สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สจล. คณะวิศวกรรมศาสตร์

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

เรื่อง

การออกแบบวงจรเชิงอุปมานด้วยอุปกรณ์ Gallium Arsenide (GaAs)

หัวหน้าโครงการ

นาย วัลลภ สุระกำพลธร

RCH
TK
7874
จ44ร5
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....28205
วัน, เดือน, ปี 2 3 ก.ค. 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรเชิงอุปมานด้วยอุปกรณ์ Gallium Arsenide (GaAs)

ANALOGUE INTEGRATED CIRCUIT DESIGN USING GALLIUM ARSENIDE

บทคัดย่อ

รายงานนี้ได้เสนอแนวทางใหม่ในการออกแบบวงจรรวมเชิงอุปมานโดยใช้แกลเลี่ยมอาร์เซไนด์เมสเฟท (GaAs MESFETs) ซึ่งอุปกรณ์เมสเฟทนี้มีคุณสมบัติที่เหนือกว่าอุปกรณ์ไบโพล่าร์ และมอสเฟทคือย่านความถี่ปฏิบัติงานสูงมาก จึงทำให้วงจรที่ออกแบบขึ้นโดยอาศัยหลักการออกแบบวงจรรวมที่มีการทำงานอยู่ในรูปกระแส มีคุณสมบัติเด่นของวงจรที่นำเสนอคือมีช่วงปฏิบัติการทางความถี่อยู่ในย่านสูงมาก ซึ่งในที่นี้วงจรที่นำเสนอคือวงจรขยายความนำ (operational transconductance amplifier) โดยวงจรประกอบด้วยคุณสมบัติของวงจรขยายความแตกต่าง (differential amplifier) ต่อร่วมกับวงจรสะท้อนกระแส (current mirror) เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบล้วนแล้วแต่เป็นอุปกรณ์เมสเฟททั้งสิ้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาหลักการและแนวทางดังกล่าวไปพัฒนาสร้างขึ้นเป็นวงจรรวมต่อไป เพื่อยืนยันหลักการที่ได้นำเสนอจึงได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีเปรียบเทียบ กับผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ผลที่ได้สามารถแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะ ตลอดจนผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรว่าสอดคล้องเป็นไปตามแนวทางที่ได้เสนอขึ้น

Abstract

This report studies a circuit concept to design of analog integrated circuit using gallium arsenide (GaAs) MESFETs. GaAs technology has more advantages than bipolar and MOS technologies which GaAs device can used for high frequency particularly in the GHz band. The new methods is very suitable designing and realizing current mode analog integrated circuit that have high-frequency response characteristics. GaAs-based operational transconductance amplifier (OTA) circuit is proposed in this report. For the circuit, OTA employs differential amplifier and current mirrors which is more suitable for implementing in integrated circuit form. The experimental results and PSPICE simulation results confirm that the performance and frequency response of the propose circuits, are in agreement with the theoretical results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 บทนำ

วงจรขยายค่าความนำหรือวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนศักดาเป็นกระแสแบบปรับค่าความนำของวงจรได้เป็นวงจรส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญมากในงานด้านการประมวลสัญญาณในรูปของกระแส เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์, วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่วงจรขยายค่าความนำดังกล่าวจะออกแบบพัฒนามาจากเทคโนโลยีไบโพล่าหรือเทคโนโลยีมอส แต่ในการวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติและสมรรถนะของวงจรขยายค่าความนำที่ออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีแกลเลี่ยมอาร์เซไนด์เป็นหลัก ซึ่งวงจรประกอบด้วยวงจร GaAs สะท้อนกระแสต่อร่วมกับวงจรทรานคอนดัคเตอร์พื้นฐานค่าความนำของวงจรนั้นสามารถควบคุมได้ง่ายและสะดวก ด้วยการปรับค่ากระแสไบอัสที่คู่ดิฟเฟอเรนเชียลในวงจร ทำให้สมรรถนะของวงจรที่ได้มีประสิทธิภาพที่ดีวงจรหนึ่ง มีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงการปฏิบัติงาน และผลตอบสนองต่อความถี่สูงมาก

2 หลักการพื้นฐาน

2.1 วงจรสะท้อนกระแสแบบใช้ GaAs MESFETs

วงจรสะท้อนกระแสเป็นวงจรย่อยที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือมีค่าความต้านทานจุดเข้าของสัญญาณต่ำและมีค่าความต้านทานตรงจุดออกของสัญญาณสูง จากคุณสมบัตินี้ทำให้วงจรสะท้อนกระแสได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เป็นอย่างมาก เช่น ภาคขยายกำลังในเครื่องขยายเสียง ภาคขยายสัญญาณส่วนหน้าของเครื่องมือวัด ใช้เป็นโหลดของวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กในวงจรรวม และใช้เป็นวงจรส่งผ่านกระแส เป็นต้น

โดยทั่วไปวงจรสะท้อนกระแสแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ 1) วงจรสะท้อนกระแสแบบบวก (positive current mirror) เป็นวงจรกำเนิดกระแสที่ทำหน้าที่ดึงกระแสคงที่ไม่ขึ้นกับโหลด ซึ่งบางครั้งจะเรียกกระแสในทิศทางลักษณะนี้ว่า กระแสซิงค์ (current sink) และ 2) วงจรสะท้อนกระแสแบบลบ (negative current mirror) เป็นวงจรกำเนิดกระแสที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสคงที่ไม่ขึ้นกับโหลด ซึ่งจะเรียกทิศทางของกระแสลักษณะนี้ว่า กระแสซอร์ส (current source) โดยลักษณะการทำงานที่สำคัญของวงจรสะท้อนกระแสทั้งสองแบบดังกล่าวจะเป็นลักษณะวงจรแบบตามศักดา (voltage follower)

2.1.1 วงจร GaAs สะท้อนกระแสพื้นฐาน

วงจร GaAs สะท้อนกระแสพื้นฐานดังรูปที่ 2.1.1 ประกอบด้วยคู่ของเมสเฟท M_1 และ M_2 ที่มีขาเกทและขาซอร์สต่อกันแบบคู่ไขว้ (crosscouple) [1] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราส่วน g_m/g_d ของเมสเฟทมีค่าประมาณ 15-20 เท่า ดังนั้นจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านจุดเข้า (input impedance) ของวงจรที่จุด 1 , Z_{in1} ดังนี้

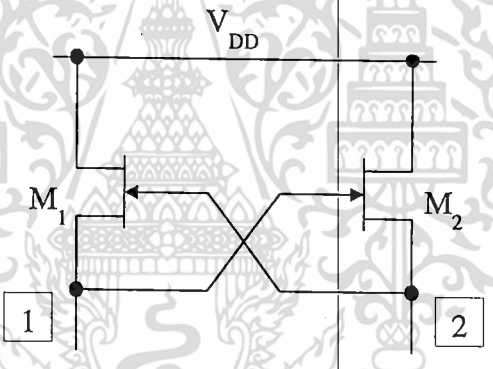
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{in1} = \left[\frac{g_{m2} + s(C_1 + C_3)}{g_{m1} + s(C_1 + C_2)}\right] Z_{L2} + \left[\frac{1}{g_{m1} + s(C_1 + C_2)}\right] \quad (2.1.1)$$

