{out+}$  ได้คือ

$$V_{in} > 0; V_{out+} = V_{in} \quad (7)$$

$$V_{in} < 0; V_{out+} = 0 \quad (8)$$

และความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{in}$  และ  $V_{out-}$  คือ

$$V_{in} > 0; V_{out-} = 0 \tag{9}$$

$$V_{in} < 0; V_{out-} = V_{in} \tag{10}$$

จากสมการที่ (7) ถึง (10) แสดงได้ว่าวงจรที่นำเสนอนี้สามารถให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณครึ่งคลื่นแบบบวกและสัญญาณครึ่งคลื่นแบบลบได้ในวงจรเดียวกัน

### คุณสมบัติวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอ

ที่ผ่านมาการสร้างวงจรสมมุติว่าวงจร CCII- และวงจรสะท้อนกระแสมีคุณสมบัติเป็นอุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะมีค่าที่ไม่เป็นอุดมคติรวมอยู่ในวงจร CCII- และวงจรสะท้อนกระแสด้วยเสมอ ถ้า  $\epsilon_v$  และ  $\epsilon_i$  ( $|\epsilon_v| \ll 1$  และ  $|\epsilon_i| \ll 1$ ) แสดงค่าแรงดันและกระแส Tracking errors ของวงจรสายพานกระแสตามลำดับ ดังนั้นคุณสมบัติของขั้วต่างๆ ของวงจรสายพานกระแสเมื่อรวมค่าที่ไม่เป็นอุดมคติไว้จะสามารถกำหนดความสัมพันธ์ได้คือ  $V_X = \beta V_Y$   $I_Z = -\alpha I_X$  และ  $I_Y = 0$  เมื่อ  $\beta = 1 - \epsilon_v$  และ  $\alpha = 1 - \epsilon_i$  เมื่อ  $V_X$   $V_Y$  และ  $V_Z$  คือแรงดันที่ขั้ว X Y และ Z ตามลำดับ ส่วน  $I_X$   $I_Y$  และ  $I_Z$  คือกระแสที่ขั้ว X Y และ Z ตามลำดับ ดังนั้นกระแส  $i_z$  ของสมการที่ (1) สามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$i_z = \frac{\alpha \beta V_{in}}{R_{in} + r_X} \tag{11}$$

เมื่อ  $r_X$  คือความต้านทานแฝงเมื่อมองจากขั้ว X ของวงจรสายพานกระแส ถ้ามอสทรานซิสเตอร์ MC1 และ MC2 (CM1) และ MC3 และ MC4 (CM2) ถูกสมมุติว่าชาซอร์ส ต่อกับโครงสร้างทั้งหมด ดังนั้นการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์จึงไม่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันวิกฤตอันเนื่องมาจากผลของโครงสร้าง (Body effect) ดังนั้นกระแสเดรนของวงจรสะท้อนกระแสทั้งสองสามารถแสดงได้คือ

$$I_{D(MC2)} = I_{D(MC1)} (1 - \epsilon_{M1}) \tag{12}$$

$$I_{D(MC4)} = I_{D(MC3)} (1 - \epsilon_{M2}) \tag{13}$$

โดยที่

$$\epsilon_{M1} = \lambda \left( \frac{1}{g_{m(MC1)}} - \frac{1}{g_{d(MC2)}} \right) \tag{14}$$

$$\epsilon_{M2} = \lambda \left( \frac{1}{g_{m(MC3)}} - \frac{1}{g_{d(MC4)}} \right) \tag{15}$$

เมื่อ  $\lambda$  คือค่าแฟกเตอร์ Channel-length modulation ส่วนค่า  $g_m$  และ  $g_d$  คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์และค่าความนำที่ชาเดรนของมอสทรานซิสเตอร์ตามลำดับ เมื่อรวมค่าที่ไม่เป็นอุดมคติของวงจรสายพานกระแสและสมการที่ (12) และ (13) อยู่ในการคำนวณด้วย สมการที่ (7) และ (10) จะสามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$V_{in} > 0; V_{out+} = \frac{\alpha\beta V_{in} R_{o1}}{R_{in} + r_x} - 2\varepsilon_M R_{o1} \quad (16)$$

$$V_{in} < 0; V_{out-} = \frac{\alpha\beta V_{in} R_{o2}}{R_{in} + r_x} - 2\varepsilon_M R_{o2} \quad (17)$$

