

บทที่ 5

บทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึง บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ประกอบด้วย บทนำและปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดจนแนวทางในการแก้ไข

5.1 บทนำ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอ การวิเคราะห์และออกแบบวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ซีมอส (Voltage-Controlled Grounding Resistance Circuit: VCGR) โดยอาศัยเทคนิคการหักล้างความไม่เป็นเชิงเส้นของทรานซิสเตอร์ ซึ่งออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นวงจรร้อย เมื่อวงจรร้อยจะทำหน้าที่เป็นวงจรเลื่อนระดับแรงดันไบอัสให้กับขาเกตของทรานซิสเตอร์ ที่ทำงานเป็นความต้านทานชนิดต่อกราวด์ ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว และหักล้างความไม่เป็นเชิงเส้นออกไป ทำให้ผลของวงจรที่ได้มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นดี ช่วงแรงดันควบคุมกว้าง การทำงานมีความแม่นยำและมีค่าความสูญเสียต่ำ วงจรทั้งหมดมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและยุ่งยาก เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านโทรคมนาคมหรืออิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ซีมอสนั้น ใช้เทคโนโลยี CMOS ขนาด $0.25\mu m$ และใช้แบบจำลอง Model ของ T14Y MOSIS Level 3 การออกแบบวงจรดังกล่าวจะใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $\pm 5V$ ซึ่งวงจรภายในจะประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์จำนวน 4 ตัว โดยแบ่งออกได้เป็น มอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS 2 ตัว และชนิด PMOS 2 ตัว ได้แก่ M_3, M_4 ถูกต่อเป็นวงจรเลื่อนระดับแรงดัน และมอสทรานซิสเตอร์ NMOS 2 ตัว คือ M_2 ถูกต่อเป็นวงจรควบคุมแรงดัน และมอสทรานซิสเตอร์ M_1 ได้ถูกไบอัสด้วยแรงดันต่าง ๆ เหล่านี้ให้ทำงานอยู่ในย่านไม่อิ่มตัว แรงดันไบอัสดังกล่าวได้มาจากวงจรร้อยซึ่งประกอบด้วย วงจรเลื่อนระดับแรงดัน โดยวงจรร้อยนี้มอสทรานซิสเตอร์จะทำงานทั้งในย่านไม่อิ่มตัวซึ่งมีค่า Aspect Ratio ของ (W/L) ดังนี้ สำหรับมอสทรานซิสเตอร์ ($M_1, M_2 = 20\mu m/10\mu m$), มอสทรานซิสเตอร์ ($M_3, M_4 = 50\mu m/10\mu m$) แรงดันควบคุม ($V_C = 3V - 10V$) และแรงดันในการไบอัสเพิ่ม ($V_{G4} = 1V$) และแรงดันอินพุต ($V_{in} = \pm 1V$) จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้มอสทรานซิสเตอร์มีคุณสมบัติทำงานเป็นความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน โดยมีค่าแรงดันที่ขาเกตตามที่ได้ออกแบบไว้ เป็นผลทำให้ค่าของแรงดันอินพุตปฏิบัติงาน มีค่าอยู่ที่ $-5.8 < V_{in} < 3.66$ ซึ่งทำให้มอสทรานซิสเตอร์ที่ได้คุณสมบัติทำงานเป็นความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วย

แรงดัน ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขการทำงานย่านไม่อิ่มตัว ผลตอบสนองความถี่ของวงจรที่คำนวณได้อยู่ที่ $f_{-3dB} \approx 80.598\text{MHz}$ และวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอ ใช้กำลังงานประมาณ 6.39mW

