วงจรตัวต้านทานแบบลอยตัวโดยใช้วงจร DDCC

CMOS Floating Resistor Using DDCC

มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ

ภาควิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรตัวต้านทานแบบลอยตัวโดยใช้วงจร DDCC เป็นอุปกรณ์ส่วนประกอบ ตัวต้านทานหลักสร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว วงจรที่นำเสนอมีข้อดีคือ วงจรมีความง่ายไม่ซับซ้อนซึ่งสามารถเป็นไปได้โดยใช้วงจร DDCC ค่าความต้านทานสามารถปรับค่าได้ด้วยแรงดันไบอัสจากภายนอก วงจรที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรย่อยในระบบต่างๆ ในวงจรรวมได้เป็นอย่างดี โดยใช้มอสทรานซิสเตอร์เพียง 15 ตัวเท่านั้น ทฤษฎีที่นำเสนอและคุณสมบัติของวงจรสามารถตรวจสอบได้โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

Abstract

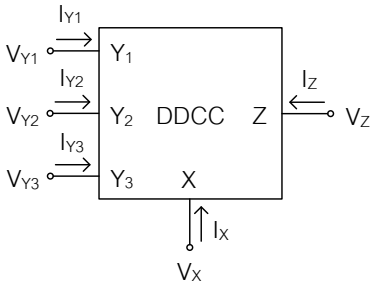
A new floating resistor based on a differential difference current conveyor (DDCC) is presented. The core of the circuit is realized by using a MOS transistor operating in non-saturation region. The proposed circuit offers the following features: simple circuitry by using DDCC, voltage-controlled resistor, suitable for applications in telecommunication and measurement systems. The proposed circuit employs 15 MOS transistors. The performances of the proposed circuit are simulated with PSpice to confirm the presented theory.

1. บทนำ

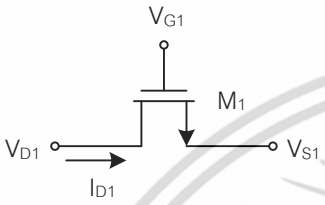
วงจรตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าความต้านทานด้วยแรงดันสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในวงจรประมวลผลสัญญาณแบบอนาลอก ซึ่งสามารถพบได้ในระบบโทรคมนาคม อิเล็กทรอนิกส์และการวัด ตัวอย่างเช่น วงจรกรองความถี่ RC วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรขยายสัญญาณ วงจรแบ่งแรงดันหรือกระแส วงจรแปลงแรงดันหรือกระแสเป็นความถี่ เป็นต้น สำหรับเทคโนโลยี VLSI ตัวต้านทานสามารถสร้างได้จากแผ่นซิลิกอนในวงจรรวม แต่อย่างไรก็ตามตัวต้านทานที่ได้จะมีค่าที่จำกัดและค่าความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป นอกจากนี้ค่าความต้านทานไม่สามารถปรับค่าได้ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงแทนตัวต้านทานชนิดนี้ด้วยวงจรตัวต้านทานแบบแอ็กทีฟ ที่ผ่านมามีวงจรตัวต้านทานที่ปรับค่าความต้านทานด้วยแรงดันนำเสนอไว้ใน [1]-[6] โดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวหรือย่านอิ่มตัวอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่วงจรเหล่านั้นมีโครงสร้างที่ยุ่งยาก

บทความนี้นำเสนอวงจรตัวต้านทานแบบลอยตัวอย่างง่ายที่สามารถปรับค่าความต้านทานด้วยแรงดันโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวต่อร่วมกับวงจร DDCC ที่ได้นำเสนอไว้ใน [7] การใช้วงจร DDCC เป็นอุปกรณ์ส่วนประกอบทำให้วงจรตัวต้านทานที่ได้มีความง่าย คุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอจะถูกตรวจสอบการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 สัญลักษณ์วงจร DDCC