จากสมการที่ (16) และ(17) แสดงได้ว่าค่าที่ไม่เป็นอุดมคติของวงจรรายพานกระแสและวงจระสะท้อนกระแสจะลดทอนขนาดของสัญญาณเอาต์พุต แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มค่าความต้านทานเอาต์พุต  $R_{O1}$  และ  $R_{O2}$

MOS Transistors	W/L( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )
M1-M2, M5-M11, MD1-MD2, MC3-MC4	10/0.6
M3-M4, M12-M17	40/0.6
MD3-MD4, MC1-MC2	30/0.6
MR1-MR2	4/0.6
MR3-MR6	2/0.6

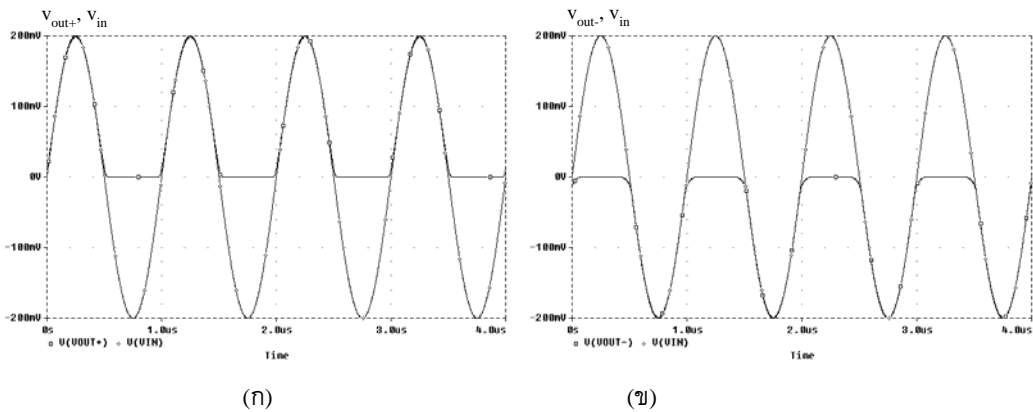
ตารางที่ 1 ค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 2