และอิมพีแดนซ์ด้านจุดเข้าของวงจรที่จุด 2, Z_{in2} เท่ากับ

$$Z_{in2} = \left[\frac{g_{m1} + s(C_1 + C_2)}{g_{m2} + s(C_1 + C_3)}\right] Z_{L1} + \left[\frac{1}{g_{m2} + s(C_1 + C_3)}\right] \quad (2.1.2)$$

เมื่อ g_{m1}, g_{m2} เป็นค่าความนำ (transconductance) ของเมสเฟท M_1 และ M_2 ตามลำดับ $C_1 = C_{gs1} + C_{gs2}$, $C_2 = C_{gd2}$, $C_3 = C_{gd1}$ โดยที่ C_{gsi} เป็นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขาเกทกับขาซอร์สและ C_{gdi} เป็นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขาเกทกับขาเดรนของเมสเฟท M_i และ Z_{L1}, Z_{L2} เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (load impedance) ที่ต่อทางด้านจุด 1 และจุด 2 ของวงจรตามลำดับ



รูปที่ 2.1.1 : วงจร GaAs สะท้อนกระแสพื้นฐาน

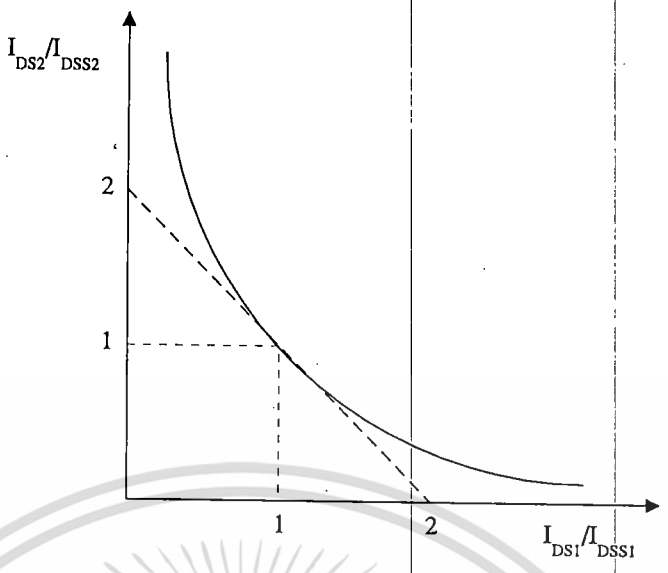
โดยทั่วไปแล้ว $Z_{L1} >> 1/g_{m1}$ และ $Z_{L2} >> 1/g_{m2}$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.1.1) และ (2.1.2) ค่าความต้านทานที่จุดเข้าแต่ละพอร์ทจึงมีค่าประมาณ

$$r_{in1} = \left(\frac{g_{m2}}{g_{m1}}\right) Z_{L2} \quad (2.1.3)$$

และ

$$r_{in2} = \left(\frac{g_{m1}}{g_{m2}}\right) Z_{L1} \quad (21..4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1.2 : กราฟคุณลักษณะของกระแสในวงจรรูปที่ 1.2.1

คุณลักษณะของกระแสในวงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐานนี้ สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยสมการกระแสเดรนของเมสเฟทเมื่อถูกไบอัสให้ทำงานในช่วงอิ่มตัวจะได้

$$I_{DS1} = I_{DSS1}\left[1-\frac{V_{GS1}}{V_T}\right]^2 \qquad (2.1.5)$$

นั่นคือ

$$I_{DS2} = I_{DSS2}\left[1-\frac{V_{GS2}}{V_T}\right]^2 \qquad (2.1.6)$$

จากรูปที่ 2.1.1 เมื่อเมสเฟททั้งสองตัวในวงจรมีคุณสมบัติสมพงษ์กัน (match) และต่อกันแบบคู่ไขว้แล้ว จึงได้ค่า β, V_T มีค่าเท่ากันและ $V_{GS1} = -V_{GS2}$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของกระแสทั้งสองดังนี้

$$\frac{I_{DS2}}{I_{DSS2}} = \left(\frac{I_{DS1}}{I_{DSS1}}\right) + 4\left[1-\sqrt{\frac{I_{DS1}}{I_{DSS1}}}\right] \qquad (2.1.7)$$

โดย I_{DSS} คือกระแสเดรนอิ่มตัว (หรือกระแสเดรนที่ $V_{GS} = 0$) มีค่าเท่ากับ $\beta.(V_T)^2$ และจากสมการที่ (2.1.7) ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของกระแสเป็นสมการไม่เชิงเส้นและกลับเฟส ดังแสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS2}/I_{DSS2} กับ I_{DS1}/I_{DSS1} ในรูปที่ 2.1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 วงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบลบ

วงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบลบดังแสดงในรูปที่ 2.1.3 นั้นถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย C.Toumazou และคณะ [1] รายละเอียดของวงจรประกอบด้วยวงจรพื้นฐานในรูปที่ 2.1.1 สองชุดต่อร่วมกันเพื่อทำหน้าที่สะท้อนกระแสสองครั้งเพื่อให้ทิศทางระหว่างกระแสจุดเข้ากับกระแสจุดออกมีทิศทางเดียวกัน (noninverting) จากเงื่อนไขการไบอัสให้ GaAs MESFET ทำงานในช่วงอิ่มตัว ซึ่งจะได้คุณสมบัติของกระแสเดรนเป็นฟังก์ชั่นของศักดาไบอัสเกท-ซอร์ส, V_{GS} ดังนี้

$$I_{DS} = W.f(V_{GS}) \tag{2.1.8}$$

โดยที่ f แทนถึงฟังก์ชั่นไม่เชิงเส้นซึ่งขึ้นอยู่กับศักดาเดรน-ซอร์ส, V_{DS} ดังนั้นกระแสจุดเข้าของวงจร I_{in} หรือกระแสเดรนของเมสเฟท M_1 , I_{DS} ที่เกิดจากการไบอัสด้วยศักดาเกท-ซอร์ส, V_{GS1} จึงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_{in} = I_{DS1} = W_1.f(V_{GS1}) \tag{2.1.9}$$