รูปที่ 2 การไบอัสมอสทรานซิสเตอร์

2. วงจรที่นำเสนอ

สัญลักษณ์ของวงจร DDCC แสดงได้ดังรูปที่ 1 วงจรสายพานกระแสชนิดนี้ได้ถูกนำเสนอในปี 1996 [7] โดยมีคุณสมบัติคือมีแบนด์วิดท์กว้าง มีความเป็นเชิงเส้นสูง มีช่วงปฏิบัติงานทางอินพุทกว้าง วงจร DDCC เป็นวงจรที่มีอินพุทแรงดันสามอินพุทคือ Y_1 Y_2 และ Y_3 ซึ่งอินพุททั้งสามจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก ในขณะที่ขั้ว X จะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ส่วนที่ขั้ว Z จะเป็นเอาท์พุทกระแสที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง คุณสมบัติอินพุทและเอาท์พุทของวงจร DDCC สามารถแสดงได้คือ

$$\begin{pmatrix} V_X \\ I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ I_{Y3} \\ I_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{Y1} \\ V_{Y2} \\ V_{Y3} \\ I_X \end{pmatrix} \quad (1)$$

กระแสที่ขั้ว Z จะมีค่าเท่ากับกระแสอินพุทที่ขั้ว X ($I_Z=I_X$) แรงดันที่ขั้ว X มีความสัมพันธ์กับแรงดันอินพุททั้งสามคือ $V_X=V_{Y1}-V_{Y2}+V_{Y3}$

ถ้าสมมติว่ามอสทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 2 ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว สมการคุณสมบัติจะสามารถเขียนได้คือ [6]

$$I_{D1} = K_n\left(V_{G1} - V_{Tn} - \frac{V_{D1}}{2} - \frac{V_{S1}}{2}\right)V_{DS1} \quad (2)$$

เมื่อ $K_n=\mu_n C_{ox} W/L$ โดยที่ K_n คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์พารามิเตอร์ μ_n คือค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของเกทออกไซด์ W และ L คือค่าความกว้างและความยาวของแชนแนลตามลำดับ V_{Tn} คือค่าแรงดันแทรชโฮล V_{GS1} คือแรงดันระหว่างเกตและซอร์สและ V_{DS1} คือค่าแรงดันระหว่างเดรนและซอร์สของ M_1 สำหรับคุณสมบัติกระแสและแรงดันที่เป็นเชิงเส้น แรงดันที่ขาเกตในสมการที่ (2) จะต้องมีค่าเท่ากับ [1]

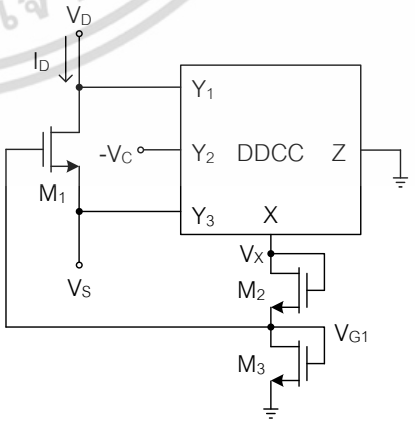
$$V_{G1} = \frac{V_{D1} + V_{S1} + V_C}{2} \quad (3)$$

โดยที่ V_C คือแรงดันไบอัสจากภายนอกที่ใช้ควบคุมค่าความต้านทาน เมื่อแทน (3) ลงใน (2) กระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์สามารถเขียนได้คือ

