

Current Conveyor Circuit Using GaAs MESFETs

Worapong Tangsrirat¹ Wanlop Surakamponorn²

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

A concept of designing of current conveyor circuit using gallium arsenide MESFET (GaAs MESFET) devices is proposed and analyzed in this paper. Designed to work by using GaAs devices which are the high frequency device, so circuit has high frequency response characteristic. The proposed circuit is based on design of analog integrated circuit in current mode, consists of GaAs voltage/current follower and current mirror which is suitable for implementing in integrated circuit form. The PSPICE simulation results confirm that the performance and frequency response of the proposed circuit are in good agreement with the theoretical results.

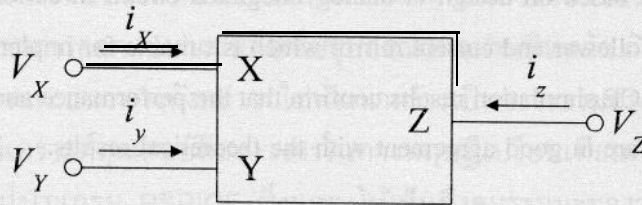
¹Lecturer, Department of Engineering

²Professor, Department of Electronic **Engineering**

1. กล่าวนำ

วงจรสายพานกระแสแบบใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ได้ถูกเสนอและพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1968 โดย A. Sedra และ K.C. Smith [1], [2] และมีการพัฒนาการออกแบบวงจรเรื่อยมาเป็นลำดับ จนเป็นเทคโนโลยีแบบใช้ทรานซิสเตอร์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน [3], [4] จนกระทั่งในปัจจุบันเทคโนโลยีเมสเฟทแกลเลียมอาร์เซไนด์ทรานซิสเตอร์ (Gallium Arsenide Metal Semiconductor Field-Effect Transistor, GaAs MESFET) ได้เริ่มเข้ามามีบทบาทอย่างมาก เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ใช้งานในย่านความถี่สูง ซึ่งจะทำให้วงจรรวมที่ได้มีสมรรถนะสูงขึ้น และมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีแบบเมสเฟททรานซิสเตอร์บนแผ่นวงจรรวมเดียวกันได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการรองรับเทคโนโลยีของวงจรรวมดังกล่าว ในบทความนี้จะขอเสนอหลักการใหม่ของวงจรสายพานกระแสโดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวมแบบใช้ GaAs MESFET เพื่อเป็นแนวทางที่จะนำเอาหลักการดังกล่าวไปออกแบบพัฒนาลงบนวงจรรวมขนาดใหญ่ต่อไป

2. หลักการพื้นฐานของวงจรสายพานกระแส



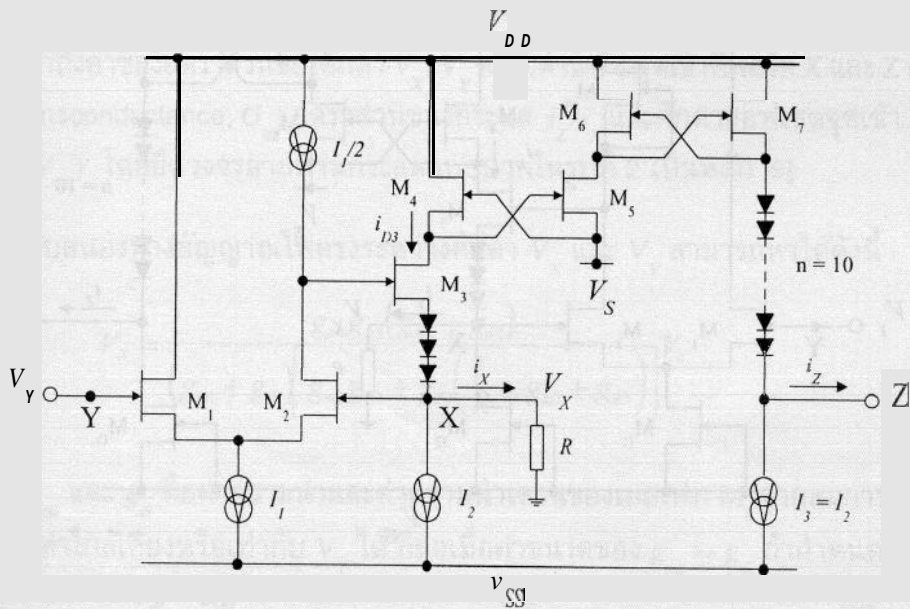
รูปที่ 1 : แสดงสัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแสจัดอยู่ในกลุ่มวงจรที่ทำงานในรูปกระแสที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นอุปกรณ์แบบสามพอร์ตดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสอธิบายได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_Y \\ V_X \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ i_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