### ผลการจำลองการทำงาน

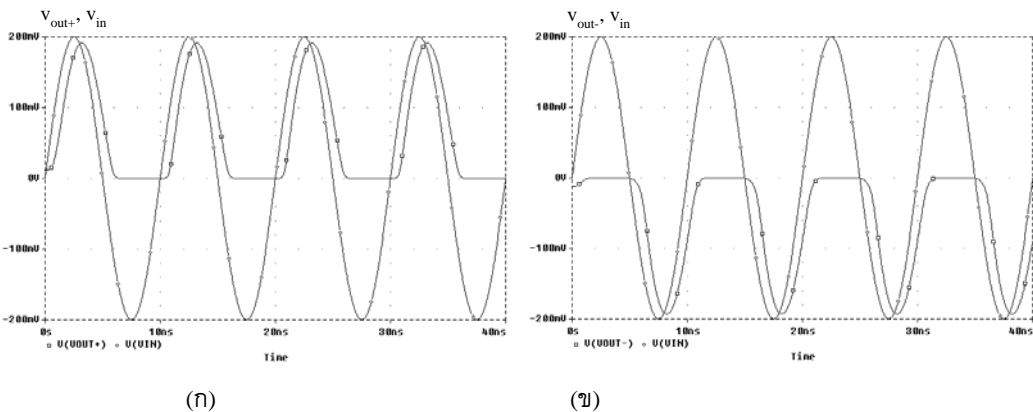
เพื่อทดสอบแนวคิดที่นำเสนอ วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นในรูปที่ 2 จะถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE การจำลองการทำงานใช้พารามิเตอร์  $0.5\mu\text{m}$  ซีมอสของ MIETEC ดังแสดงใน (Monpapassorn *et al.*, 2001b) ค่าอัตราส่วน W/L ของมอสทรานซิสเตอร์แสดงดังตารางที่ 1 ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน  $\pm 1.2$  โวลท์ กระแสไบอัส  $I_B=50\mu\text{A}$   $I_1=I_2=5\mu\text{A}$  และ  $I_3=I_4=100\mu\text{A}$  ค่าความต้านทาน  $R_{O1}$  และ  $R_{O2}$  จะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทาน  $R_{in}$  เพื่อชดเชยค่าความต้านทานภายในของ CCII- ผลการตอบสนองชั่วขณะของวงจรรูปที่ 2 เมื่อป้อนสัญญาณแอมพลิจูด  $200\text{mV}_{\text{peak}}$  ความถี่ 1MHz 100MHz 250MHz และ 500MHz เข้าที่อินพุตแสดงได้ดังรูปที่ 3 ถึง 6 ตามลำดับ รูป (ก) คืออินพุตและเอาต์พุตครึ่งคลื่นบวก  $V_{out+}$  และ (ข) คืออินพุตและเอาต์พุตครึ่งคลื่นลบ  $V_{out-}$  จากผลการจำลองจะเห็นว่าวงจรมองการเรียงกระแสได้ที่มีความถี่สูงถึง 500MHz ซึ่งเป็นไปได้เพราะใช้วงจรเรียงกระแสทำงานในคลาส AB แต่ที่ความถี่สูงแอมพลิจูดจะถูกลดทอนลง การลดทอนขนาดสัญญาณเอาต์พุตมีสาเหตุมาจากค่าอัตราขยายของวงจรเรียงกระแสลดลงเมื่อวงจรมองการที่ความถี่สูง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มค่าความต้านทาน  $R_{O1}$  และ  $R_{O2}$  เมื่อป้อนสัญญาณ AC เข้าที่อินพุตของวงจรรูปที่ 2 แล้ววัดช่วงความถี่ปฏิบัติงาน พบว่าที่ -3dB วัดความถี่ได้ 350MHz ดังนั้นการเรียงกระแสที่ 500MHz จึงเป็นการเรียงกระแสที่มีการลดทอนมากกว่า -3dB ซึ่งจากรูปที่ 6 จะเห็นว่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุต ดังนั้นเมื่อพิจารณาความถี่ที่อยู่ใน -3dB สามารถยืนยันได้ว่าวงจรมองการได้ดีโดยสัญญาณเอาต์พุตมีความเพี้ยนไม่มากที่ความถี่ 250MHz แต่อย่างไรก็ตามความถี่ที่สูงกว่า 250MHz วงจรสามารถทำงานได้แต่อาจจะต้องมีการปรับแต่งสัญญาณด้วยการเพิ่มค่าความต้านทาน  $R_{O1}$  และ  $R_{O2}$  ที่ผ่านมา วิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพทางอุณหภูมิในวงจรเรียงกระแสได้



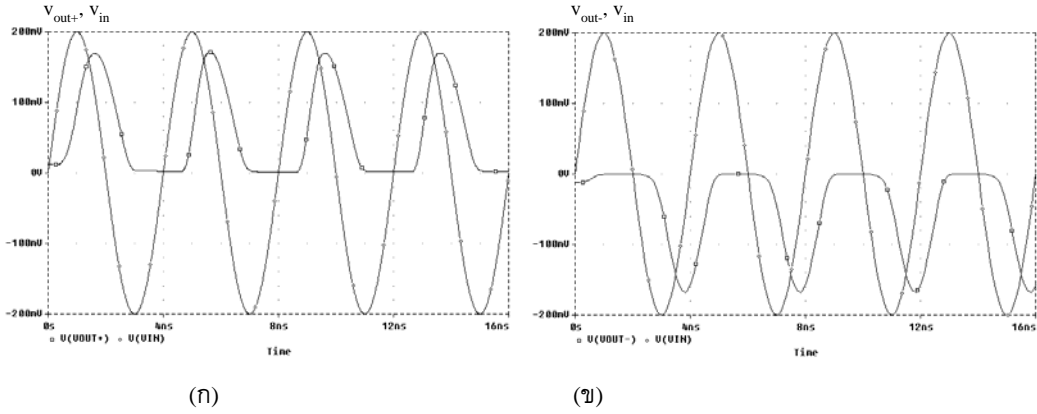
ถูกนำเสนอไว้หลายวิธีการใน (Toumazou *et al.*, 1994) (Wilson and Mannama, 1995) (Stiurca, 1995) (Monpapassorn *et al.*, 2001a) วงจรที่นำเสนอเหล่านั้นจึงมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมาก แต่อย่างไรก็ตามมันคือต้นเหตุของปัญหาบางประการเช่น ลดความเที่ยงตรงเมื่อทำงานที่ความถี่สูง ต้องใช้อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมากและบางวิธีการเหมาะกับอุปกรณ์ไบโพลาร์เท่านั้น สำหรับวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอในบทนี้ไม่ได้ใช้วิธีการใดๆ มาช่วยเพื่อทำให้วงจรมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีขึ้นเพราะต้องการให้วงจรใช้ทรานซิสเตอร์น้อยที่สุด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวงจรทางด้านอุณหภูมิจึงได้จำลองการทำงานวงจรในรูปแบบที่ 2 อีกครั้ง การจำลองกำหนดความถี่อินพุตเท่ากับ 100MHz แอมพลิจูด 200mV<sub>peak</sub> แล้วเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 50°C ถึง 100°C รูปคลื่นเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสที่อุณหภูมิ 50°C 75°C และ 100°C แสดงได้ดังรูปที่ 7 จากรูปจะเห็นว่าวงจรที่นำเสนอมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมาก ขนาดที่ยอดคลื่นของสัญญาณเอาต์พุตไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจาก 50°C ถึง 100°C แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่บริเวณช่วงกลางของแอมพลิจูดดังแสดงในรูปที่ 7(ข)