$$I_{D1} = \frac{K_n}{2}(V_C - 2V_{Tn})V_{DS1} \quad (4)$$

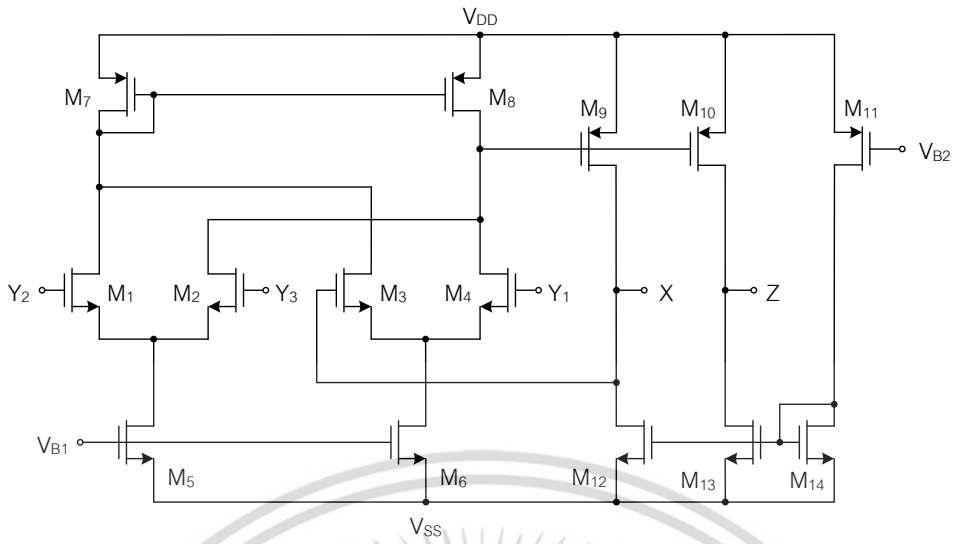
โดยกระแสเดรน I_{D1} จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดัน V_{DS1} และสามารถปรับค่าได้โดยเปลี่ยนค่า V_C เป็นค่าต่างๆ อยู่ในช่วงที่กำหนด

รูปที่ 3 แสดงวงจรตัวต้านทานที่นำเสนอ จากวงจรจะเห็นว่าวงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจร DDCC หนึ่งวงจร มอสทรานซิสเตอร์สามตัว ทรานซิสเตอร์ M_1 จะทำงานในย่านไม่อิ่มตัว ส่วนทรานซิสเตอร์ M_2–M_3 จะถูกต่อเป็นไดโอดเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดันเพื่อให้ได้เงื่อนไขตามสมการที่ (3)



รูปที่ 3 วงจรตัวต้านทานที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 วงจร DDCC ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

จากสมการที่ (4) ที่แสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่าง I_{D1} และ V_{DS1} ซึ่งหมายความว่าวงจรในรูปที่ 3 เป็นตัวต้านทานแบบเชิงเส้นที่มีค่าความต้านทานกำหนดได้โดย

$$R_{eq} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{2}{K_n(V_C - 2V_{Tn})} \quad (5)$$

ซึ่งค่าความต้านทานจะถูกปรับค่าได้โดยการเปลี่ยนค่าแรงดัน V_C เป็นค่าต่างๆ ดังนั้นจะได้ความต้านทานเสมือนจากมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวที่เป็นสัดส่วนกับแรงดัน V_C สำหรับการทำงานในช่วงเชิงเส้นของวงจรตัวต้านทานที่นำเสนอจะถูกกำหนดโดยสมการที่ (3) คือกำหนดให้มอสทรานซิสเตอร์ M_1 ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่ในเงื่อนไขคือ

$$V_{GS} > V_{DS} + V_{Tn} \quad (6)$$

จากสมการที่ (3) และ (6) สามารถกำหนดได้ว่าค่าแรงดัน V_C ต่ำสุดที่ควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงเชิงเส้นคือ

$$V_{C(min)} = V_{DS} + 2V_{Tn} \quad (7)$$

ในขณะเดียวกัน จากสมการที่ (5) และ (7) ค่าความต้านทานค่ามากที่สุดที่ได้จากวงจรสามารถกำหนดได้คือ

$$R_{eq(max)} = \frac{2}{K_n V_{DS}} \quad (8)$$

ดังนั้นตัวต้านทานแบบลอยตัวสามารถสร้างได้โดยง่ายโดยใช้วงจร DDCC หนึ่งตัว มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวหนึ่งตัว (M_1) และมอสทรานซิสเตอร์ที่ถูกต่อเป็นไดโอดอีกสองตัว (M_1-M_2) จากวงจรที่นำเสนอจะเห็นว่าวงจรใช้มอสทรานซิสเตอร์เพียง 15 ตัวเท่านั้น

