บทที่ 7

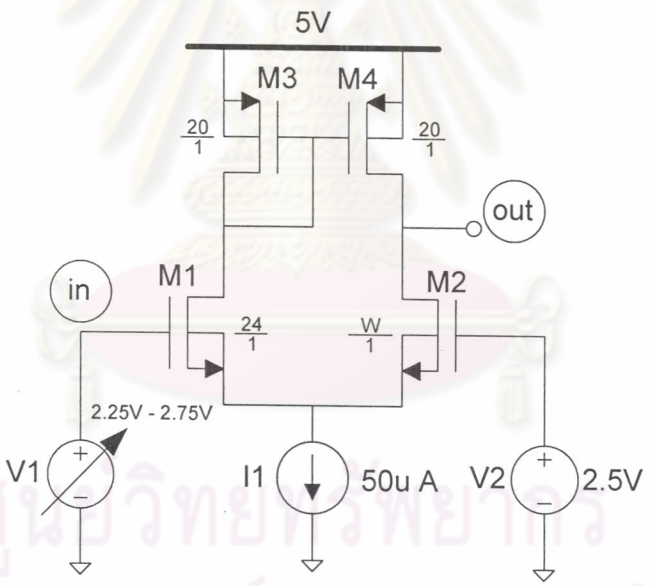
การทดสอบ และสรุปผล

ในบทนี้จะเป็นการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณค่ากระแสเดรน ผลของตัวเก็บประจุที่เกต และผลของไดโอดในการจำลองการทำงานจริง โดยเปรียบเทียบกับโปรแกรม Star-HSpice

7.1 ผลการทดสอบ

7.1.1 วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier)

วงจรขยายผลต่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 7.1 รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2



รูปที่ 7.1 วงจรขยายผลต่าง

จากวงจรในรูปที่ 7.1 กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ M1 และ M2 ถูกกำหนดไว้ด้วยแหล่งจ่ายกระแส I1 ถ้าป้อนแรงดันขาเข้าให้มีค่าน้อยกว่าแรงดันที่โนดเกตของทรานซิสเตอร์ M2 จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ M1 มีค่าน้อยกว่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ M2 ส่งผลให้แรงดันขาออกมีค่าต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบเอ็นที่ใช้ในวงจรขยายผลต่าง

WD = 0	LD = 0	KP = 20.72e-6
VT0 = 1	LAMBDA = 0.1	GAMMA = 527.63e-3
PHI = 579.84e-3	COX = 345.31e-6	IS = 1e-14
CJ = 50e-6	CJSW = 0	MJ = 0
MJSW = 0.33	TT = 0	ACM = 0
N = 1	NDS = 1	VNDS = -1

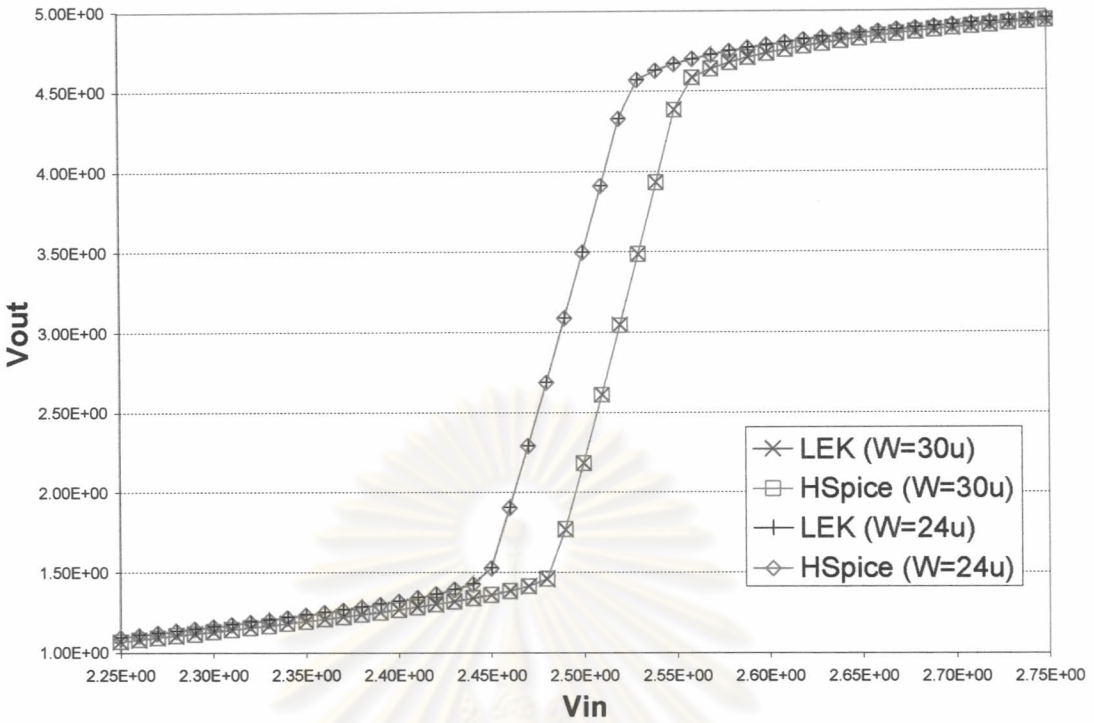
ตารางที่ 7.2 ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบพีที่ใช้ในวงจรขยายผลต่าง

WD = 0	LD = 0	KP = 8.63e-6
VT0 = -1	LAMBDA = 0.1	GAMMA = 527.63e-3
PHI = 579.84e-3	COX = 345.31e-6	IS = 1e-14
CJ = 50e-6	CJSW = 0	MJ = 0
MJSW = 0.33	TT = 0	ACM = 0
N = 1	NDS = 1	VNDS = -1