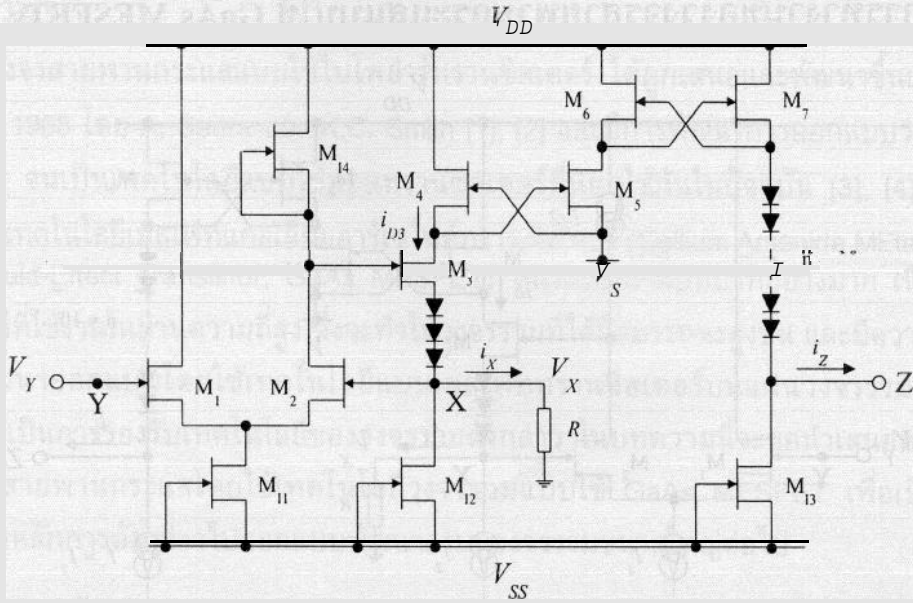
จากสมการที่ (1) ความสัมพันธ์ของทิศทางการไหลของกระแส i_Z กับกระแส i_X ถ้ามีเครื่องหมายเป็นบวกแสดงว่าทิศทางการไหลของกระแส i_Z กับกระแส i_X มีทิศทางเดียวกันจะเรียกวจรสายพานกระแสแบบนี้ว่า "วงจรสายพานกระแสแบบบวก" แต่ถ้ามีเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่ากระแส i_Z กับกระแส i_X มีทิศทางการไหลตรงกันข้ามกันจะเรียกวจรสายพานกระแสแบบนี้ว่า "วงจรสายพานกระแสแบบลบ" ส่วนค่ากระแส i_Y จะมีค่าเป็นศูนย์หรือก็คือความต้านทานจุดเข้าที่พิจารณาเข้าไปยังพอร์ต Y จะมีค่าเป็นอนันต์

3. หลักการทำงานของวงจรสายพานกระแสแบบใช้ GaAs MESFETs



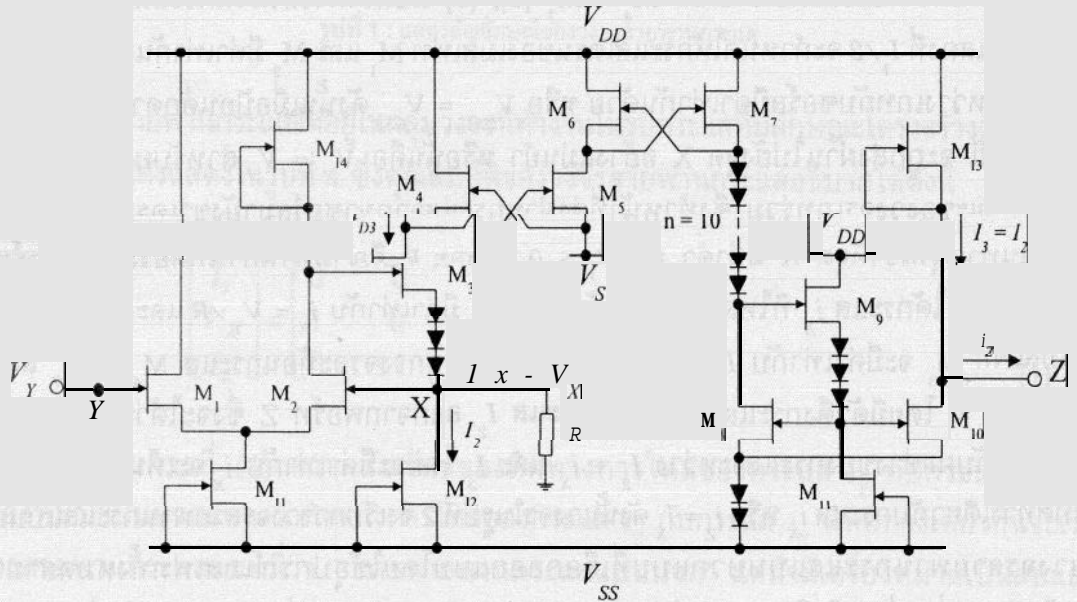
รูปที่ 2 : แสดงวงจรสายพานกระแสโดยใช้ GaAs MESFETs

วงจรสายพานกระแสแบบใช้ GaAs MESFETs แสดงได้ดังรูปที่ 2 การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ ถ้าให้เมสเฟตทุกตัวในวงจรมีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกประการและทำงานอยู่ในช่วงอิมิตัวแล้ว วงจรสะท้อนกระแส $M_4 - M_7$ [5], [6] มีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่งและตัวจ่ายกระแสคงที่ $I_1/2$ จะกำหนดให้กระแสเดรนของเมสเฟต M_1 และ M_2 มีค่าเท่ากันเป็นผลให้ศักดาตกคร่อมระหว่างเกตกับซอร์สมีค่าเท่ากันด้วย หรือ $V_{GS1} = V_{GS2}$ ดังนั้นเมื่อป้อนศักดา V_Y เข้าที่จุด Y ศักดา V_Y นี้ จะถูกส่งผ่านไปยังจุด X อย่างแม่นยำ หรือนั่นคือ $V_X = V_Y$ สำหรับเมสเฟต M_3 นั้น ต่อในลักษณะของวงจรเกทร่วม ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสจากขาซอร์สมายังขาเดรน และยังทำให้ความต้านทานจุดเข้าที่จุด X มีค่าต่ำ ถ้า $V_Y > 0$ และ R คือความต้านทานที่ต่อระหว่างพอร์ท X กับศักดาดินจะได้กระแส i_X ที่ไหลผ่านความต้านทาน R มีค่าเท่ากับ $i_X = V_Y/R$ และกระแสเดรน i_{D3} ของเมสเฟต M_3 จะมีค่าเท่ากับ $I_2 + i_X$ กระแส i_{D3} นี้ จะถูกวงจรสะท้อนกระแส $M_4 - M_7$ ส่งผ่านไปยังพอร์ท Z โดยมีตัวตั้งกระแสคงที่ I_3 ดึงกระแส I_2 ออกจากพอร์ท Z ซึ่งจะได้ว่ากระแสจุดออก i_Z มีค่าเท่ากับผลต่างของกระแสระหว่าง $I_2 + i_X$ และ I_3 โดยจะมีค่าเท่ากับ i_X จะเห็นได้ว่ากระแส i_Z จะมีทิศทางเดียวกับกระแส i_X หรือ $i_Z = i_X$ ดังนั้นวงจรในรูปที่ 2 จึงเรียกว่าวงจรสายพานกระแสแบบบวก โดยวงจรสายพานกระแสแบบบวกแบบที่เลือกออกแบบโดยใช้อุปกรณ์เมสเฟตทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งทำได้โดยการจัดให้เมสเฟต $M_{11} - M_{14}$ มาทำหน้าที่รักษากระแสคงที่แทน $I_1 - I_4$ ตามลำดับ