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ 1.2μm CMOS จาก MOSIS

MODEL NMOS LEVEL=3 PHI=0.700000 TOX=3.0500E-08 XJ=0.200000U TPG=1 VTO=0.6315 DELTA=6.8460E-01 LD=2.8040E-08 KP=7.6909E-05 UO=679.3 THETA=8.2320E-02 RSH=4.4110E+01 GAMMA=0.6672 NSUB=1.7190E+16 NFS=5.9090E+11 VMAX=2.2420E+05 ETA=1.6160E-01 KAPPA=5.1440E-01 CGDO=5.0000E-11 CGSO=5.0000E-11 CGBO=4.2794E-10 CJ=2.8658E-04 MJ=5.3467E-01 CJSW=1.3469E-10 MJSW=1.0000E-01 PB=9.9000E-01
MODEL PMOS LEVEL=3 PHI=0.700000 TOX=3.0500E-08 XJ=0.200000U TPG=-1 VTO=-0.7989 DELTA=1.7180E+00 LD=1.1000E-09 KP=2.0198E-05 UO=178.4 THETA=8.8040E-02 RSH=1.1510E+02 GAMMA=0.3752 NSUB=5.4370E+15 NFS=5.5960E+11 VMAX=1.4890E+05 ETA=1.0030E-01 KAPPA=1.0000E+01 CGDO=5.0000E-11 CGSO=5.0000E-11 CGBO=4.0045E-10 CJ=2.8863E-04 MJ=4.3630E-01 CJSW=1.7894E-10 MJSW=1.0000E-01 PB=7.5965E-01

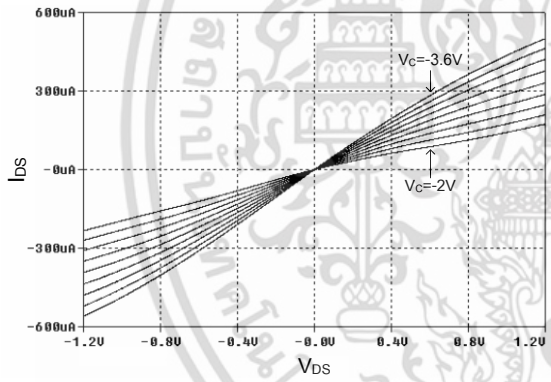
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ค่า W/L มอสทรานซิสเตอร์ของวงจร DDCC

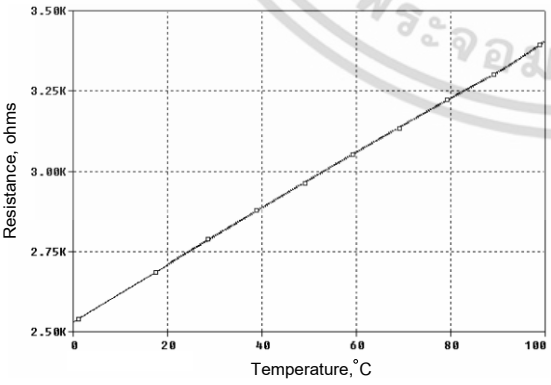
มอสทรานซิสเตอร์	ค่า W/L
M_1-M_4	7.2/4.8
M_7-M_8	39.6/4.8
M_9-M_{11}	111.6/3.6
M_{12}-M_{14}	144/4.8

3. การจำลองการทำงาน

วงจรตัวต้านทานที่แสดงในรูปที่ 3 จะถูกจำลองการทำงานด้วย PSpice โดยใช้วงจร DDCC ที่แสดงในรูปที่ 4 การจำลองการทำงานใช้พารามิเตอร์ซีมอส 1.2μm จาก MOSIS ดังแสดงในตารางที่ 1 ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $\pm$6 โวลท์ ค่าอัตราส่วน W/L ของมอสทรานซิสเตอร์วงจร DDCC ในรูปที่ 4 แสดงดังตารางที่ 2 [8] แรงดันไบอัส V_{B1} เท่ากับ-4.6โวลท์ และ V_{B2} เท่ากับ +2โวลท์