ศักดาเกท-ซอร์สของ M_1 จะกลับทิศทางป้อนให้กับเกท-ซอร์สของ M_2 ทำให้เกิดกระแสเดรน I_{DS2} ขึ้นซึ่งเท่ากับกระแสเดรน, I_{DS3} ของ M_3 นั่นคือศักดาเกท-ซอร์สของ M_2 และ M_3 ต่างเท่ากับ $-V_{GS1}$ ท้ายสุดศักดาเกท-ซอร์สของ M_3 จะกลับทิศทางและป้อนให้กับ M_4 ดังนั้นกระแสจุดออกเป็น

$$I_{DS4} = W_4.f(V_{GS1}) = \left(\frac{W_4}{W_1}\right).I_{DS1}$$

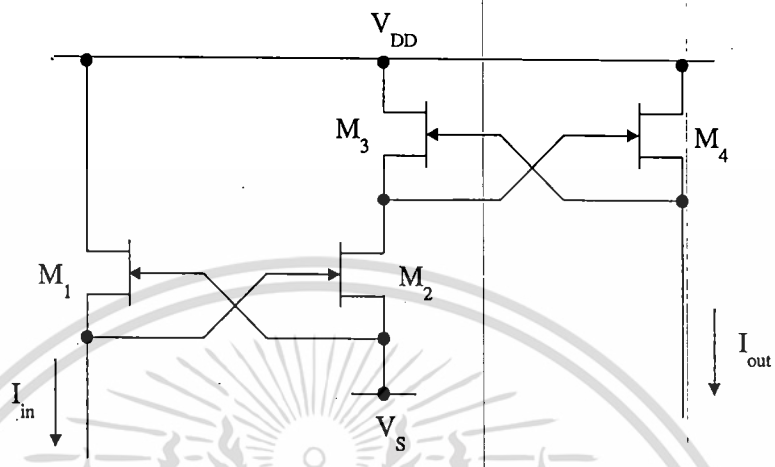
หรือ
$$I_{out} = \left(\frac{W_4}{W_1}\right).I_{in} \tag{2.1.10}$$

นั่นคือสมการที่ (2.1.10) แสดงให้เห็นว่าวงจรรูปที่ 2.1.3 มีลักษณะการทำงานเชิงเส้นด้วยอัตราขยายกระแสเท่ากับ W_4/W_1 และไม่กลับทิศทาง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าถ้าเลือกให้เมสเฟททุกตัวในวงจรมีคุณสมบัติสมพงษ์กันแล้วจะได้ $I_{in} = I_{out}$ โดยประมาณ

ดังนั้นสามารถแสดงผลตอบสนองทางความถี่ระหว่างกระแสจุดออก, I_{out} และกระแสจุดเข้า, I_{in} กรณีสัญญาณขนาดเล็กได้ดังนี้ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{i(S)} = \frac{I_{out(S)}}{I_{in(S)}} = \frac{\left(g_{m2} - sC_{gd2}\right)\left(g_{m4} + sC_A\right)}{\left(g_{m1} + sC_B\right)\left(g_{m3} + sC_C\right) + sC_{gd2}\left(g_{m2} - sC_{gd2}\right)} \qquad (2.1.11)$$



รูปที่ 2.1.3 : วงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบลบ

เมื่อ $C_A = C_{gs3} + C_{gs4}$, $C_B = C_{gs1} + C_{gs2} + C_{gd2}$ และ $C_C = C_{gd2} + C_{gd4} + C_{gs3} + C_{gs4}$

การส่งผ่านกระแสดีซีระหว่างกระแสจุดออก I_{out} และกระแสจุดเข้า I_{in} จึงเท่ากับ

$$I_{out} = \frac{g_{m2}g_{m4}}{\left(g_{m1} + g_{d1}\right)\left(g_{m3} + g_{d2} + g_{d3}\right)} I_{in} \qquad (2.1.12)$$

และค่าความต้านทานที่จุดเข้าของวงจรเมื่อพิจารณาเข้าไปยังขาซอร์สของเมสเฟท M_1 จะมีค่าเท่ากับ

$$r_{in} = \frac{1}{g_{m1}} \qquad (2.1.13)$$

สำหรับค่าความต้านทานจุดออกของวงจรในรูปที่ 2.1.3 มีค่าเท่ากับ

$$r_{out} = \frac{1}{g_{d4}} \qquad (2.1.14)$$

เมื่อ g_{mi} คือค่าอัตราขยายความนำของสัญญาณขนาดเล็กในเมสเฟท M_i และ g_{di} คือค่าความนำระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สของเมสเฟท M_i ถ้าเมสเฟททุกตัวมีคุณสมบัติสมพงษ์กันทุกประการแล้วจะได้

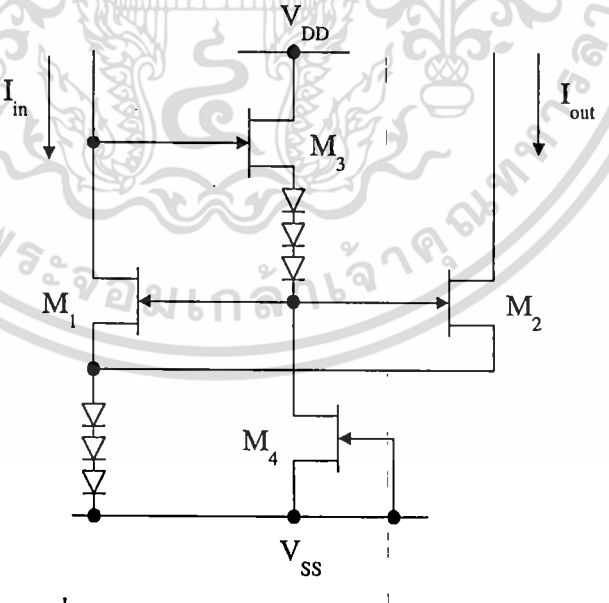
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$g_{mi} = g_m$ และ $g_{di} = g_d$ ดังนั้นค่าความผิดพลาด (error) ในการส่งผ่านกระแสจากจุดเข้าไปยังจุดออกจะมีค่าเท่ากับ [2]

$$\text{ค่าผิดพลาด} = 3\left(\frac{g_d}{g_m}\right) + 2\left(\frac{g_d}{g_m}\right)^2 \cong 3\left(\frac{g_d}{g_m}\right) \qquad (2.1.15)$$