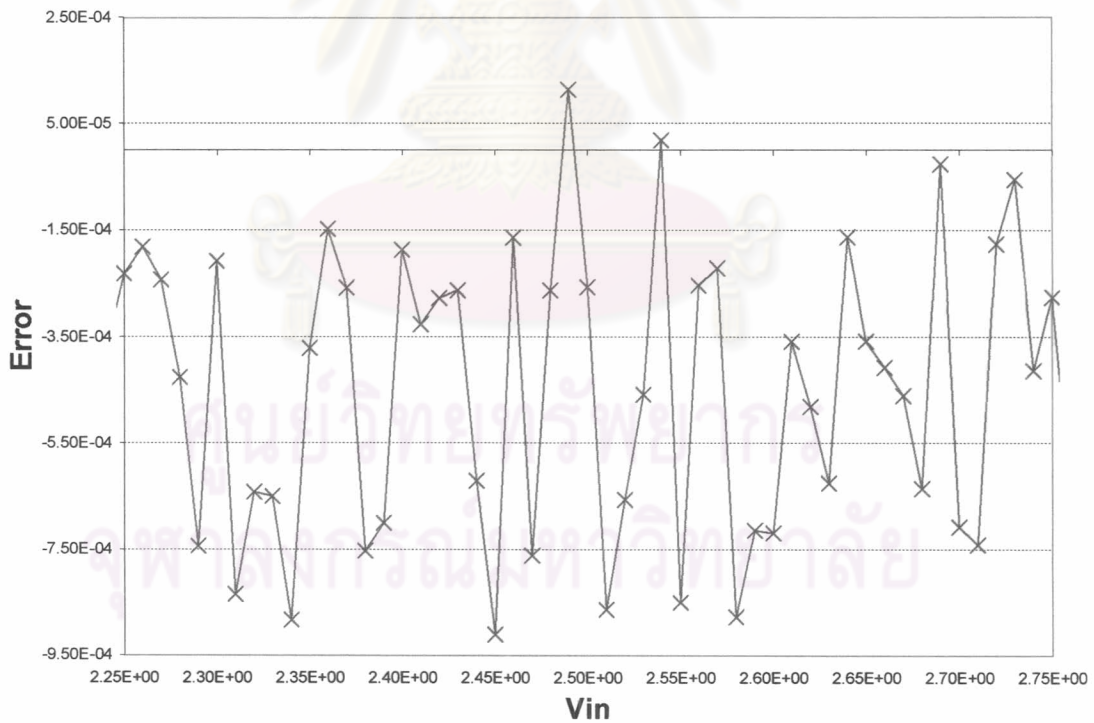
เมื่อปรับค่าแรงดันขาเข้าให้มีค่ามากขึ้น จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ M1 มีค่ามากขึ้น เป็นผลทำให้กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ M2 มีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงดันขาออกมีค่าสูงขึ้น ผลการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 7.2

รูปที่ 7.2 เป็นผลการทดสอบเปรียบเทียบเมื่อกำหนดให้ความกว้างของทรานซิสเตอร์ M2 มีค่าเท่ากับ 24μ ซึ่งเป็นค่าความกว้างที่เท่ากับทรานซิสเตอร์ M1 และเมื่อเปลี่ยนค่าความกว้างของทรานซิสเตอร์ M2 เป็น 30μ จะพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าความกว้างเปลี่ยนไปจะส่งผลให้เกิดออฟเซตขึ้น

ค่าความผิดพลาดของการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม Star-HSpice โดยใช้ค่าความกว้างของทรานซิสเตอร์ M2 เท่ากับ 30μ แสดงไว้ดังรูปที่ 7.3 โดยมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 9.23e-4 หรือคิดเป็นร้อยละไม่เกิน 0.087



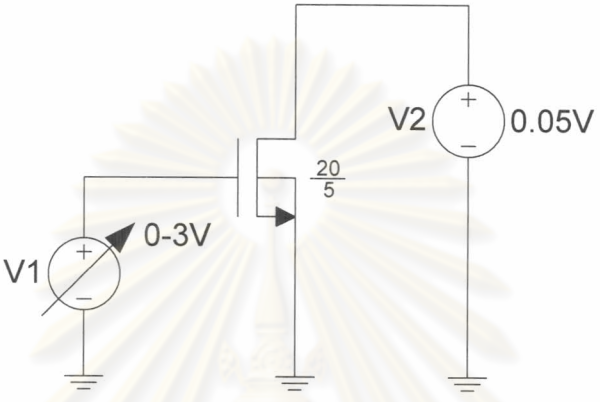
รูปที่ 7.2 ค่าแรงดันขาออก



รูปที่ 7.3 ค่าความผิดพลาด

7.1.2 วงจรทดสอบตัวเก็บประจุที่เกต

วงจรที่ใช้ทดสอบตัวเก็บประจุที่โนดเกตแสดงได้ดังรูปที่ 7.4 วงจรนี้เป็นการทดสอบค่าตัวเก็บประจุที่เกตด้วยการป้อนแรงดันแบบกวาดให้กับโนดเกต แล้วทำการเก็บค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสที่ใช้ในการคำนวณมีดังตารางที่ 7.3