รูปที่ 3 : แสดงวงจรสายพานกระแสแบบใช้ GaAs MESFETs เป็นหลัก

สำหรับวงจรสายพานกระแสแบบลบจะแสดงในรูปที่ 4 โดยมีวงจรสะท้อนกระแส $M_8 - M_{11}$ [6], [7] เป็นตัวส่งผ่านกระแส $I_2 + i_x$ ไปยังพอร์ท Z โดยมีตัวจ่ายกระแสคงที่ I_3 ขดเซยกกระแส I_2 เป็นผลให้กระแส i_z มีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแส i_x หรือนั่นคือ $i_z = -i_x$



รูปที่ 4 : แสดงวงจรสายพานกระแสแบบลบ

4 คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส

การวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรสายพานกระแสจะใช้วงจรสมมูลสำหรับสัญญาณขนาดเล็กแทน [8] เพื่อพิจารณาถึงค่าของอัตราส่วนของคักดา V_X/V_Y ความต้านทานจุดเข้าที่พอร์ท X และ Z ค่าความนำของวงจร (Transconductance, G_m) อัตราส่วนของกระแส i_Z/i_X และคักดาออฟเซตจุดเข้า (Input Offset Voltage, V_{OS}) โดยยึดวงจรสายพานกระแสแบบบวกรูปที่ 2 เป็นหลัก [9]

ผลตอบสนองทางสัญญาณไฟตรงระหว่างคักดา V_X และ V_Y สามารถหาได้ดังนี้

$$V_X = \frac{g_{m1}g_{m2}(g_{m2} + g_{d2})}{(g_{m1} + g_{d1}) \left[g_{m2}g_{m3} + g_{d2} \left(\frac{1}{R} + g_{m3} + g_{d3} \right) \right]} V_Y \quad (2)$$

เมื่อ g_{mi} และ g_{di} คือค่าความนำและค่าความนำเดรนของเมสเฟท M_i จากสมการที่ (2) พบว่า คักดา V_X จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ V_Y ได้ ก็ต่อเมื่อค่าขนาดของ $g_{mi} \gg g_{di}$ ถ้ากำหนดให้ $g_{m1} = g_{m2} = 6.52 \times 10^{-4} \text{ A.V}^{-1}$, $g_{d1} = g_{d2} = 2.61 \times 10^{-5} \text{ A.V}^{-1}$, $g_{m3} = 1.31 \times 10^{-3} \text{ A.V}^{-1}$ และ $g_{d3} = 4.37 \times 10^{-5} \text{ A.V}^{-1}$ จะได้ $V_X = 0.96V_Y$

ความต้านทานจุดออกที่พิจารณาจากพอร์ท X สามารถหาได้โดยการป้อนคักดา V_X เข้าที่พอร์ท X แล้วพิจารณาค่าของกระแส I_X ที่ไหลเข้าไปยังพอร์ท X ซึ่งจะได้เท่ากับ

$$r_X = \frac{V_X}{I_X} = \frac{g_{d2}(g_{m4} + g_{d3} + g_{d4})}{(g_{m4} + g_{d4}) \left[g_{m2}g_{m3} + g_{d2}(g_{m3} + g_{d3}) \right]} \quad (3)$$

ถ้ากำหนดให้ $g_{m2} = 6.52 \times 10^{-4} \text{ A.V}^{-1}$, $g_{d2} = 2.61 \times 10^{-5} \text{ A.V}^{-1}$, $g_{m3} = g_{m4} = 1.31 \times 10^{-3} \text{ A.V}^{-1}$ และ $g_{d3} = g_{d4} = 4.37 \times 10^{-5} \text{ A.V}^{-1}$ จะได้ค่า r_X เท่ากับ 30Ω ซึ่งถือได้ว่ามีค่าที่ต่ำมาก

ความต้านทานจุดออกที่พิจารณาจากพอร์ท Z สามารถประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับความต้านทานจุดออกของวงจรสะท้อนกระแส $M_4 - M_7$ ขนานกับความต้านทานจุดออกของตัวดึงกระแสคักที่ I_3 ซึ่งเท่ากับ

$$r_Z = \frac{1}{g_{d7} + g_{d3}} \quad (4)$$

เมื่อ g_{d7} คือค่าความนำเดรนของตัวดึงกระแสคักที่ I_3 ตัวอย่างเช่นถ้า $g_{d7} = 4.37 \times 10^{-5} \text{ A.V}^{-1}$ จะได้ค่า r_Z ของวงจรประมาณ $23 \text{ k}\Omega$ ซึ่งถือว่ามีค่าสูง และความต้านทาน r_Z นี้ยังสามารถที่จะปรับปรุงให้มีค่าสูงเพิ่มขึ้นได้ โดยใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคเดแทนวงจรสะท้อนกระแส $M_4 - M_8$ ซึ่งเป็นแบบพื้นฐาน [9] แต่ในขณะเดียวกันช่วงคักดาปฏิบัติงานที่พอร์ท Z จะมีช่วงแคบลงเมื่อเทียบกับการใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน เนื่องจากเมสเฟทต้องการคักดาตกรวมระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส V_{DS} ที่มีค่าสูงกว่า ($V_{GS} > V_T$) เพื่อที่ยังคงทำให้เมสเฟททำงานในช่วงอิมิตัว