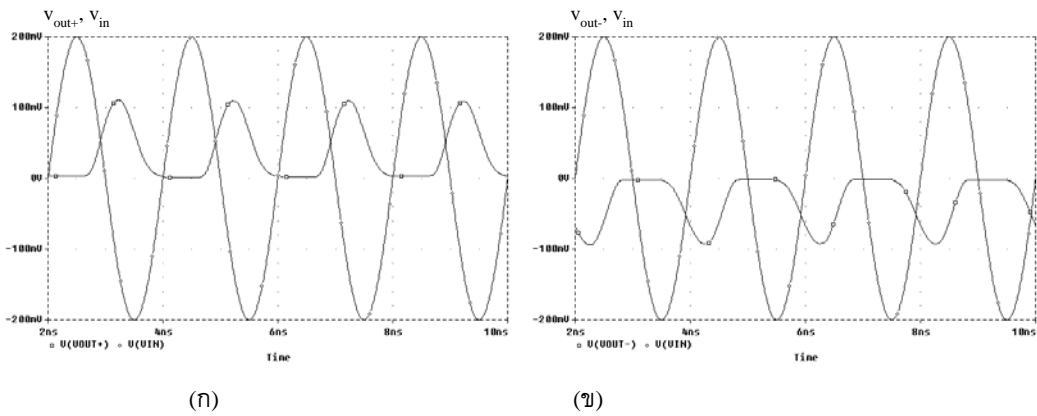
รูปที่ 3 การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่อินพุตความถี่ 1MHz (ก) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นบวก  $V_{out+}$  และ (ข) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นลบ  $V_{out-}$



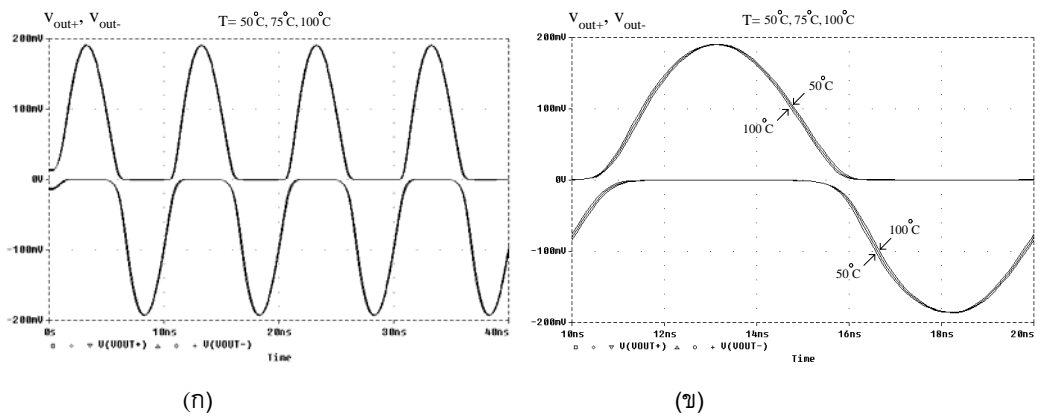
รูปที่ 4 การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่อินพุตความถี่ 100MHz (ก) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นบวก  $V_{out+}$  และ (ข) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นลบ  $V_{out-}$