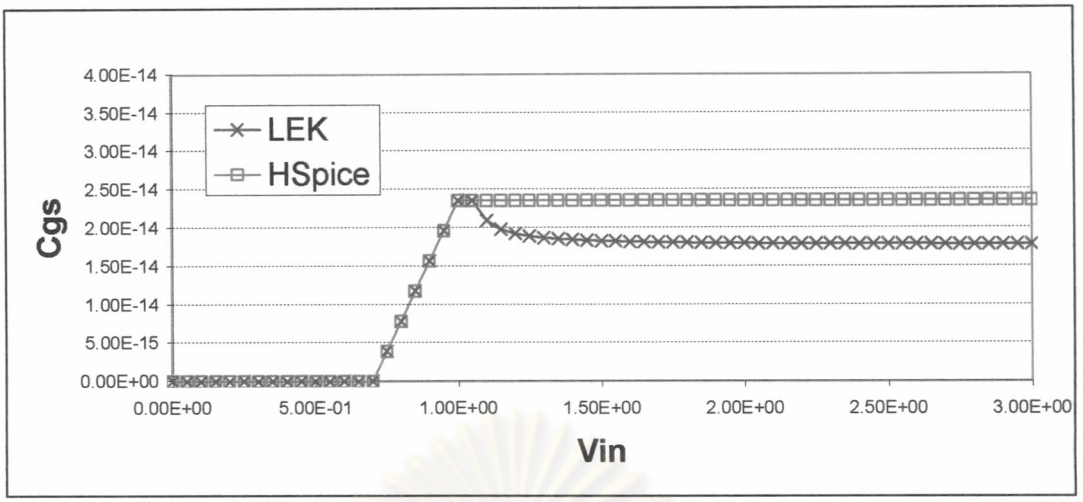


รูปที่ 7.4 วงจรทดสอบตัวเก็บประจุที่โนดเกต

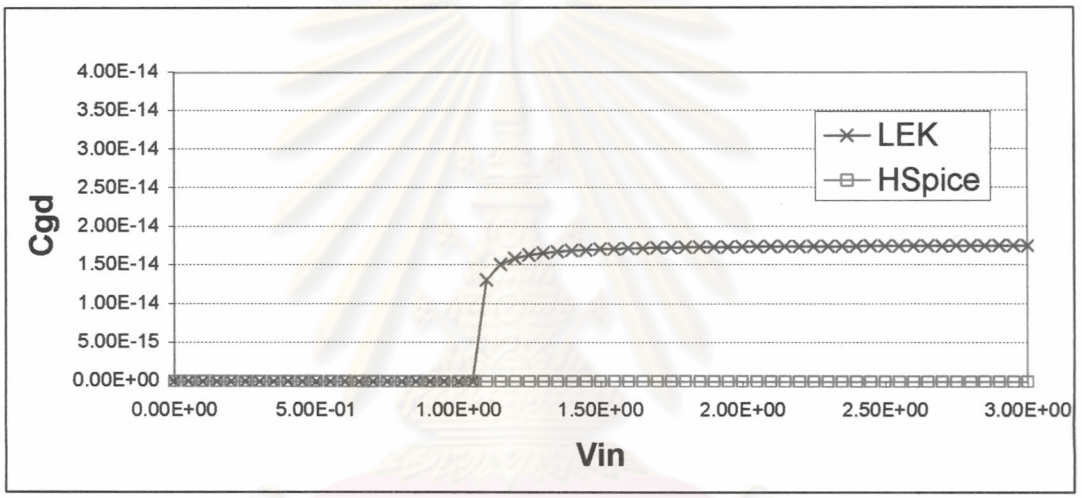
ตารางที่ 7.3 ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบเอ็น

WD = 0	LD = 0	KP = 28.88e-6
VT0 = 1	LAMBDA = 0	GAMMA = 1.4
PHI = 0.6	COX = 353.44e-6	IS = 1e-14
CJ = 0	CJSW = 0	MJ = 0.5
MJSW = 0.33	TT = 0	ACM = 0
N = 1	NDS = 1	VNDS = -1

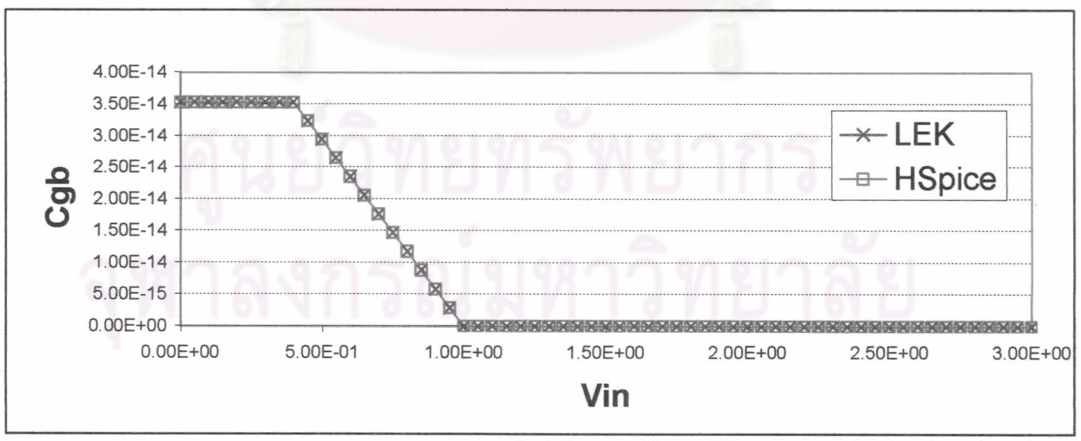
จากวงจรในรูปที่ 7.4 เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวเก็บประจุที่ได้กับโปรแกรม Star-HSpice จะได้ผลดังรูปที่ 7.5 ซึ่งจะเห็นว่าค่าตัวเก็บประจุ C_{gs} และ C_{gd} ที่คำนวณได้ในช่วงเชิงเส้น (ตั้งแต่แรงดันขาเข้าเท่ากับ 1.05 โวลต์) ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสมีค่าไม่ตรงกัน และแนวโน้มของค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากโปรแกรม Star-HSpice ไม่ตรงกับสมการที่นิยามไว้ ดังนั้นเราจึงทำการทดลองด้วยการเปลี่ยนค่าระดับ (level) ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสในโปรแกรม Star-HSpice ไปเป็นระดับ 2 แล้วทำการทดลองเช่นเดิมอีกครั้ง ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 7.6