สำหรับผลตอบสนองทางความถี่สูงของวงจรสายพานกระแส จะวิเคราะห์ในรูปของค่าความนำระหว่างกระแส i_x และ v_y ซึ่งจะหาได้ดังนี้

$$\frac{i_x}{v_y} = \frac{1}{s^2 M} \left[\frac{s^2 C(C_2 + C_3) + s(C_2 g_m + C g_d) + g_m g_{m3}}{s^2 (C C_2 + C C_3 + 2 C_2 C_3) + s [C_2 g_m + 2 C_3 g_{m3} + 2 \left(\frac{C_2 + C_3}{R_x} \right)] + [g_m g_{m3} + 2 g_d \left(\frac{1 + g_{m3} R_x}{R_x} \right)]} \right] \quad (5)$$

ได้ความถี่โพล p_1 เท่ากับ

$$p_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_m g_{m3} + 2 g_d \left(\frac{1 + g_{m3} R_x}{R_x} \right)}{C(C_2 + C_3) + 2 C_2 C_3}} \quad (6)$$

โดยที่ $g_m = g_{m1} = g_{m2}$, $C = C_{gs1} = C_{gs2}$, $C_2 = C_{gd2} + C_{gs3}$, $C_3 = C_{gd3}$ เมื่อ C_{gs1} , C_{gs2} คือค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส และค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขาเกตกับขาเดรนของเมสเฟท M_1 ตามลำดับ ถ้ากำหนดให้ $g_{m1} = g_{m2} = 6.52 \times 10^{-4} \text{ A.V}^{-1}$, $g_{m3} = 1.31 \times 10^{-3} \text{ A.V}^{-1}$, $C_{gs1} = C_{gs2} = C_{gd2} = 1.60 \times 10^{-14} \text{ F}$ และ $C_{gs3} = C_{gd3} = 6.30 \times 10^{-15} \text{ F}$ ดังนั้นเมื่อ $R_x = 100 \text{ k}\Omega$ แล้ว จะได้ความถี่โพล p_1 เท่ากับ 5 GHz ซึ่งค่าความถี่นี้ไม่ใช่ตัวที่จะจำกัดสมรรถนะทางความถี่ของวงจรสายพานกระแส ส่วนผลตอบสนองทางความถี่ที่พอร์ท Z สามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{i_z}{i_x} = \left[\frac{(g_{m5} - s C_{gd5})(g_{m7} + s C_{gs6} + s C_{gs7})}{s^2 (C_A C_B) + s (C_A g_{m6} + C_B g_{m4} + C_{gd5} g_{m5}) + g_{m4} g_{m6}} \right] \quad (7)$$

ได้ความถี่โพล p_2 เท่ากับ

$$p_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m4} g_{m6}}{C_A C_B}} \quad (8)$$

เมื่อ $C_A = C_{gs4} + C_{gs5} + C_{gd5}$ และ $C_B = C_{gd5} + C_{gs6} + C_{gs7} + C_{gd7}$ กำหนดให้ $g_{m4} = 1.31 \times 10^{-3} \text{ A.V}^{-1}$, $g_{m6} = 3.67 \times 10^{-5} \text{ A.V}^{-1}$, $C_{gs4} = C_{gs5} = C_{gs6} = C_{gs7} = C_{gd5} = C_{gd7} = 6.30 \times 10^{-15} \text{ F}$ จะได้ความถี่โพล p_2 เท่ากับ 1.6 GHz ซึ่งจะเห็นว่าค่าความถี่นี้ต่ำกว่าค่าความถี่โพล p_1 ดังนั้นค่าความถี่นี้จึงเป็นตัวจำกัดสมรรถนะทางความถี่ของวงจรสายพานกระแส

สำหรับค่าของศักดาออฟเซต V_{OS} เมื่อป้อนศักดาจุดเข้า V_y ที่ทำให้ศักดา V_x มีค่าเท่ากับศูนย์ สามารถหาได้โดยใช้การวิเคราะห์ห้วงจรกรณีสัญญาณขนาดใหญ่ ได้ดังนี้

$$V_{OS} = (V_{T1} - V_{T2}) - \frac{(\beta_1 - \beta_2)(I_{D1} + I_{D2})^{1/2}}{(\beta_1 + \beta_2)(\beta_1 + \beta_2)} \quad (9)$$

โดยที่ V_{T_i} , β_i และ I_{di} คือศักดาขีดเริ่ม (threshold voltage) ค่าพารามิเตอร์ความนำ และกระแสทรานซิสเตอร์ M_i ตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (9) จะเห็นว่าสามารถที่จะทำการลดค่าศักดาออฟเซต V_{OS} ได้มีอยู่ 2 ประการ คือ ประการแรกต้องควบคุมเทคโนโลยีในการผลิตเพื่อให้โครงสร้างภายในของเมสเฟทมีค่าของศักดาขีดเริ่ม V_T และค่าพารามิเตอร์ความนำ β ใน M_1 และ M_2 มีความสมพงษ์กันมากที่สุด ประการที่สองคือการลดค่ากระแส $I_1 = I_{D1} + I_{D2}$