ผลการทดสอบการทำงานของวงจรได้ทำการเปรียบเทียบการทำงานของวงจรเป็น 2 กรณี คือ การวิเคราะห์ผลเชิงทฤษฎี โดยวิเคราะห์ทฤษฎีเปรียบเทียบกับกรอกแบบวงจรที่นำเสนอซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ โดยแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี และในกรณีที่สอง ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่ได้นำเสนอโดยใช้โปรแกรมการจำลอง (Model) T14Y MOSIS Level 3 ขนาด $0.25\ \mu\text{m}$ ผลลัพธ์จากการใช้โปรแกรมการจำลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอ นั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในกรณีแรก ซึ่งเป็นการยืนยันว่าวงจรที่ได้นำเสนอ นั้นมีการทำงานที่ถูกต้องตามหลักการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี เมื่อผลจากการจำลองดังกล่าว เห็นได้ว่าวงจรมีช่วงที่มีย่านอินพุตปฏิบัติงานที่ค่อนข้างกว้างและมีค่าสอดคล้องกับการคำนวณเชิงทฤษฎี อีกทั้งยังมีย่านของการควบคุมที่กว้างเช่นเดียวกัน มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง และจะมีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงมากขึ้นเมื่อ (V_C) มีค่าสูงขึ้น ในช่วงแรงดัน (V_C) ที่มีค่าน้อย ๆ ค่าความต้านทานจะมีค่าความเป็นเชิงเส้นต่ำ เนื่องจากแรงดัน (V_C) มีค่าต่ำ ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของแรงดันเทรชโฮลด์ของมอสทรานซิสเตอร์ ทำให้มอสทรานซิสเตอร์ยังทำงานในย่านไม่อิ่มตัวไม่เต็มพิกัดนั่นเอง ซึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการเพิ่มกระแสไบอัส (I_{in}) เพื่อให้สัญญาณแรงดันยกระดับให้สูงขึ้นมากกว่า (V_{TN}) และเพิ่มแรงดัน (V_C) ให้สูงกว่าค่าแรงดัน (V_{TN}) ซึ่งเป็นการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ยังได้มีการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของวงจรเมื่อแรงดันควบคุม (V_C) เปลี่ยนแปลงจาก 3V ถึง 10V ผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดัน (V_C) มีค่าสูงขึ้น ค่าความต้านทานของวงจรจะลดลง และจะมีค่าความเป็นเชิงเส้นมากขึ้นเมื่อแรงดัน (V_C) มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี

การประยุกต์ใช้งาน วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่นำเสนอ ถูกประยุกต์ใช้งานเป็น วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) อาทิเช่น วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier), วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) และวงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน (High Pass Filter: HPF) สามารถปรับค่าความถี่ตอบสนองได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานเป็นไปตามทฤษฎีและเป็นที่น่าพอใจ

โดยภาพรวมของ วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ซีมอส (VCGR) ที่นำเสนอ นั้น เป็นวงจรที่ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาจากงานวิจัยก่อน ๆ ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นต่ำ และไม่มีการใช้แรงดันควบคุม ซึ่งการควบคุมจะไม่เป็นเชิงเส้นในขณะที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลง ส่วนวงจรในงานวิจัยที่ออกแบบขึ้นมาใหม่นี้จะมีความเป็นเชิงเส้นสูงมาก และการตอบสนองต่อความถี่ได้เป็นอย่างดี งานวิจัยฉบับนี้ได้มีการนำมาประยุกต์เป็น วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส และวงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางในด้านการประมวลผลสัญญาณอนาล็อกทางด้านอื่น ๆ อีกต่อไปได้

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข

ในงานวิจัยนี้แม้ว่าจะมีผลการจำลองการทำงานใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากก็ตาม แต่ก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการประสบปัญหาไปได้ ซึ่งเป็นปัญหาและข้อจำกัดเล็กน้อย พอที่จะแก้ไขได้ โดยแบ่งปัญหา และข้อจำกัดที่เกิดขึ้น ตลอดจนแนวทางที่จะแก้ไขต่อไปคือ