(ก) C_{gs}

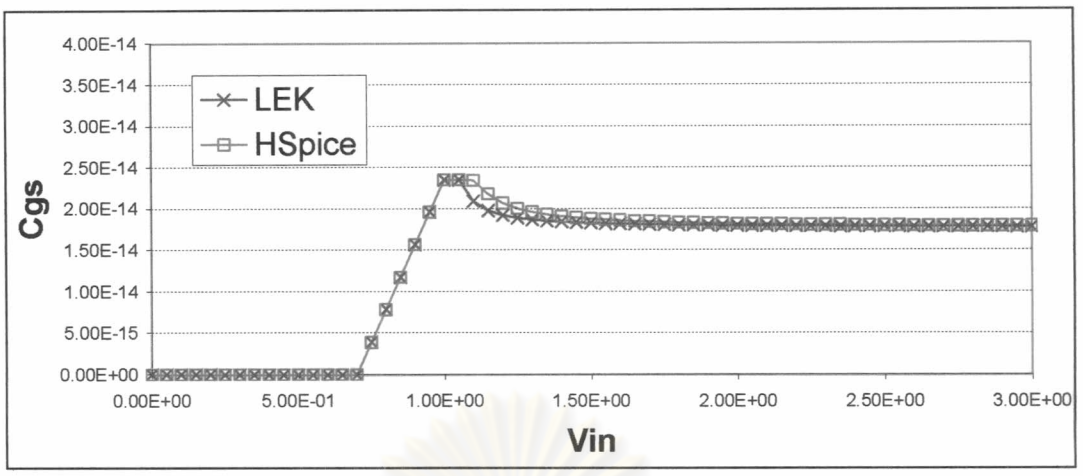


(ข) C_{gd}

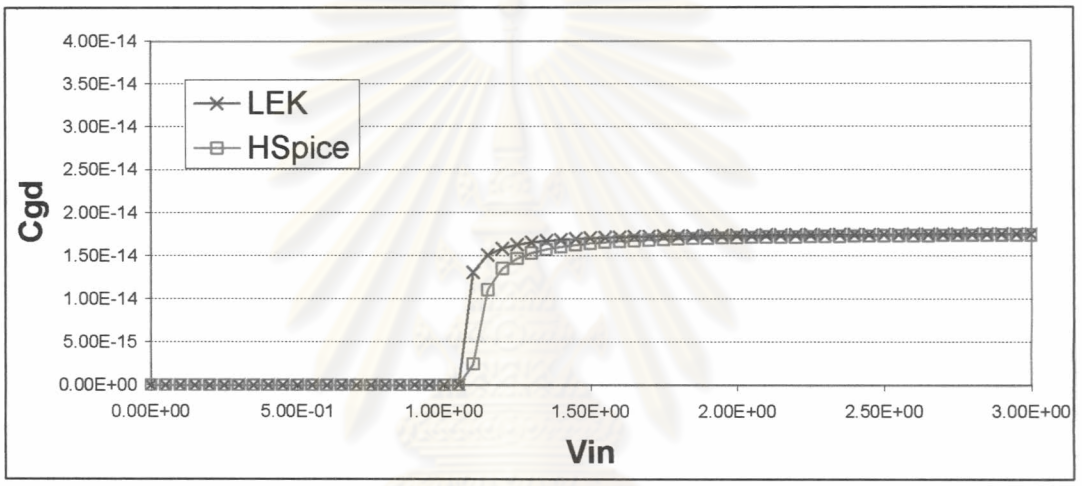


(ค) C_{gb}

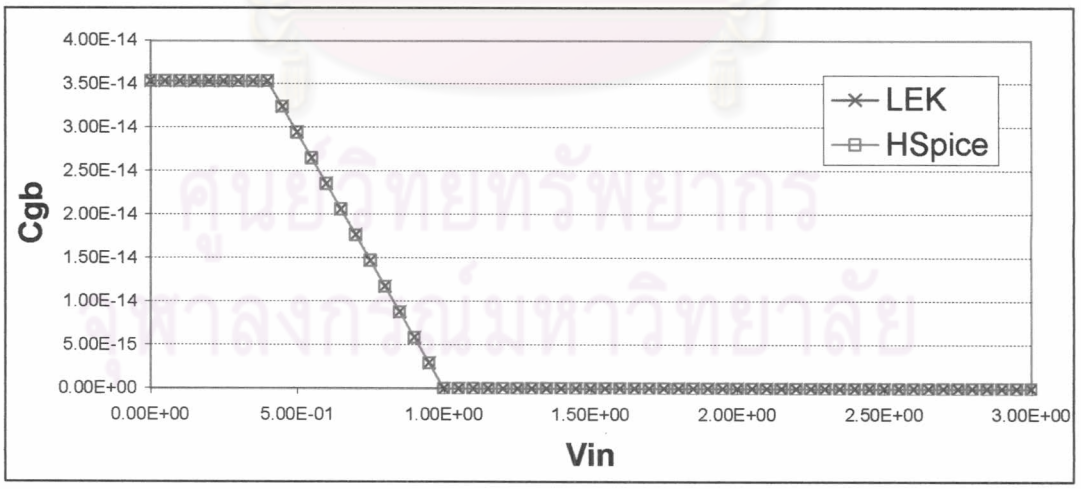
รูปที่ 7.5 ค่าตัวเก็บประจุที่เกต



(ก) C_{gs}



(ข) C_{gd}

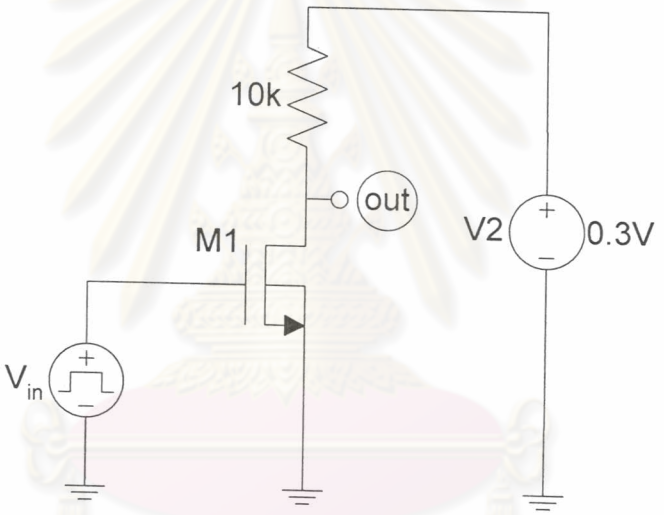


(ค) C_{gb}

รูปที่ 7.6 ค่าตัวเก็บประจุที่เกตเปรียบเทียบกับค่าระดับ 2 ในโปรแกรม Star-HSpice

จากรูปที่ 7.6 จะเห็นว่าแนวโน้มของค่าตัวเก็บประจุในช่วงเชิงเส้นที่คำนวณได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Star-HSpice มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ก็ยังมีความผิดพลาดอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากค่าแรงดันอิ่มตัวที่โปรแกรม Star-HSpice คำนวณเมื่อใช้ค่าระดับ 2 ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสมีสมการที่ไม่เหมือนกัน และค่าแรงดันอิ่มตัวนี้เป็นพารามิเตอร์หนึ่งในการคำนวณค่าตัวเก็บประจุในช่วงเชิงเส้น

จะเห็นว่าค่าตัวเก็บประจุในช่วงเชิงเส้นที่คำนวณได้จะมีค่าไม่ตรงกับ Star-HSpice ดังนั้นจะทำให้ผลของการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสในช่วงเชิงเส้นมีค่าไม่ตรงกันด้วย เพื่อให้เห็นผลที่เกิดขึ้นจากการที่ตัวเก็บประจุมีค่าไม่ตรงกันนี้ เราจะทดลองด้วยวงจรซอร์สร่วมดังรูปที่ 7.7 โดยเลือกค่าแรงดัน V2 เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ M1 ทำงานในช่วงเชิงเส้น ในการทดลองนี้เลือกค่า V2 เท่ากับ 0.3 โวลต์ และป้อนแรงดันขาเข้าดังรูปที่ 7.8