การพิจารณาช่วงของศักดาปฏิบัติงาน V_Y ที่เป็นศักดาจุดเข้าที่พอร์ท Y โดยกำหนดให้ $V_{Y(max)}$ และ $V_{Y(min)}$ แทนถึงค่าของศักดาปฏิบัติงานสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้น ดังนั้นช่วงศักดาปฏิบัติงานของวงจรหาได้โดยใช้การวิเคราะห์วงจรรณีสัญญาณขนาดใหญ่ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\text{ช่วงศักดาปฏิบัติงาน} = V_{Y(max)} - V_{Y(min)} = V_{DD} - V_{SS} - \left[\left(\frac{I_1}{\beta} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) ช่วงศักดาปฏิบัติงานของวงจรสามารถทำให้ช่วงปฏิบัติงานกว้างขึ้นได้ โดยการลดค่าของตัวดึงกระแสคงที่ I_1 หรือโดยการควบคุมขบวนการผลิตเพื่อให้โครงสร้างภายในของเมสเฟทให้มีค่าพารามิเตอร์ของความนำ β สูงๆ แต่ทั่วไปในทางปฏิบัติแล้วมักเลือกออกแบบให้ตัวดึงกระแสคงที่ I_1 มีค่าน้อยๆ จะสะดวกกว่า ทั้งยังเป็นผลให้ค่าของศักดาออฟเซต V_{OS} นั้นมีค่าลดลงพร้อมกันไปด้วย

สำหรับการพิจารณาช่วงกระแสปฏิบัติงานของวงจรหาได้โดยใช้การวิเคราะห์วงจรรณีสัญญาณขนาดใหญ่สามารถสรุปได้ดังนี้

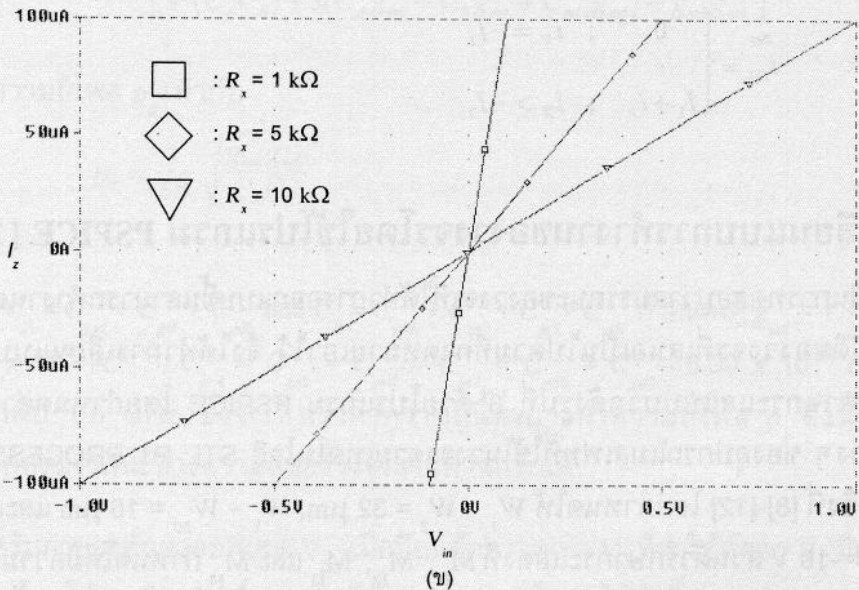
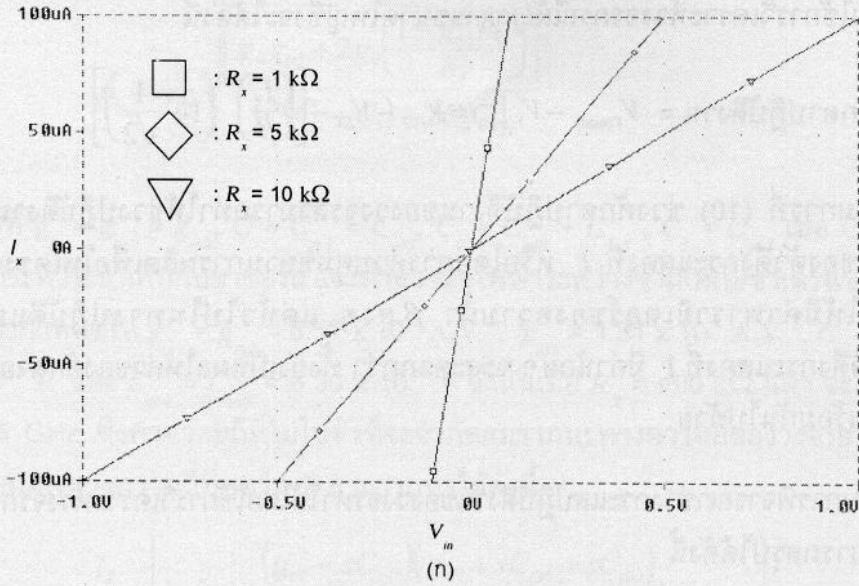
$$i_{D3} = \begin{cases} 0 & ; i_x = -I_2 \\ I_2 + i_x & ; i_x > -I_2 \end{cases} \quad (11)$$

5. ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSPICE [10]