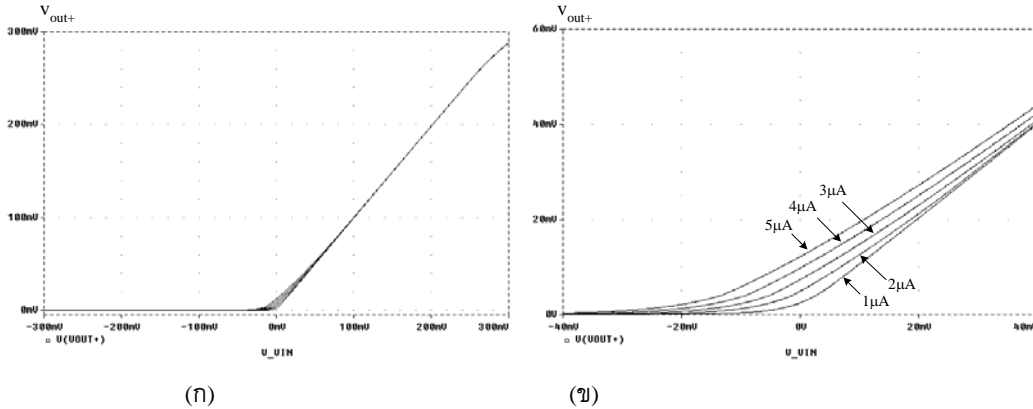
รูปที่ 5 การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่อินพุตความถี่ 250MHz (ก) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นบวก  $V_{out+}$  และ (ข) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นลบ  $V_{out-}$



รูปที่ 6 การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่อินพุตความถี่ 500MHz (ก) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นบวก  $V_{out+}$  และ (ข) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นลบ  $V_{out-}$

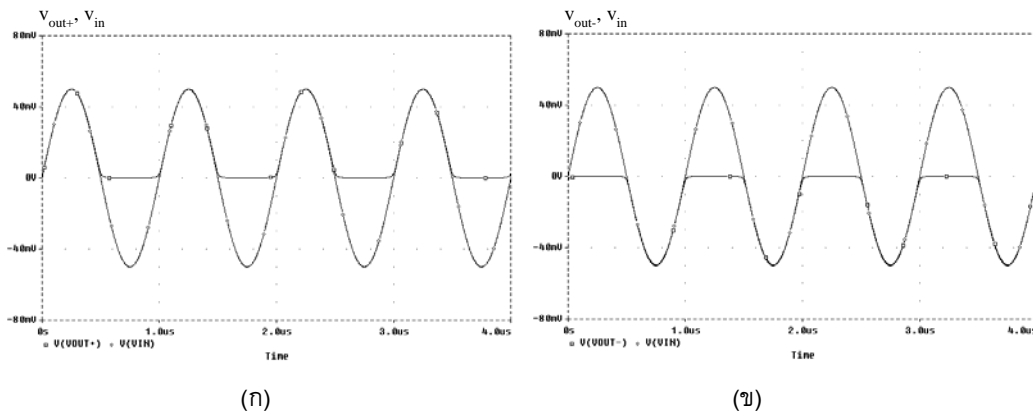


รูปที่ 7 รูปคลื่นเอาต์พุตที่อุณหภูมิต่างๆ ที่สัญญาณอินพุตความถี่ 100MHz (ก) การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเอาต์พุต (ข) ขยายการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเอาต์พุต

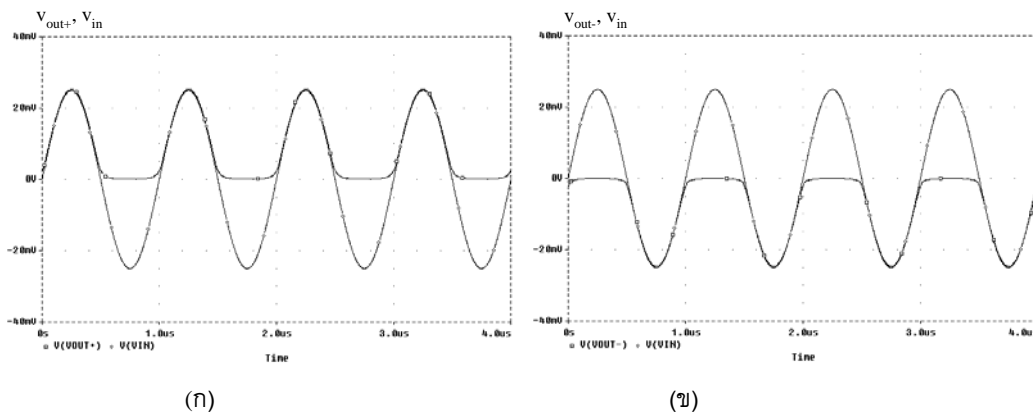


รูปที่ 8 คุณสมบัติทาง DC ของเอาต์พุต  $V_{out+}$  ที่กระแสไบอัส  $I_1 = 1\mu A, 2\mu A, 3\mu A, 4\mu A$  และ  $5\mu A$