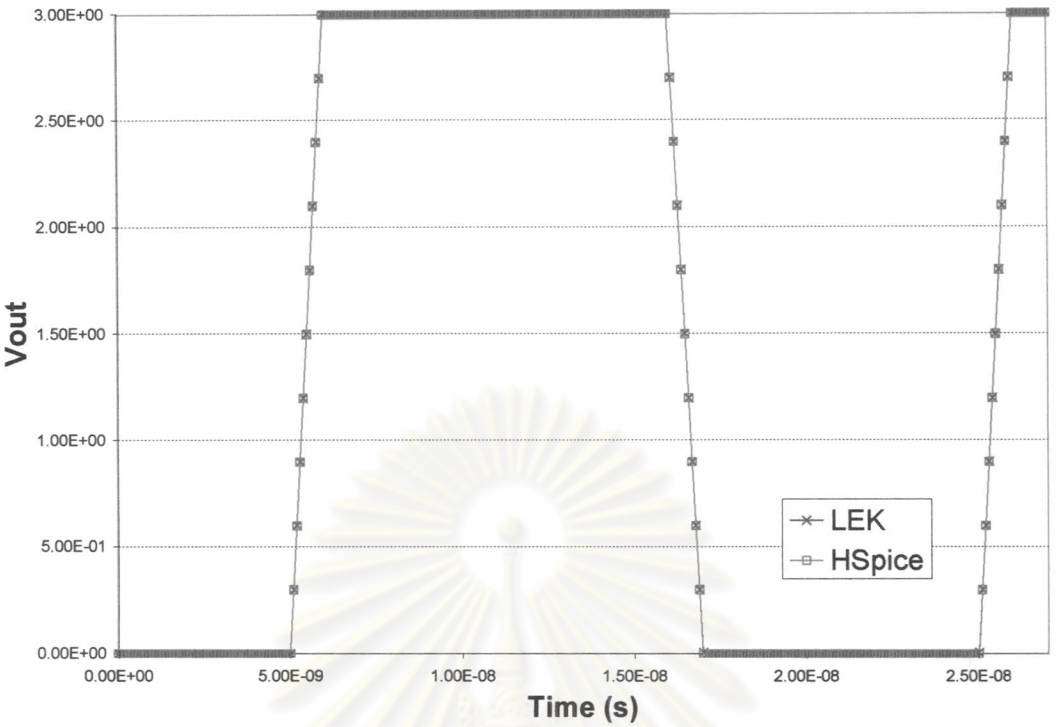


รูปที่ 7.7 วงจรซอร์สร่วม

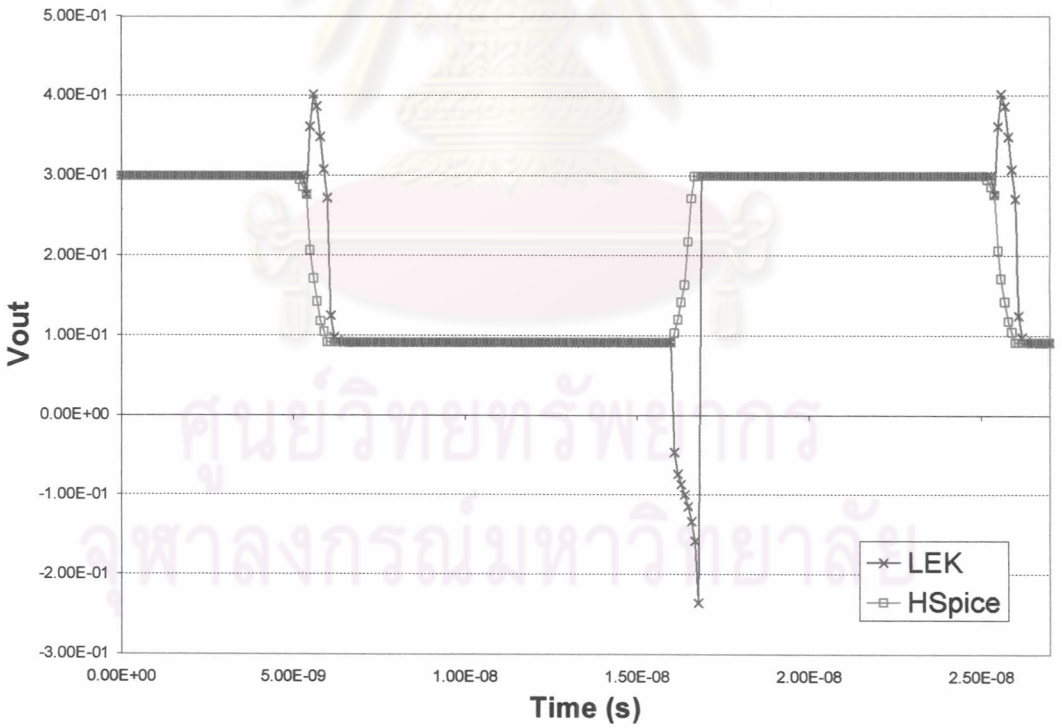
อันดับแรกเราจะทำการเปรียบเทียบผลของแรงดันขาออกกับโปรแกรม Star-HSpice เมื่อใช้ค่าระดับ 1 ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 7.9

จากรูปที่ 7.5 จะเห็นว่าค่าตัวเก็บประจุ C_{gd} ในช่วงเชิงเส้นที่ได้จากโปรแกรม Star-HSpice มีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวคือค่าที่ได้จากโปรแกรม Star-HSpice เมื่อใช้ค่าระดับ 1 จะไม่มีผลของตัวเก็บประจุต่อแรงดันขาออก