เพื่อเป็นการทดสอบว่าสมรรถนะของวงจรที่ได้ทำการออกแบบขึ้นสามารถทำงานตามหลักการ และมีคุณสมบัติของวงจรที่เสนอเป็นไปตามที่คาดหมายเอาไว้ จึงได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรสายพานกระแสแบบบวกดังรูปที่ 3 ด้วยโปรแกรม PSPICE โดยกำหนดค่ารายละเอียดพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์เมสเฟทที่ใช้ในวงจรตามเทคโนโลยี STL P1 PROCESS ที่ได้เสนอในเอกสารอ้างอิงที่ [8]-[12] โดยกำหนดให้ $W_1 = W_2 = 32 \mu\text{m}$, $W_3 - W_{10} = 16 \mu\text{m}$ และเลือกใช้ $V_{DD} = +10 \text{ V}$, $V_{SS} = -10 \text{ V}$ ส่วนตัวรักษาระแสคงที่ M_{11} , M_{12} , M_{13} และ M_{14} กำหนดให้มีความกว้างขากเทเท่ากับ $8 \mu\text{m}$, $16 \mu\text{m}$, $16 \mu\text{m}$ และ $4 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

5.1 ค่ากระแสที่พอร์ท X และที่พอร์ท Z

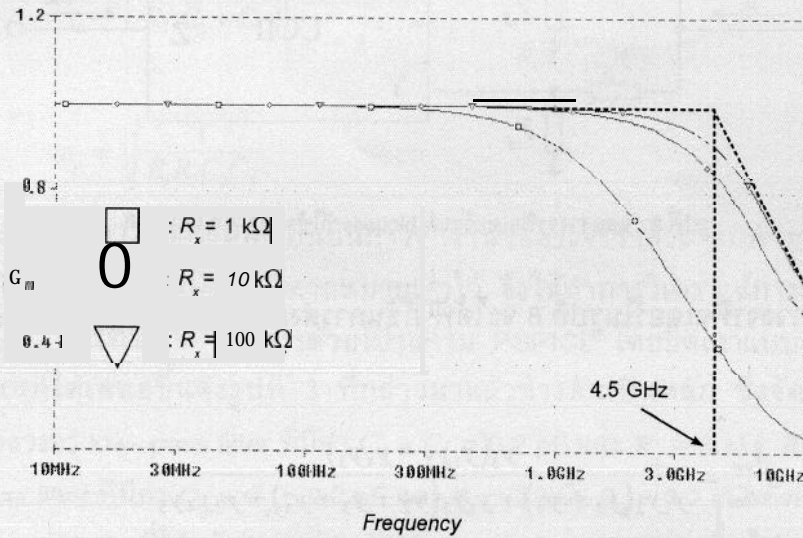
การเขียนแบบหาค่ากระแสที่พอร์ท X และพอร์ท Z กระทำได้โดยที่พอร์ท Z มีความต้านทาน $R_z = 2\text{ k}\Omega$ คงที่ และความต้านทาน R_x ที่พอร์ท X แปรค่าเป็น $1\text{ k}\Omega$, $5\text{ k}\Omega$ และ $10\text{ k}\Omega$ ตามลำดับ จากผลการเขียนแบบในรูปที่ 5 จะพบว่าวงจรสามารถเปลี่ยนศักดาที่พอร์ท Y เป็นกระแสที่พอร์ท X และกระแสที่พอร์ท Z ที่มีค่าและทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วงจรมีความเป็นเชิงเส้นและมีความเที่ยงตรงตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าศักดา และกระแสปฏิบัติงานของวงจรเป็นไปตามที่ได้คาดหมายเอาไว้



รูปที่ 5 : แสดงผลการเขียนแบบหาค่ากระแส (ก) ที่พอร์ท X (ข) ที่พอร์ท Z

5.2 ค่าความนำของวงจร $G_m (i_x / V_Y)$

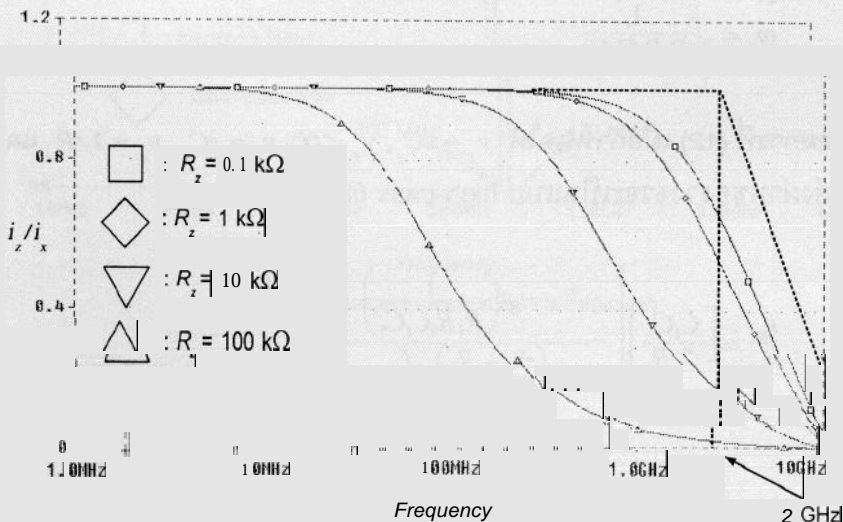
การเขียนแบบหาค่าความนำของวงจรถ้าทำได้โดยที่ความต้านทาน R_x ที่พอร์ท X แปรค่าไปเป็น 1 k Ω , 10 k Ω และ 100 k Ω ตามลำดับ ซึ่งจะได้ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจระหว่างกระแสที่พอร์ท X กับศักดาที่พอร์ท Y ดังผลการเขียนแบบในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อความต้านทาน R_x ที่แปรค่าไปสูงขึ้นผลตอบสนองทางความถี่ปฏิบัติงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4.5 GHz ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่คาดหมายเอาไว้ในสมการที่ (6)