(ก) การเปลี่ยนแปลงของช่วง zero-crossing (ข) ขยายช่วง zero-crossing



รูปที่ 9 การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่อินพุตความถี่ 1MHz ขนาด  $50mV_{peak}$  (ก) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นบวก  $V_{out+}$  และ (ข) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นลบ  $V_{out-}$



รูปที่ 10 การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่อินพุตความถี่ 1MHz ขนาด  $25mV_{peak}$  (ก) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นบวก  $V_{out+}$  และ (ข) อินพุตและรูปคลื่นเอาต์พุตครึ่งคลื่นลบ  $V_{out-}$

ในขณะที่วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่นำเสนอทำงานที่ความถี่สูงได้ดี แต่มีพารามิเตอร์อย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณา ค่าผิดพลาดที่ zero crossing คือค่าที่จะกล่าวถึงต่อไป วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่นำเสนอใน (Monpapassorn *et al.*, 2001b) ได้นำเสนอวิธีการไบอัสแรงดันให้กับไดโอดเพื่อช่วยให้ไดโอดทำงานได้เร็วขึ้นเมื่อวงจรทำงานที่ความถี่สูงซึ่งวงจรแสดงดังในรูปที่ 1(ข) แต่สำหรับวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอในบทนี้ใช้ไดโอดทำงานในคลาส AB เนื่องจากวงจรที่ทำงานในคลาส AB จะต้องการกระแสอินพุตที่มีขนาดใหญ่กว่ากระแสไบอัสสี่เท่า (Surakumpontorn and Riewruja, 1992) การกำหนดค่ากระแสในสภาวะสงบจึงมีผลต่อความไวของสัญญาณอินพุต ดังนั้นถ้าต้องการให้วงจรสามารถเรียงกระแสที่สัญญาณอินพุตขนาดเล็กได้ดีจะต้องกำหนดกระแสในสภาวะสงบ ( $I_1$  และ  $I_2$ ) ไม่มากจนเกินไป เพื่อแสดงถึงแนวคิดนี้วงจรในรูปที่ 2 จะถูกจำลองการทำงานในโหมด DC ผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 ในรูปที่ 8(ก) แสดงคุณสมบัติทางด้านไฟตรงของเอาต์พุต  $V_{out+}$  เมื่อกระแส  $I_1=1\mu A$   $2\mu A$   $3\mu A$   $4\mu A$  และ  $5\mu A$  ( $I_1=I_2$ ) ในขณะที่  $V_{in}$  เปลี่ยนค่าจาก  $-300mV$  ถึง  $300mV$  ช่วงบริเวณ zero crossing ของคุณสมบัติทาง DC แสดงได้ดังรูปที่ 8(ข) จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อลดค่ากระแส  $I_1$  ลง ค่าผิดพลาดที่ zero crossing จะลดลงตามไปด้วย ดังนั้นหากต้องการให้วงจรเรียงกระแสสามารถเรียงกระแสที่สัญญาณขนาดเล็กได้ดีควรกำหนดค่ากระแส  $I_1$  และ  $I_2$  ค่าน้อย อย่างไรก็ตามค่ากระแสไบอัสดังกล่าวจะแปรผกผันกับความสามารถการทำงานที่ความถี่สูง ดังนั้นเมื่อกำหนดกระแสไบอัสมีค่าน้อยความสามารถการทำงานที่ความถี่สูงจะลดลง วงจรในรูปที่ 2 จะถูกจำลองการทำงานอีกครั้งโดยกำหนด  $I_1=I_2=1\mu A$  และป้อนสัญญาณอินพุตความถี่  $1MHz$  แล้วเปลี่ยนขนาดของแอมพลิจูดเป็น  $50mV_{peak}$  และ  $25mV_{peak}$  ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่าวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่นำเสนอสามารถเลือกคุณสมบัติของวงจรได้ด้วยการกำหนดกระแสไบอัส ( $I_1$  และ  $I_2$ ) ที่ไบอัสให้กับไดโอดที่ทำงานในคลาส AB ดังนั้นความสามารถการทำงานที่ความถี่สูงและความเที่ยงตรงจึงสามารถกำหนดได้ให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการประยุกต์ใช้