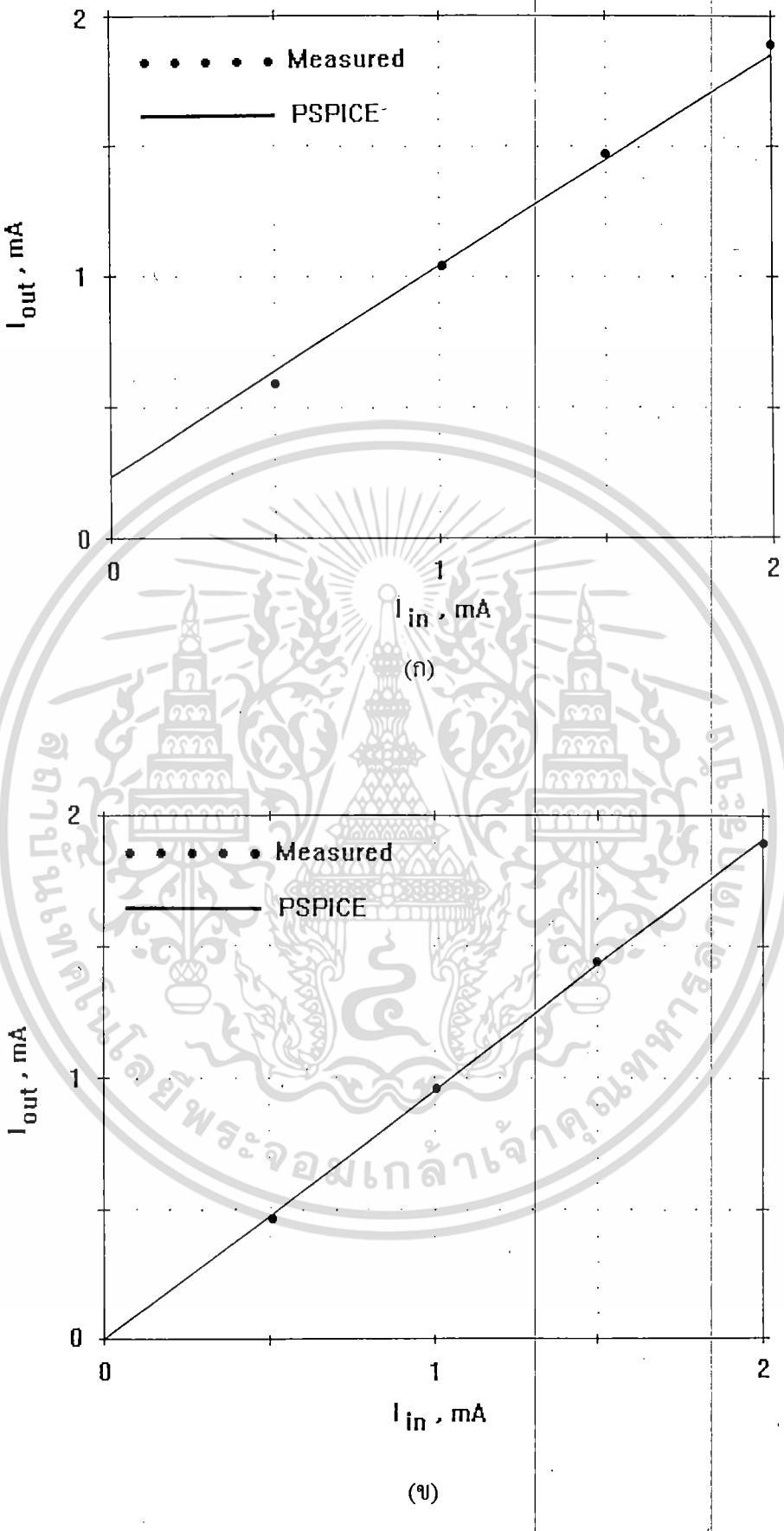
2.1.3 วงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบบวก

วงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบบวกดังแสดงในรูปที่ 2.1.4 ถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย N. Scheinberg [3] โดยที่เมสเฟท M_3 ทำหน้าที่เป็นวงจรซอร์สตาม (source follower) จากวงจรจะเห็นว่าขาเกทและขาซอร์สของ M_2 ต่อโดยตรงกับขาเกทและขาซอร์สของ M_1 (นั่นคือ $V_{GS1} = V_{GS2}$) ดังนั้นถ้าความกว้างขาเกท (gate width, W) ของ M_1 กับ M_2 เท่ากันแล้ว กระแสจุดออก, I_{DS2} จะสะท้อนกระแสมาจากจุดเข้า, I_{DS1} หรือนั่นคือ $I_{in} \cong I_{out}$ ในขณะที่เมสเฟท M_4 นั้นทำหน้าที่เป็นวงจรดึงกระแสคงที่ (current source) ผลตอบสนองทางความถี่ระหว่างกระแสจุดออก I_{out} และกระแสจุดเข้า I_{in} สำหรับสัญญาณขนาดเล็กสามารถแสดงได้ดังนี้ได้ดังนี้ [2]



รูปที่ 2.1.4 : วงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบบวก

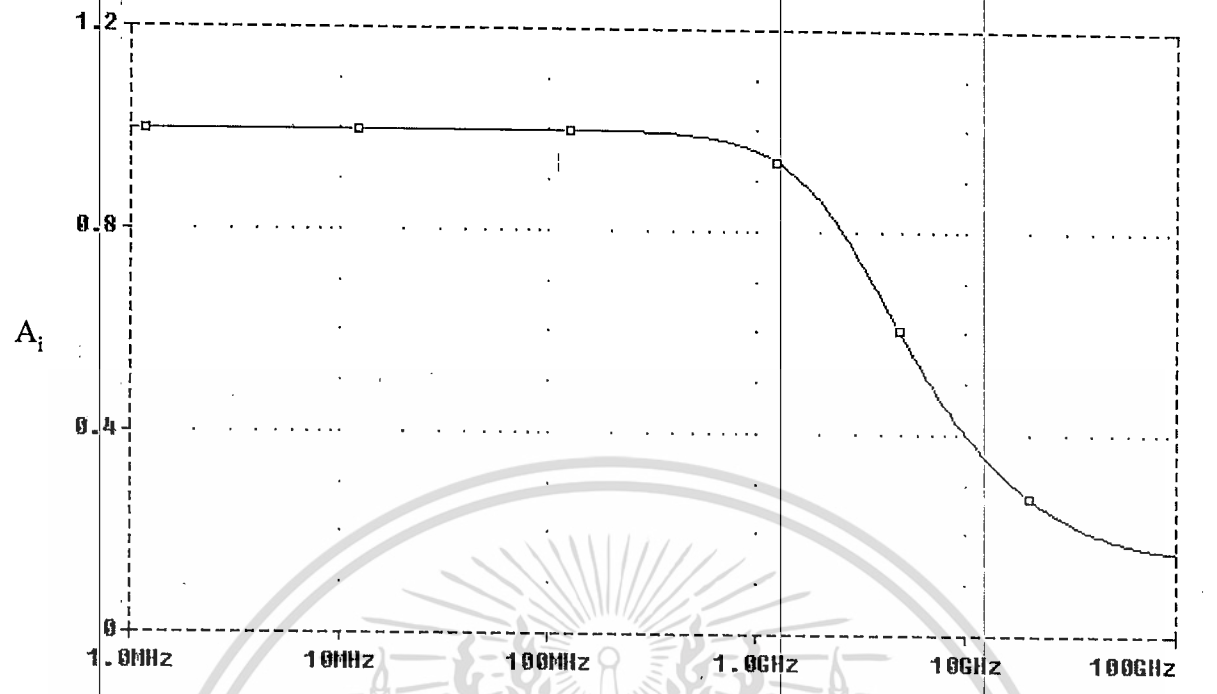
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