รูปที่ 6 : แสดงผลการเขียนแบบหาค่าความนำของวงจร $G_m (i_x / v_Y)$

5.3 อัตราส่วนของกระแส i_z / i_x

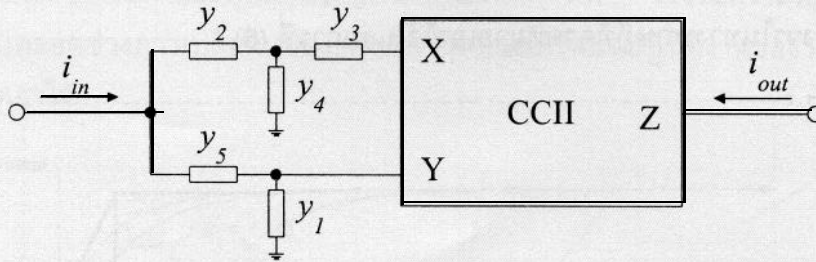
ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจระหว่างกระแสที่พอร์ท X กับกระแสที่พอร์ท Z ดังผลการเขียนแบบในรูปที่ 7 โดยที่ความต้านทาน R_z ที่พอร์ท Z แปรค่าไปเป็น 0.1 k Ω , 1 k Ω , 10 k Ω และ 100 k Ω ตามลำดับ พบว่าเมื่อความต้านทาน R_z แปรค่าลดลงช่วงความถี่ปฏิบัติงานสูงสุดจะเข้าใกล้ความถี่โพลที่ประมาณ 2 GHz ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่คาดหมายเอาไว้ในสมการที่ (8)



รูปที่ 7 : แสดงผลการเขียนแบบหาอัตราส่วนของ i_z / i_x

6. การประยุกต์ใช้งาน

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการนำเอาวงจรสายพานกระแสแบบใช้เมสเฟททรานซิสเตอร์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรฟิลเตอร์แบบ biquads ที่มีการทำงานในรูปของกระแสที่ใช้วงจรสายพานกระแสหนึ่งตัวต่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์ RC พาสซีฟ 5 ตัว [13] ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 : แสดงวงจรฟิลเตอร์แบบ biquads ที่ใช้วงจรสายพานกระแส

พิจารณาวงจรฟิลเตอร์ในรูปที่ 8 จะได้ฟังก์ชันการส่งผ่านกระแส (current transfer function) ดังนี้

$$\frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{y_3(y_1y_2 - y_4y_5)}{y_1y_2(y_3 + y_4) + y_1y_5(y_2 + y_3 + y_4) + y_2y_4y_5} \tag{12}$$

จากสมการที่ (12) ถ้ากำหนดให้ $y_1 = 1/R_1$, $y_2 = \infty$ (ลัดวงจร), $y_3 = 1/R_3$, $y_4 = sC_4$ และ $y_5 = sC_5$ แล้วฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรจะเป็นแบบ low-pass filter ดังนี้คือ

$$\frac{i_{out}}{i_{in}} = \left[\frac{1}{R_1R_3C_4C_5} \right] \left[\frac{1}{s^2 + s\left(\frac{C_4 + C_5}{R_1C_4C_5}\right) + \left(\frac{1}{R_1R_3C_4C_5}\right)} \right] \tag{13}$$

ซึ่งจะได้ความถี่เชิงมุมโพล (pole frequency) เท่ากับ

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{R_1R_3C_4C_5}} \tag{14}$$

และจากสมการที่ (12) เมื่อกำหนดให้ $y_1 = sC_1$, $y_2 = \infty$, $y_3 = sC_3$, $y_4 = 1/R_4$ และ $y_5 = 1/R_5$ แล้ว ฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรจะเป็นแบบ high-pass filter ดังนี้คือ

$$\frac{i_{out}}{i_{in}} = \left[\frac{C_1C_3}{R_4R_5} \right] \left[\frac{s^2\left(\frac{1}{R_4R_5C_1C_3}\right)}{s^2 + s\left(\frac{R_4 + R_5}{R_4R_5C_3}\right) + \left(\frac{1}{R_4R_5C_1C_3}\right)} \right] \tag{15}$$

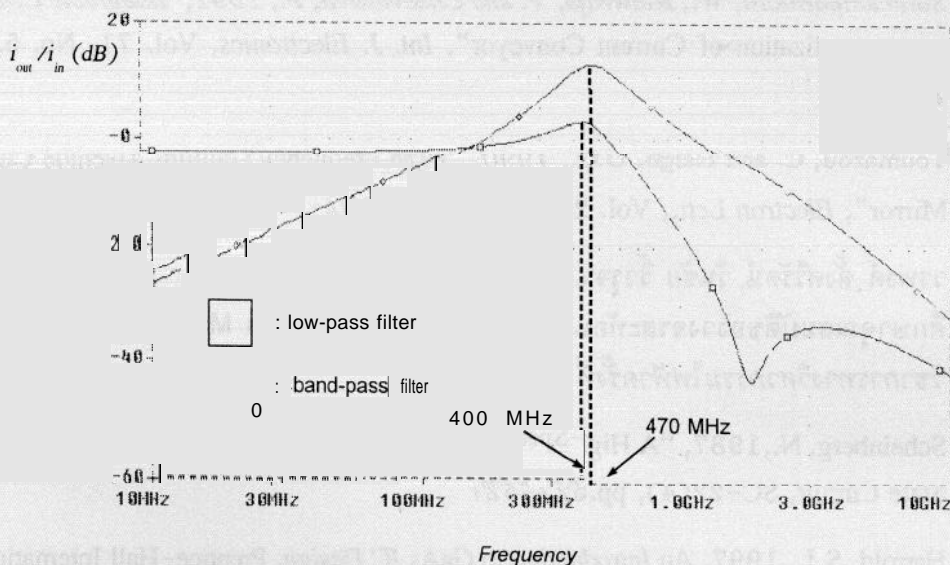
$$\text{จะได้ } \omega_p = \sqrt{\frac{1}{R_4 R_3 C_1 C_3}} \quad (16)$$