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอ มอสทรานซิสเตอร์ M_1 ที่มีคุณสมบัติทำงานเป็นความต้านทาน ขาเกตของทรานซิสเตอร์ M_1 ต้องมีแรงดันเท่ากับ $V_{G1} = V_{in} + V_x$ ดังนั้นเมื่อทรานซิสเตอร์ M_1 ต้องการที่จะให้ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวจึงต้องมีอัตรา การเลื่อนระดับแรงดัน ดังนี้ $(V_{in} + V_x - V_{TN}) > V_{in}$ หรือ $V_x > V_{TN}$ ถึงจะต้องทำงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว

แนวทางแก้ไข จากเงื่อนไขคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ดังกล่าว สามารถแก้ปัญหา โดยการเพิ่มระดับของแรงดัน V_x ให้มากกว่าแรงดันเทรชโฮลด์ของมอสทรานซิสเตอร์เท่านั้น ก็สามารถทำให้วงจรที่นำเสนอทำงานเป็นความต้านทานได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสมการกระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ M_1 มีค่าเป็น $1/k_N (V_C + V_x - 2V_{TN})$ จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความเป็นเชิงเส้นของความต้านทานซึ่งเกิดจากการเลื่อนระดับแรงดันไบอัสให้กับขาเกตของทรานซิสเตอร์ M_1 ด้วยการเลื่อนระดับเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุต โดยอัตราการเลื่อนระดับของวงจรจะขึ้นอยู่กับกระแส I_{in} จะต้องสูงมากพอที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขของทรานซิสเตอร์ M_1 ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว

มอสทรานซิสเตอร์ M_1 มีค่า Aspect Ratio (W/L) อยู่ที่ $(M_1 = 20\mu m/10\mu m)$ ซึ่งจะเห็นว่าค่าของ (W/L) มีค่ากว้างและยาวมากกว่าปกติ เนื่องจากการหลีกเลี่ยงความไม่เป็นเชิงเส้นของทรานซิสเตอร์ที่เกิดจากผลกระทบของความยาวแชนแนล (Channel Length Modulation: λ)

แนวทางแก้ไข เพื่อการหลีกเลี่ยงในความไม่เป็นเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์ ที่เกิดจากผลกระทบของความยาวของแชนแนล (Channel Length Modulation: λ) ในการออกแบบวงจรควรที่จะกำหนดให้ค่าของ L ไม่น้อยกว่า $8\mu m$ ถึงจะทำให้ค่าของ λ น้อยกว่า 1 มาก ๆ [13] ซึ่งจะทำให้สมการกระแสเดรนของวงจรมอสทรานซิสเตอร์ที่เป็นความต้านทาน ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัวมีค่าเป็น $I_{in} = I_{D1} + I_{D2}$ เมื่อเขียนในรูปของความต้านทานจะได้ $R_{eq} = \frac{1}{k_N(V_C + V_X - 2V_{TN})}$

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อวงจรที่นำเสนอ ซึ่งวงจรนี้ไม่ได้มีการนำเสนอในส่วนของการลดผลกระทบของอุณหภูมิไว้ โดยผลกระทบของอุณหภูมิจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการความต้านทาน ลักษณะของอุณหภูมิที่แฝงอยู่ในรูปของแรงดันจิกเริ่ม (V_{TN})

แนวทางแก้ไข ผลกระทบทางอุณหภูมิจะต้องทำการลดผลกระทบลงจากการชดเชย ด้วยหลักการหักล้างแรงดันจิกเริ่ม (V_{TN}) แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะทำให้ผลกระทบของอุณหภูมิหายไปทั้งหมด เพราะตัวแปรของอุณหภูมิยังแฝงอยู่ในค่าของความคล่อง (μ) อีกส่วนหนึ่ง จากผลกระทบทางอุณหภูมิที่ยังแฝงอยู่ในค่าของความคล่อง (μ) สามารถหักล้างลงไปได้ เมื่อนำไปใช้ร่วมกับวงจรที่มีเอาต์พุตเป็นแบบกระแส Single-End เช่น วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (V-I) โดยมีผลกระทบทางอุณหภูมิเป็นส่วนกลับกัน