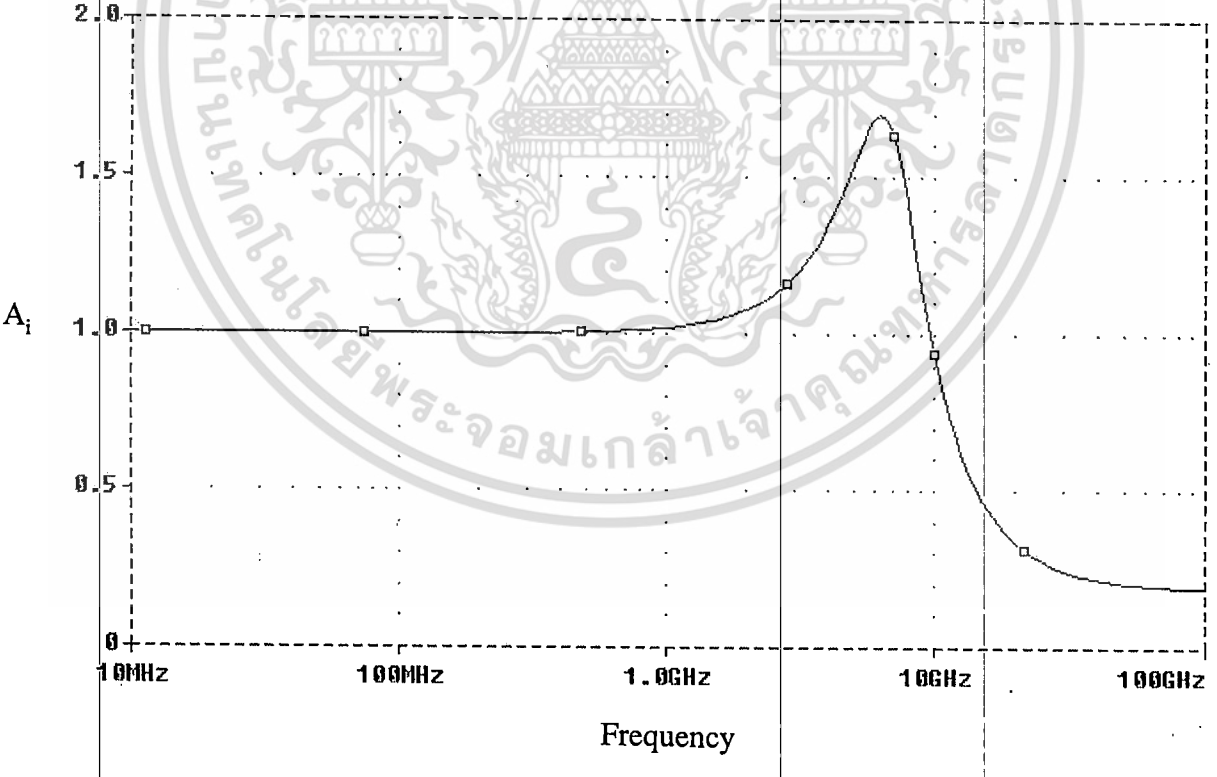
รูปที่ 2.1.5 : คุณสมบัติระหว่างกระแส I_{in} กับ I_{out} ของวงจร GaAs สะท้อนกระแส

(ก) แบบลบ (ข) แบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1.6 : ผลตอบสนองความถี่ของวงจร GaAs สะท้อนกระแส

(ก) แบบลบ (ข) แบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการผลิต n-channel depletion-mode GaAs MESFETs ที่ความกว้างและความยาวขาเกทเท่ากับ 1 μm

ผลการทดลองและผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.1.5 ซึ่งจะเห็นว่ากระแสจุดเข้าของวงจร, I_{in} สามารถสะท้อนส่งผ่านไปเป็นกระแสจุดออกของวงจร, I_{out} ได้อย่างแม่นยำทั้งยังมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงปฏิบัติงานสูง

สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรนั้นเนื่องจากอุปกรณ์เมสเฟทที่ใช้ในการทดลองเป็นลักษณะของอุปกรณ์จำพวกดิสครีต (discrete) จึงทำให้มีผลของค่าความจุไฟฟ้าแฝง (stray capacitance) ในแผงทดลองมาก ดังนั้นในที่นี้การวิเคราะห์หาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรได้ใช้โปรแกรม PSPICE ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจร ดังผลที่แสดงในรูปที่ 2.1.6 ซึ่งจากเงื่อนไขในการทำงานของวงจรที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าวงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบลบมีค่า $g_{m1} = 1.83\text{x}10^{-4}$ A/V , $g_{m2} = 2.41\text{x}10^{-3}$ A/V , $g_{m3} = 2.85\text{x}10^{-3}$ A/V , $g_{m4} = 6.62\text{x}10^{-4}$ A/V , $C_{gs1} = 3.29\text{x}10^{-15}$ F, $C_{gs2} = 8.52\text{x}10^{-15}$ F , $C_{gs3} = 7.72\text{x}10^{-15}$ F , $C_{gs4} = 4.50\text{x}10^{-15}$ F และ $C_{gd1} = C_{gd2} = C_{gd3} = C_{gd4} = 6.28\text{x}10^{-15}$ F สำหรับวงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบบวกมีค่า $g_{m1} = g_{m2} = 2.07\text{x}10^{-3}$ A/V , $g_{m3} = g_{m4} = 1.84\text{x}10^{-3}$ A/V , $C_{gs1} = C_{gs2} = 6.24\text{x}10^{-15}$ F , $C_{gs3} = 5.86\text{x}10^{-15}$ F และ $C_{gd1} = C_{gd2} = C_{gd3} = 6.28\text{x}10^{-15}$ F ดังนั้นเมื่อแทนค่าต่างๆเหล่านี้ลงในสมการผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรที่ได้คาดการณ์เอาไว้ในสมการที่ (2.1.11) และ (2.1.16) จะเห็นว่าปรากฏผลใกล้เคียงกันกับผลที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ในรูปที่ 2.1.6

3 วงจรทรานคอนดัคเตอร์แบบใช้ GaAs MESFETs

วงจรทรานคอนดัคเตอร์เป็นวงจรซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนศักดาให้เป็นกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อเมสเฟท M_1 และ M_2 มีคุณสมบัติสมพงษ์กันแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาจุดเข้าและกระแสผลต่างจุดออกระหว่างกระแสเดรนของ M_1 , M_2 จะอยู่ในรูปของค่าความนำของวงจรดังนี้

$$I_{out} = \Delta I_D = I_{D2} - I_{D1} = G_m V_{in} \tag{3.1}$$

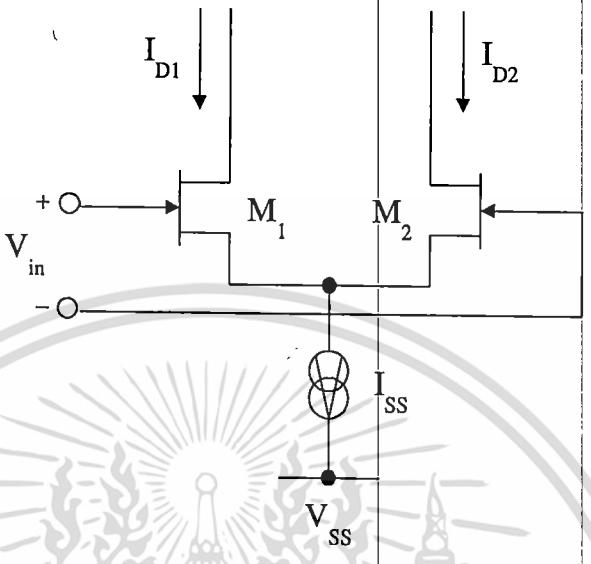
หรือ

$$G_m = \frac{I_{out}}{V_{in}} \tag{3.2}$$

เมื่อ V_{in} เป็นศักดาผลต่างจุดเข้าของวงจร เท่ากับ $V_1 - V_2$ I_{out} เป็นผลต่างของกระแสจุดออกและ G_m คือค่าความนำ (transconductance) ของวงจร ซึ่งกระแสไบอัสจะเป็นผลรวมของกระแสเดรนของเมสเฟท M_1 กับ M_2 นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{SS} = I_{D1} + I_{D2} \tag{3.3}$$