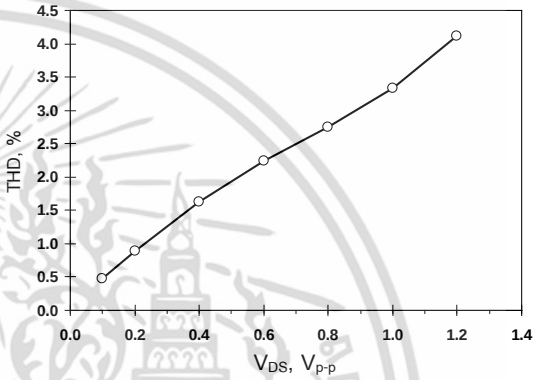


รูปที่ 5 คุณสมบัติทาง DC ของวงจรตัวต้านทานที่นำเสนอ



รูปที่ 6 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของวงจรที่นำเสนอ

สำหรับตัวอย่างการออกแบบกำหนดค่า W/L ของ M_1 ในรูปที่ 3 เท่ากับ 37.2μm/6μm ค่า L>5μm เพื่อลดผลของค่า λ ในตัวมอสทรานซิสเตอร์ [1] ในขณะที่ M_2 และ M_3 เท่ากับ 4.8μm/4.8μm รูปที่ 5 แสดงคุณสมบัติทาง DC ของวงจรตัวต้านทานที่นำเสนอเมื่อทดลองเพิ่มค่า V_{DS} จาก -1.2โวลท์ ถึง +1.2โวลท์ และเปลี่ยนค่า V_C จาก -2 ถึง -3.6 โวลท์ โดยเพิ่มทีละ 0.2 โวลท์ รูปที่ 6 แสดงคุณสมบัติของวงจรเมื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิจาก 0 ถึง 100°C โดยกำหนดค่า V_C เท่ากับ -3 โวลท์และ V_{DS1} เท่ากับ 0.5 โวลท์ จากรูปที่ 6 ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 0.87kΩ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจาก 0 ถึง 100°C



รูปที่ 7 ค่าความเป็นเชิงเส้นของวงจร

ค่าพารามิเตอร์ของ M_1 ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคือ μ_n ที่รวมอยู่ในพจน์ของ K_n [9] ซึ่งไม่สามารถหักล้างได้โดยตรง ค่า μ_n นี้เป็นค่าความคล่องตัวของพื้นผิว (surface mobility) โดยสามารถแสดงเป็นสมการที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิได้คือ [6]

$$\mu(T) = \mu(T_r)\left(\frac{T}{T_r}\right)^{-k_3} \qquad (9)$$

เมื่อ T คือค่าอุณหภูมิสมบูรณ์ T_r คือค่าอุณหภูมิห้องที่มีหน่วยเป็นองศาเคลวิล (Kelvin) และ k_3 คือค่าคงที่ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2 ยกตัวอย่างเช่น ถ้าอุณหภูมิห้องเปลี่ยนแปลง 10 องศาเซลเซียส ค่า k_3 จะเท่ากับ 1.5 และทำให้ I_{DS} เปลี่ยนแปลงประมาณ 4.79 ถึง 6.34% เมื่อความต้านทานคือความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{DS} ดังนั้นค่าความต้านทานที่ได้จึงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ส่วนค่า V_{Tn} จะเป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพราะขา Bulk ถูกต่อกับขาซอร์ส [5] รูปที่ 7 แสดงความค่า THD (Total Harmonic Distortion) ของวงจรเมื่อเพิ่มขนาดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{DS} เป็นค่าต่างๆ โดยกำหนดให้ค่า V_C เท่ากับ -3 โวลท์ จากผลการจำลองในรูปที่ 7 ที่ขนาดสัญญาณ $1.2V_{P-P}$ ค่า THD มีค่าประมาณ 4.1%