เช่นเดียวกันจากสมการที่ (12) ถ้า $y_1 = 1/R_1$, $y_2 = sC_2$, $y_3 = 1/R_3$, $y_4 = sC_4$ และ $y_5 = \infty$ แล้วฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรจะเป็นแบบ band-pass filter ดังนี้คือ

$$\frac{i_{out}}{i_{in}} = \left[\frac{R_1 C_4}{R_3 C_2 + C_4} \right] \left[\frac{s \left(\frac{C_2 + C_4}{R_1 C_2 C_4} \right)}{s^2 + s \left(\frac{C_2 + C_4}{R_1 C_2 C_4} \right) + \left(\frac{1}{R_1 R_3 C_2 C_4} \right)} \right] \quad (17)$$

$$\text{จะได้ } \omega_p = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_3 C_2 C_4}} \quad (18)$$

ทั้งนี้เพื่อเป็นการทดสอบและยืนยันการทำงานของวงจรว่าสามารถทำงานตามหลักการ และมีคุณสมบัติของวงจรเป็นไปตามที่คาดหมายเอาไว้ จึงได้ทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE โดยยึดเอาแบบจำลองและวงจรสายพานกระแสที่ได้เสนอขึ้นดังรูปที่ 3 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นหลัก ซึ่งจัดวงจรในรูปที่ 8 เป็นลักษณะของวงจร low-pass filter ที่มีค่า $C_4 = C_5 = 0.2$ pF และ $R_1 = 5$ k Ω , $R_3 = 0.5$ k Ω และวงจร band-pass filter ที่มีค่า $C_2 = C_4 = 0.2$ pF และ $R_1 = 5$ k Ω , $R_3 = 0.5$ k Ω ดังผลการเลียนแบบในรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าความถี่โพลมีค่าเท่ากับ 450 MHz และ 470 MHz เป็นไปตามแนวโน้มที่ได้คาดเอาไว้ในสมการที่ (14) และสมการที่ (18) ตามลำดับ



รูปที่ 9 : แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร

7. บทสรุป

บทความนี้เสนอวงจรสายพานกระแสแนวใหม่โดยการออกแบบวงจรได้เลือกใช้อุปกรณ์เมสเฟทเป็นหลัก ซึ่งจุดประสงค์หลักก็คือ ต้องการที่จะพัฒนาสมรรถนะของวงจรรวมให้มีย่านความถี่ในการปฏิบัติงานสูงขึ้น เพื่อทำให้เกิดความหลากหลายในการพัฒนาวงจรและระบบ โดยสมรรถนะของวงจรตามหลักการที่ออกแบบขึ้น รวมทั้งตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานนั้น สามารถที่ยืนยันได้ว่ามีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ได้คาดหมายเอาไว้ ด้วยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีและผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ดังนั้นจากหลักการและแนวทางของวงจรสายพานกระแสที่เสนอขึ้นแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการที่จะนำไปออกแบบและพัฒนาสร้างเป็นวงจรรวมในลำดับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Smith, K.C. and Sedra, A., 1968, "The Current Conveyor : a new circuit building block", *Proc. IEEE*, Vol.56, pp. 1368-1369
2. Smith, K.C. and Sedra, A., 1970, "A Second Generation Current Conveyor and its applications", *IEEE Trans.*, Vol. CT- 17, pp. 132-154
3. Surakamporn, W., Riewruja, V., Kumwachara, K. and Dejhan, K., 1991, "Accurate CMOS-based Current Conveyor", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 40, No. 4, pp. 699-702
4. Surakamporn, W., Riewruja, V. and Cheevasuvit, F., 1991, "Integrable CMOS-based Realization of Current Conveyor", *Int. J. Electronics*, Vol. 71, No. 5, pp. 793-798
5. Toumazou, C. and Haigh, D.G., 1990, "High Frequency Gallium Arsenide Current Mirror", *Electron Lett.*, Vol. 26, No. 21, pp. 1802-1803
6. วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, วันชัย ธีรจุฑา, จเร สุวัฒน์ปัญญา และ วัลลภ สุระกำพลธร, 2537, "การศึกษาคุณสมบัติของวงจรสะท้อนกระแสความถี่สูงโดยใช้ GaAs MESFETs", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17*, หน้า 487-491
7. Scheinberg, N., 1987, "A High-Speed GaAs Operational Amplifier", *IEEE J. Solid-State Circuit*, SC-22(4), pp.522-527
8. Harrold, S.J., 1997, *An Introduction to GaAs IC Design*, Prentice-Hall International
9. Microsim Corp., 1994, *PSPICE*, Laguna Hills, CA92653, U.S.A
10. Toumazou, C. and Haigh, D. G., 1987, "Design of a high-gain, single-stage operational amplifier for GaAs switched-capacitor filters", *Electron Lett.*, Vol.23, pp. 752-754

11. Toumazou, C. and Haigh, D.G., 1990, *Analogue ICI Design the Current Mode Approach*, Peter Peregrinus, London
12. วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, วันชัย ธีร์รุจา และ วัลลภ สุระกำพลธร, 2540, "วงจรมายค่าความนำโดยใช้ GaAs MESFETs", *วารสารวิจัยและพัฒนา สจร.*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1 เดือนมิถุนายน, หน้า 31-41
13. Liu, S. I. and Tsao, H. W., 1991, "New Configuration for Single CCII biquads", *Int. J. Electronics*, Vol. 70, No. 3, pp. 609-622