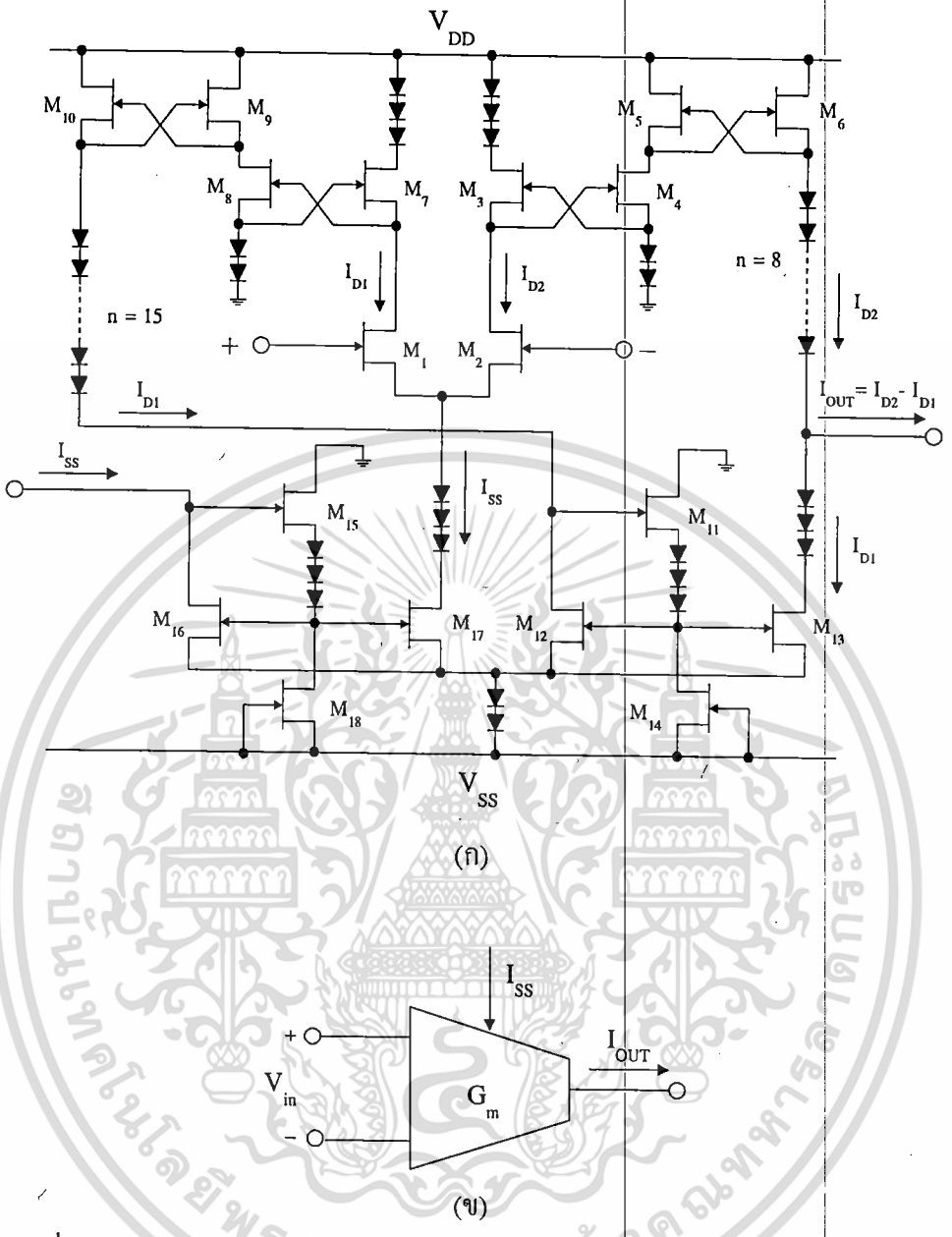
รูปที่ 3.1 : วงจร GaAs ทรานคอนดัคเตอร์พื้นฐาน

4 วงจรขยายค่าความนำโดยใช้ GaAs MESFETs

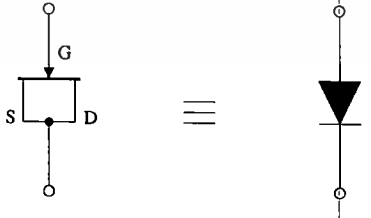
วงจรขยายค่าความนำโดยใช้อุปกรณ์เมสเฟท แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยวงจรส่วนหน้าที่เป็นวงจรทราน-คอนดัคเตอร์พื้นฐาน M_1, M_2 วงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบลบ M_3-M_6 , M_7-M_{10} และแบบบวก M_{11}-M_{14} ที่มีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่ง เพื่อทำหน้าที่รักษากระแสเดรนของ M_1 (I_{D1}) ให้เท่ากับกระแสเดรนของ M_{13} (I_{D13}) และกระแสเดรนของ M_2 (I_{D2}) ให้เท่ากับกระแสเดรนของ M_6 (I_{D6}) ตามลำดับ ดังนั้นจึงทำให้กระแสที่จุดออกของวงจร I_{out} มีค่าเท่ากับผลต่างของกระแส I_{D1} กับ I_{D2} ตามสมการที่ (3.1) โดยที่วงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบ บวก M_{15}-M_{18} ทำหน้าที่ปรับค่ากระแสไบอัส I_{SS} และไดโอดในวงจรจะทำหน้าที่จัดระดับสัญญาณดีซีไบอัสเพื่อไบอัสให้เมสเฟททุกตัวทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว ซึ่งไดโอดดังกล่าวจะอาศัยโครงสร้างที่เป็นรอยสัมผัสชอร์สกี้ไดโอดบริเวณเกทของเมสเฟทซึ่งทำได้โดยการลัดวงจรที่ขาเดรนกับขาซอร์สดังแสดงได้ในรูปที่ 4.2 ดังนั้นเมื่อเมสเฟททุกตัวทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัวแล้วความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับศักดาเกท-ซอร์สของเมสเฟทจะมีคุณสมบัติเป็นไปตามกฎกำลังสองดังนี้

$$I_D = I_{DSS}\left[1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right]^2 \tag{4.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 : (ก) วงจรขยายค่าความนำแบบใช้ GaAs MESFETs (ข) สัญลักษณ์