## สรุป

บทความนี้แนะนำเสนอวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นด้วยเทคโนโลยีซีมอส วงจรที่นำเสนอสร้างจากวงจรสายพานกระแสแบบลบ วงจรสะท้อนกระแส ตัวต้านทานและวงจรจ่ายกระแส วงจรสามารถให้เอาต์พุตเป็นรูปคลื่นสัญญาณครึ่งคลื่นแบบบวกและครึ่งคลื่นแบบลบ ถึงแม้ว่าวงจรที่นำเสนอจะใช้หลักการที่เหมือนกับวงจรที่เคยนำเสนอมาก่อนหน้านี้ แต่วงจรที่นำเสนอมีคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าวงจรที่นำเสนอก่อนหน้านี้ทางด้านใช้อุปกรณ์น้อยกว่า ทำงานที่ความถี่สูงกว่าโดยใช้ตัวเรียงกระแสทำงานในคลาส AB ร่วมกับวงจรสะท้อนกระแสที่ถูกไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกระแสเพื่อให้ทำงานตลอดเวลา วงจรที่นำเสนอเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมด้วยเทคโนโลยีซีมอส คุณสมบัติของวงจรถูกตรวจสอบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE จากผลการจำลองการทำงานวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอวงจรใช้กำลังงานประมาณ  $1.76mW$  และยืนยันได้ว่าวงจรสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงถึง  $250MHz$

## เอกสารอ้างอิง

- Allen, P. E. and Holberg, D. R. 1987. **CMOS Analog circuit design**. Holt Rinehart and Winston, Inc.: New York.
- Chaoui H. 1995. "CMOS high-frequency rectifier with unity voltage gain." **Electronics Letters**.: 31. 717-718.
- Gift S. J. G. 2000. "A high-performance full-wave rectifier circuit." **International Journal of Electronics**: 89. 467-476.
- Gray, P. Hurst, P. J. Lewis, S. H. and Meyer, R. G. 2001. **Analysis and design of analog integrated circuit**. John Wiley & Sons: New York.
- Khan A. A. Abou El-Ela M. and Al-Turaigi M. A. 1995. "Current-mode precision rectification." **International Journal of Electronics**.: 79. 853-859.
- Kumngern M. and Dejhan K. 2006. "High frequency and high precision CMOS full-wave rectifier." **International Journal of Electronics**.: 93. 185-199.
- Monpapassorn A. Dejhan K. and Cheevasuvit F. 2001a. "A full-wave rectifier using a current conveyor and current mirrors." **International Journal of Electronics**.: 88. 751-758.
- Monpapassorn A. Dejhan K. and Cheevasuvit F. 2001b. "CMOS dual output current mode half-wave rectifier." **International Journal of Electronics**.: 88. 1073-1084.
- Ramirez-Angulo J. 1992. "High frequency low voltage CMOS diode." **Electronics Letters**.: 298-299.
- Riewruja V. and Guntapong R. 2002. "A low-voltage wide-band CMOS precision full-wave rectifier." **International Journal of Electronics**.: 89. 467-476.
- Stiurca D. 1995. "Truly temperature independent current conveyor precision rectifier." **Electronics Letters**.: 31. 1302-1303.
- Surakumpontorn V. and Riewruja V. 1992. "Integrable CMOS sinusoidal frequency doubler and full-wave rectifier." **International Journal of Electronics**.: 73. 627-632.
- Toumazou C. Lidgey F. J. and Chattong S. 1994. "High frequency current conveyor precision full-wave rectifier." **Electronics Letters**.: 30. 745-746.
- Wang Z. 1990. "2-MOSFET transistor with extremely low distortion for output reaching supply voltages." **Electronics Letters**.: 26. 951-952.
- Wang Z. 1992. "Full-wave precision rectification that is performed in current domain and very suitable for CMOS implementation." **IEEE Transaction on Circuits and Systems-I**: 39. 456-462.
- Wilson B and Mannama V. 1995. "Current-mode rectifier with improved precision." **Electronics Letters**.: 31. 247-248.