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรตัวต้านทานแบบลอยตัวที่ปรับค่าความต้านทานด้วยแรงดันไบอัสจากภายนอก วงจรที่นำเสนอใช้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวต่อร่วมกับวงจร DDCC ผลคือจะได้วงจรตัวต้านทานที่มีความง่ายไม่ซับซ้อน วงจรที่นำเสนอใช้มอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 15 ตัวเท่านั้น เมื่อวงจร DDCC ใช้แหล่งจ่าย ±6 โวลท์ วงจรตัวต้านทานจะมีช่วงการปรับค่าแรงดัน V_C ไม่เกิน -3.6โวลท์ การใช้แรงดันไบอัส V_C ที่มีค่าลบสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการสลับขั้วของแหล่งจ่ายแรงดันจากภายนอก ช่วงการปรับค่าของแรงดัน V_C สามารถเพิ่มขึ้นได้ถ้าเพิ่มแหล่งจ่ายแรงดันของวงจร DDCC ให้สูงขึ้น แต่ในทางกลับกันถ้าลดแหล่งจ่ายแรงดัน DDCC ลงมาจะทำให้ช่วงการปรับค่าของ V_C ลดลงด้วย เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันจะเป็นตัวกำหนดช่วงปฏิบัติงานทางอินพุทของวงจร DDCC ซึ่งจะมีผลทั้งการกำหนดช่วงการปรับค่าความต้านทานและช่วงความเป็นเชิงเส้นของตัวต้านทาน จากการจำลองการทำงานที่แหล่งจ่าย ±6 โวลท์ วงจรใช้กำลังงาน 94mW เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรตัวต้านทานที่เคยนำเสนอมาก่อนหน้านี้ วงจรที่นำเสนออาจจะใช้แหล่งจ่ายมากกว่าและมีช่วงเชิงเส้นน้อยกว่า แต่สามารถยืนยันได้ว่าวงจรที่นำเสนอมีความง่ายซึ่งไม่ว่าใครก็สามารถสร้างได้เพราะวงจรที่นำเสนอใช้วงจร DDCC มาช่วยลดความซับซ้อนของวงจรลงไป

5. เอกสารอ้างอิง

[1] K. Nay and A. Budak, “A voltage-controlled resistance with wide dynamic range and low distortion,” IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. CAS-30, pp.770-772, 1981.

[2] G. Wilson and P. K. Chan, “Novel voltage-controlled grounded resistor,” Electronics Letters, vol. 25, pp.1725-1726, 1989.

[3] W. Surakampontorn, “CMOS floating voltage-controlled negative resistor,” Electronics Letters, vol. 28, pp. 1457-1459, 1992.

[4] K. M. Al-Rawaihi and J. M. Noras, “A novel linear resistor utilizing MOS transistors with identical sizes and one controlling voltage,” International Journal of Electronics, vol. 76, pp. 1083-1098, 1994.

[5] N. Tadic and D. Gobovic, “A voltage-controlled resistor in CMOS technology using bisection of the voltage range,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 50, pp. 1704-1710, 2001.

[6] P. Prommee, M. Somdunyakanok, K. Khaw-ngam, and K. Dejhan, “A CMOS voltage-controlled floating resistance circuit with temperature compensated," Proceeding of 2005 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2005), Beijing, China, October 12-14, 2005.

[7] W. Chiu, S.-I. Liu, H.-W. Tsao, and J.-J. Chen, “CMOS differential difference current conveyors and their applications,” IEE Proceeding–Circuits Devices and Systems, vol. 143, pp. 91-96, 1996.

[8] J.-W. Horng, C.-L. Hou, C.-M. Chang, Y.-T. Lin, I.-C. Shiu, and W.-Y. Chiu, “First-order allpass filter and sinusoidal oscillators using DDCCs,” International Journal of Electronics, vol. 93, pp. 457-466, 2006.

[9] S. Qin and R. L. Geiger, “A ±5-V Analog Multiplier,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. SC-22, pp.1143-1146, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้