รูปที่ 4.2 : ชอร์สกี้ไดโอดที่ต่อโดยใช้ GaAs MESFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_{DSS} คือกระแสเดรนอิ่มตัวของเมสเฟทที่ $V_{GS} = 0$ และ V_T คือศักดาขีดเริ่ม (threshold voltage) ดังนั้นจากสมการที่ (4.1) และ (4.4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจุดออก I_{out} กับศักดาผลต่าง V_{in} ของวงจรดังนี้

$$I_{out} = \left[\left(\sqrt{KI_{SS}}\right)\left(\sqrt{1-\frac{KV_{in}^2}{4I_{SS}}}\right)\right]V_{in} \tag{4.2}$$

โดยที่ ที่ $K = \frac{2I_{DSS}}{V_T^2}$ ดังนั้นค่าความนำรวมของวงจร G_m มีค่าเท่ากับ

$$G_m = \frac{\partial(I_{out})}{\partial(V_{in})}\bigg|V_{in} = 0 = \sqrt{KI_{SS}} \tag{4.3}$$

ช่วงศักดาปฏิบัติงานสูงสุดของวงจร $V_{in(max)}$ เท่ากับ

$$\left|V_{in(\max)}\right| \le V_T\sqrt{\frac{2I_{SS}}{I_{DSS}}} \tag{4.4}$$

จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของวงจรนั้นขึ้นกับกระแสไบอัส I_{SS} ดังนั้นจึงสามารถควบคุมค่าความนำตลอดจนช่วงศักดาในการปฏิบัติงานของวงจรได้อย่างสะดวกด้วยการปรับค่าของกระแส I_{SS} ดังผลการทำงานของวงจรที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

ส่วนการวิเคราะห์หาผลตอบสนองความถี่ในการปฏิบัติงานของวงจร หาได้โดยแทนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเมสเฟทสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก (ตามที่เสนอในเอกสารอ้างอิงที่ 5 บทที่ 4) โดยพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างเกทกับซอร์ส C_{gs} และค่าความจุไฟฟ้าระหว่างเกทกับเดรน C_{gd} เป็นหลัก ซึ่งจะได้ฟังก์ชันการส่งผ่าน (transfer function) ของวงจรดังนี้

$$G_{m(S)} = \frac{i_{out(S)}}{v_{in(S)}} = \frac{g_m(g_{m4} - sC_A)(g_{m6} + sC_B)}{(g_{m3} + sC_C)(g_{m5} + sC_D) + sC_A(g_{m4} - sC_A)} \tag{4.5}$$

โดยที่ $g_m = g_{m1} = g_{m2}$, $g_{m3} = g_{m7}$, $g_{m4} = g_{m8}$, $g_{m5} = g_{m9}$, $g_{m6} = g_{m10}$ และ $C_A = C_{gd4}$, $C_B = C_{gs5} + C_{gs6}$, $C_C = C_{gs3} + C_{gs4} + C_{gd4}$, $C_D = C_{gd4} + C_{gd6} + C_{gs5} + C_{gs6}$ เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g_{mi} , C_{gsi} , C_{gdi} คือ ค่าความนำ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างเกทกับซอร์ส ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างเกทกับเดรนของเมสเฟท M_i ตามลำดับ

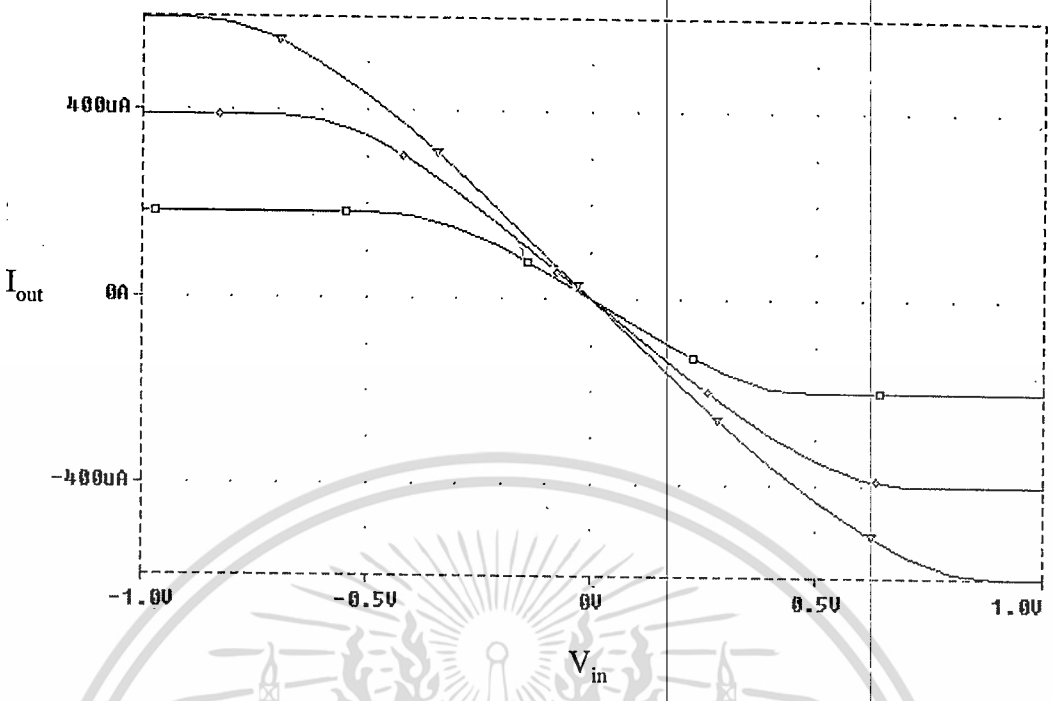
ความต้านทานจุดออกของวงจรจะเท่ากับความต้านทานจุดออกของวงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบลบ M_3-M_6 ขนานกับความต้านทานจุดออกของวงจร GaAs สะท้อนกระแสแบบบวก M_{11}-M_{14}

4.1 ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรในบทความนี้ได้ใช้โปรแกรม PSPICE ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจร โดยที่แบบจำลองของอุปกรณ์เมสเฟทจะใช้ตามเทคโนโลยี STL P1 PROCESS ของบริษัท STL ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการผลิตอุปกรณ์เมสเฟทชนิดเอ็นที่มีความกว้าง (W) และความยาว (L) ขาเกทเท่ากับ 1 μm เมื่อความกว้างขาเกทของเมสเฟททุกตัวที่ใช้ในวงจรมีค่าเท่ากับ 16 μm และ V_{DD} = +7.5 V , V_{SS} = -7.5 V กระแส I_{SS} ปรับให้มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็น 0.2, 0.4, 0.6 mA ตามลำดับ ศักดาผลต่างที่ป้อนให้กับวงจรแปรค่าอยู่ในช่วง -1 V ถึง +1 V จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาผลต่างจุดเข้ากับกระแสจุดออกของวงจรดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.4 และจากเงื่อนไขในการทำงานของวงจรตามที่กำหนดข้างต้น เมื่อแทนค่า V_T = -1 V , I_{DSS} = 1.6 mA ลงในสมการที่ (4.4) แล้ว ช่วงศักดาปฏิบัติงานสูงสุดของวงจร $V_{in(max)}$ จะมีค่าเท่ากับ $\pm$0.50V , $\pm$0.71V และ $\pm$0.87V ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าปรากฏผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ในรูปที่ 4.3