จากนั้นเราจะทำการเปรียบเทียบผลของแรงดันขาออกกับโปรแกรม Star-HSpice เมื่อใช้ค่าระดับ 2 ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 7.10

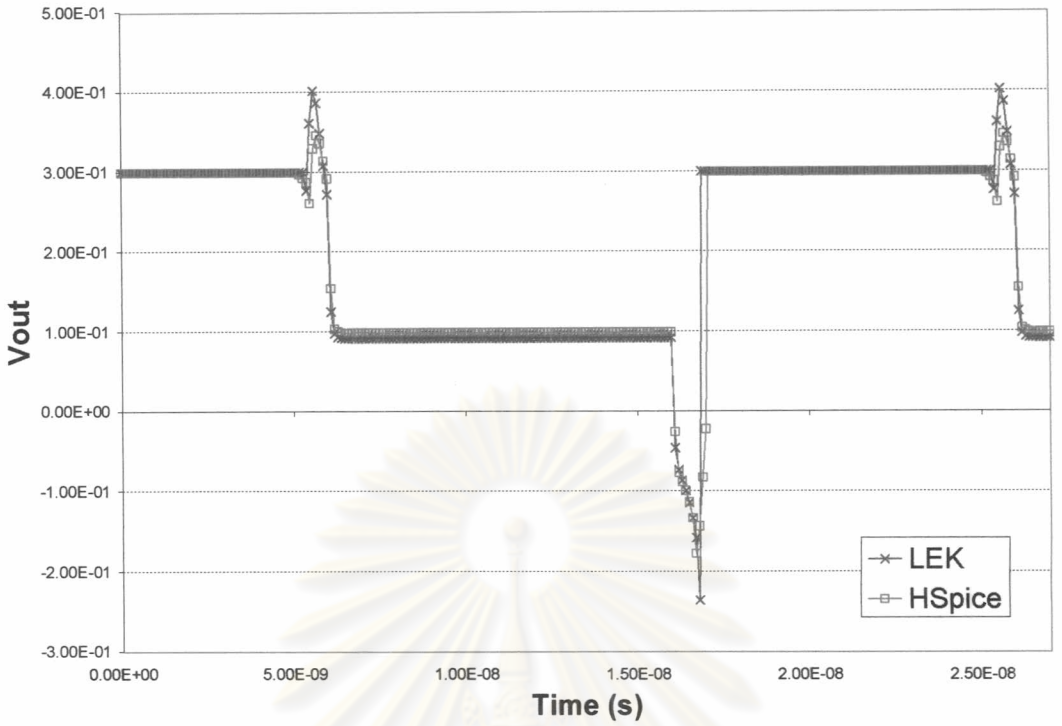


รูปที่ 7.8 แรงดันขาเข้า



รูปที่ 7.9 ค่าแรงดันขาออกเปรียบเทียบกับค่าระดับ 1 ในโปรแกรม Star-HSpice

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.10 ค่าแรงดันขาออกเปรียบเทียบกับค่าระดับ 2 ในโปรแกรม Star-HSpice

จากรูปที่ 7.10 จะเห็นว่าค่าแรงดันขาออกที่ได้จากโปรแกรม Star-HSpice มีผลของตัวเก็บประจุอยู่ด้วยและแนวโน้มมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ในช่วงเชิงเส้นมีค่าไม่ตรงกัน จึงทำให้มีค่าความผิดพลาดอยู่

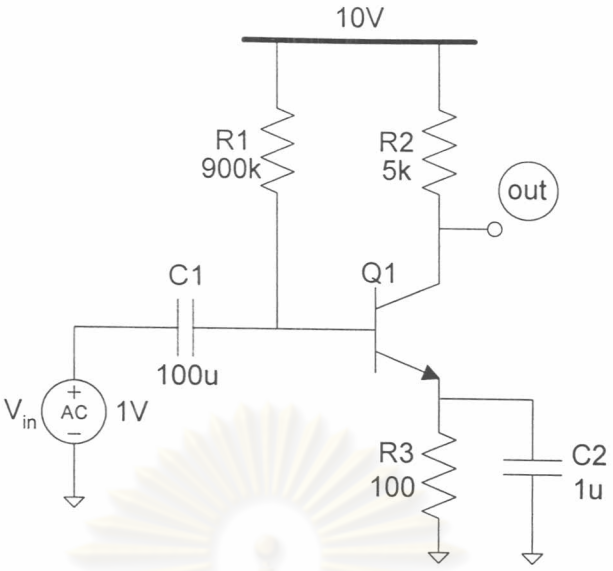
จากการทดลองนี้ จะสรุปได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ถึงแม้ว่าจะเป็นการคำนวณในระดับ 1 แต่ก็ยังสามารถที่จะทำนายเหตุการณ์อันเกิดจากผลของตัวเก็บประจุในทรานซิสเตอร์ชนิดมอสได้ และมีแนวโน้มเข้าใกล้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในระดับ 2 ของโปรแกรม Star-HSpice

7.1.3 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม

วงจรอิมิตเตอร์ร่วมที่ใช้ในการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 7.11 เราจะใช้วงจรนี้ทดสอบการทำงานของการวิเคราะห์หาผลตอบสนองเชิงความถี่ รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์สองหัวต่อที่ใช้ในการคำนวณมีดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อ

IS = 1e-15	BF = 100	BR = 1
VA = 250	C_{bc} = 0	C_{be} = 0



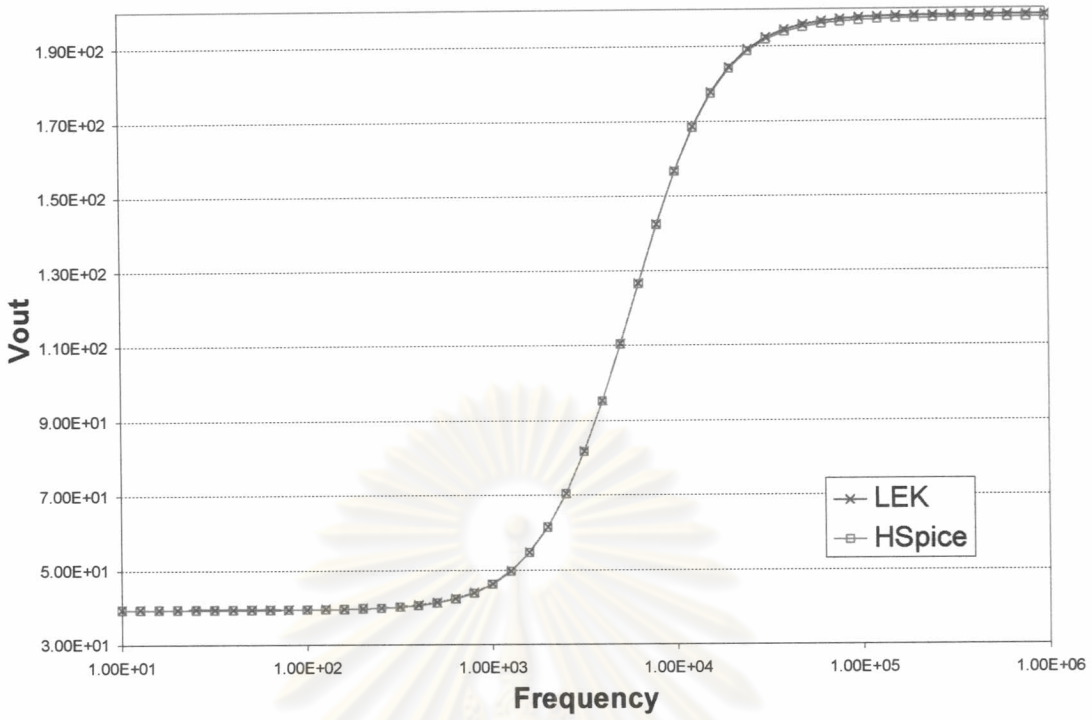
รูปที่ 7.11 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม