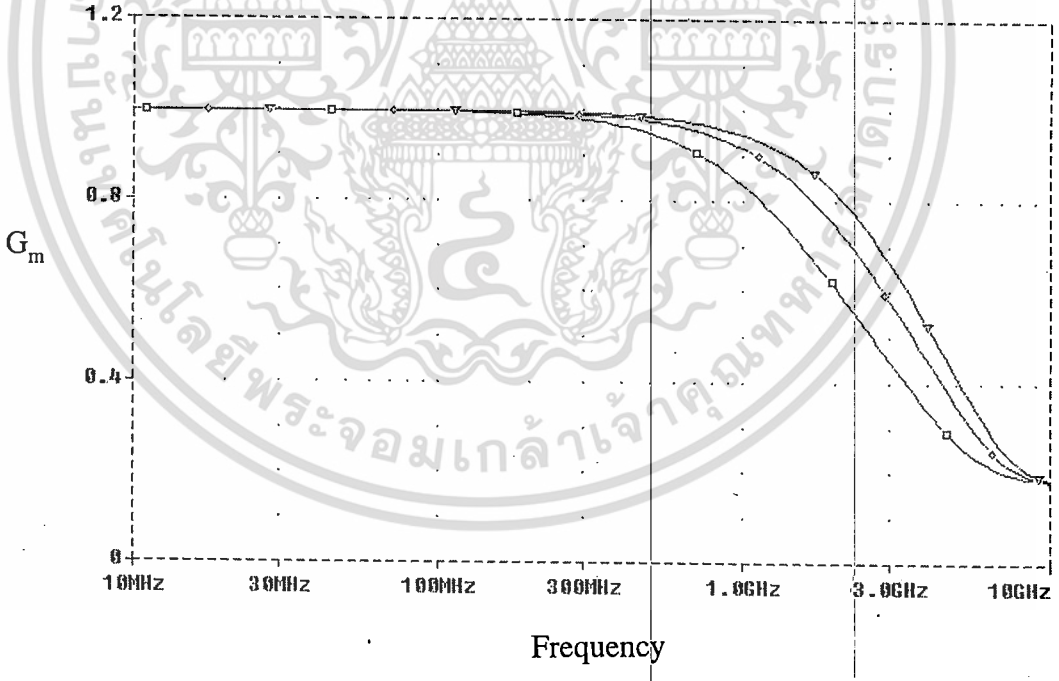
ผลตอบสนองความถี่ของวงจรที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าที่กระแสไบอัส I_{SS} แปรค่าเป็น 0.2 mA, 0.4 mA และ 0.6 mA ตำแหน่งความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) ของวงจรมีค่าเป็น 1.56 GHz, 2.26 GHz และ 2.77 GHz ตามลำดับ เมื่อนำมาพิจารณาเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันการส่งผ่านตามสมการที่ (4.5) ตัวอย่างเช่น ที่ I_{SS} = 0.2 mA จะได้ค่า $g_m = g_{m3} = g_{m6} = 6.55\text{x}10^{-4}$ A/V , $g_{m4} = g_{m5} = 2.83\text{x}10^{-3}$ A/V , $C_{gs3} = C_{gs6} = 4.56\text{x}10^{-15}$ F, $C_{gs4} = C_{gs5} = 7.87\text{x}10^{-15}$ F และ $C_{gd3} = C_{gd4} = C_{gd5} = C_{gd6} = 6.30\text{x}10^{-15}$ F ดังนั้นเมื่อแทนนำค่าต่างๆเหล่านี้แทนลงในสมการและแปรค่าความถี่ไปพบว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรที่ได้จากการคาดการณ์เอาไว้จากสมการที่ (4.5) ให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 : กราฟคุณสมบัติระหว่าง I_{out} กับ V_{in} ของวงจร

เมื่อ □: I_{SS} = 0.2 mA , ◊ : I_{SS} = 0.4 mA และ ∇ : I_{SS} = 0.6 mA



รูปที่ 4.4 : ผลตอบสนองความถี่ของวงจร

เมื่อ □: I_{SS} = 0.2 mA , ◊ : I_{SS} = 0.4 mA และ ∇ : I_{SS} = 0.6 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

วงจรขยายค่าความนำที่ออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีแกลเลี่ยมอาร์เซไนด์ที่นำเสนอมาข้างต้น นอกจากวงจรที่ได้จะมีประสิทธิภาพที่ดี มีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงการปฏิบัติงานสูงแล้ว ยังมีขอบเขตในการใช้ประยุกต์งานกว้างขวางอีกด้วย เนื่องจากสมรรถนะของวงจรดังกล่าวสามารถควบคุมปรับค่าความนำของวงจรได้ง่ายและสะดวก ทั้งยังมีผลตอบสนองเชิงความถี่ในช่วงปฏิบัติงานสูงมาก ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ที่ปรากฏผลใกล้เคียงสอดคล้องกันเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ

เอกสารอ้างอิง

[1] C.Toumazou, D.G.Haigh,"Design and application of GaAs MESFET current mirror circuits" , IEE Proceeding_, Vol. 137, Pt. G, No. 2, April 1990, pp.101-108

[2] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, วันชัย ริ้วรุจา, จเร สุรวัฒน์ปัญญา,วัลลภ สุระกำพลธร , "การศึกษาคุณสมบัติของวงจรสะท้อนกระแสความถี่สูงโดยใช้ GaAs MESFETs", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17, ธันวาคม 2537 , หน้า 487- 491

[3] N. Scheinberg, "A High-Speed GaAs Operational Amplifier", IEEE J.Solid-State Cicuit, SC-22(4), pp.522-527, Aug. 1987

[4] Microsim Corp., "PSPICE", Laguna Hills, CA 92653, U.S.A., May 1993

[5] W.R.Curtice,"A MESFET Model for Use in the Design of GaAs Integrated Circuits", IEEE Trans. MTT, MTT-29 (5), pp.448-456, 1980

[6] H. Statz, P. Newman, I.W. Smith, R.A. Pucel , and H.A. Haus, " GaAs FET Device and Circuit Simulation in SPICE", IEEE Trans. on Electron Devices, ED-34, pp.160-169, Feb. 1987

[7] A.J. McCamant, G.D. McCormack, and D.H. Smith, "An Improved GaAs MESFET Model for SPICE", IEEE Trans. MTT, June 1990

[8] S.J. Harrold, "An introduction to GaAs IC Design", Prentice-Hall International, 1997

[9] R.Goval, "High-Frequency Analog Integrated Circuit Design", John Wiley & Sons, 1995

[10] C. Toumazou, F.J. Lidgey, and D.G. Haigh, eds., " Analogue IC Design the Current-Mode Approach", Peter Peregrinus, London, April 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้