เราจะวิเคราะห์หาผลตอบสนองเชิงความถี่ตั้งแต่ 10 เฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อดูย่านความถี่ที่เหมาะสมของวงจรขยายนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ดังรูปที่ 7.12 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรนี้ทำงานได้ดีเมื่อใช้ความถี่สูงตั้งแต่ 100 กิโลเฮิรตซ์ขึ้นไป เนื่องจากที่ความถี่ต่ำตัวเก็บประจุ C2 จะทำให้มีความต้านทานต่อการผ่าน (impedance) สูงส่งผลให้อัตราขยายต่ำ แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นตัวเก็บประจุ C2 จะลัดวงจรทำให้ความต้านทานต่อการผ่านลดลง ส่งผลให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น

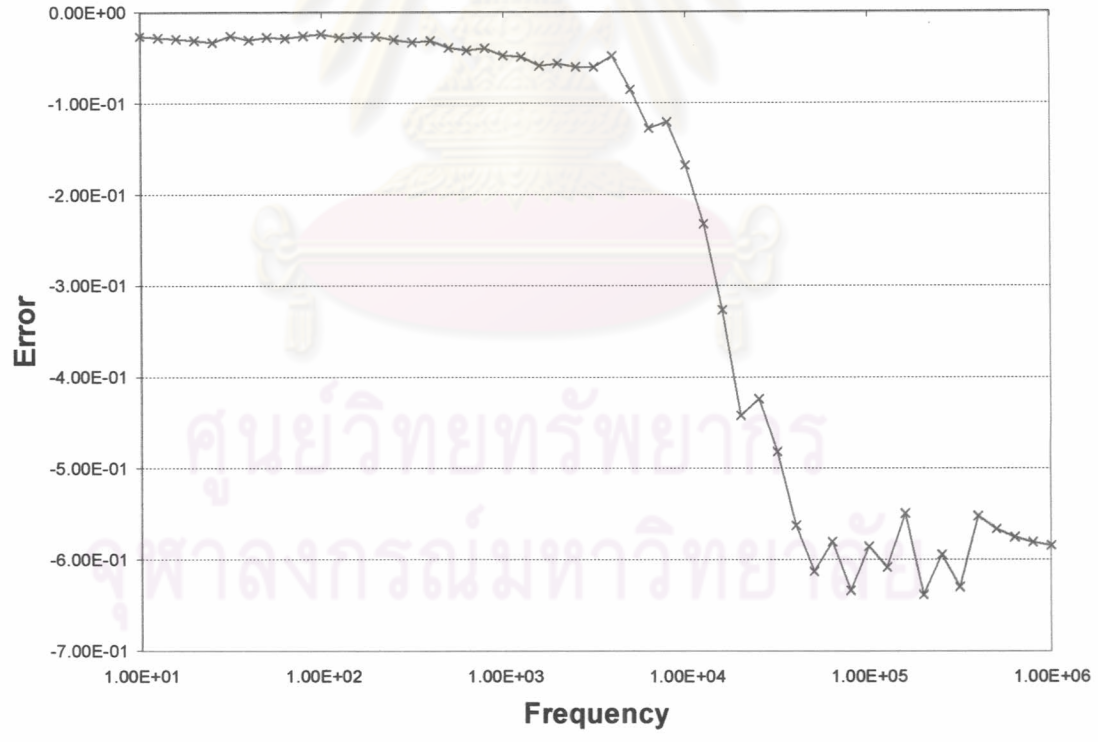
เนื่องจากแบบจำลองของทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อที่ใช้ไม่ตรงกับแบบจำลองที่โปรแกรม Star-HSpice ใช้ แต่ก็ยังอ้างอิงแบบจำลองของ Eber-moll ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จึงยังมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความผิดพลาดแสดงดังรูปที่ 7.13 ซึ่งมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 0.638 หรือร้อยละไม่เกิน 0.32

7.2 สรุป

โปรแกรมวิเคราะห์วงจรรวมที่พัฒนาขึ้น เป็นโปรแกรมจำลองการทำงานวงจรไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์หลักที่สำคัญสำหรับการพัฒนาวงจรรวมอันได้แก่ทรานซิสเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าและทรานซิสเตอร์สองหัวต่อ ด้วยการนำเอาแนวคิดเชิงวัตถุมาใช้ในการพัฒนา ทำให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจเพราะสามารถที่จะแยกการทำงานของทรานซิสเตอร์ออกเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าพื้นฐานมาประกอบกัน และสามารถที่จะแบ่งการพัฒนาออกไปตามอุปกรณ์ไฟฟ้าพื้นฐานเหล่านั้นได้



รูปที่ 7.12 ค่าแรงดันขาออก



รูปที่ 7.13 ค่าความผิดพลาด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส เมื่อผ่านการคำนวณเชิงเส้นแล้วจะแบ่งออกเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าย่อยประกอบกัน และจะเป็นโครงสร้างแบบนี้เสมอแม้ว่าจะเป็นการคำนวณในระดับที่สูงขึ้น ดังนั้นในอนาคตจึงสามารถที่จะพัฒนาการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสที่ระดับที่สูงขึ้นด้วยการคำนวณเชิงเส้นและกำหนดค่าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าย่อยเหล่านี้เท่านั้น

2. เนื่องจากโครงสร้างของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแบ่งออกเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้และส่วนที่ทำการคำนวณแยกออกจากกัน และส่วนที่ทำการคำนวณใช้เพียงไลบรารีพื้นฐานของภาษา C++ ดังนั้นในอนาคตสามารถที่จะนำส่วนของการคำนวณไปพัฒนาเพื่อใช้กับระบบปฏิบัติการอื่นได้ ซึ่งส่วนที่ต้องทำเพิ่มคือส่วนติดต่อกับผู้ใช้สำหรับระบบปฏิบัติการนั้นๆ เท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย