

การวัดลักษณะสมบัติเฉพาะและสร้างแบบจำลองของซีมอสเฟตแบบเพิ่มพาหะในสถานะเย็นยวดยิ่ง

Characterization and modelling of complementary pair enhancement mode MOSFET at cryogenic temperatures

บุญมงคล บุญสม อธิภัทร วงศ์ณโรจน์ ทรงพล กาญจนชูชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย boonmongkhon.bs@gmail.com Teerapat.erg@gmail.com
Songphol.K@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวัดลักษณะสมบัติเฉพาะด้านออกและลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของมอสเฟตในช่วงอุณหภูมิเย็นยวดยิ่งถึงอุณหภูมิห้อง (30K-300K) เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและกระแสเดรนที่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิต่ำลง และมีผลกับการทำงานในช่วงเริ่มนำกระแสแบบไทรโอดและช่วงอิ่มตัวของมอสเฟต รวมถึงมีการพัฒนาแบบจำลอง SPICE โดยมีการศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน มีการนำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ทรานส์คอนดักแตนซ์และการปรับค่าความเร็วอิ่มตัวของพาหะเพื่อให้จำลองผลได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงได้แม่นยำมากขึ้นกว่าแบบจำลองเดิมของผู้ผลิต ผลการจำลองด้วยแบบจำลอง SPICE ที่ปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่พบว่ากราฟลักษณะเฉพาะด้านออกและลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของมอสเฟตชนิดเอ็นมีค่าใกล้เคียงการวัดจริงมากขึ้น ส่วนของมอสเฟตชนิดพีมีค่าที่ดีขึ้นแต่มีช่วงที่ยังไม่ใกล้เคียงการวัดจริงอยู่ ซึ่งเป็นผลจากการมอดูเลตแชนแนลในมอสเฟตชนิดพีที่มีผลกระทบมากกว่า จากการปรับปรุงแบบจำลอง SPICE นี้สามารถนำวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปปรับใช้กับแบบจำลองมอสเฟตในช่วงอุณหภูมิเย็นยวดยิ่งต่างๆได้ในอนาคต

สำคัญ: การวัดลักษณะเฉพาะมอสเฟต, มอสเฟตที่อุณหภูมิเย็นยวดยิ่ง

Abstract

This article presents the measurement of output and transfer characteristics of MOSFETs over a temperature range from cryogenic to room temperature (30K-300K) to study the changes in threshold voltage and drain current, which increase with reduce temperature and affect the operation of MOSFETs in the triode and saturation regions. A SPICE model was also developed, with a study of the relevant parameter adjustments, including threshold voltage. The methods for finding the transconductance parameter and adjusting the carrier saturation velocity are presented to more accurately simulate results closer to actual experiments than the manufacturer's original

model. The simulation results using the adjusted SPICE model show that the output and transfer characteristics of n-channel MOSFETs are closer to actual measurements. The p-channel MOSFETs show improvement, but there are still ranges that are not close to actual measurements, which is due to the greater impact of channel length modulation in p-channel MOSFETs. By improving this SPICE model, the methods for finding these parameters can be applied to MOSFET models at various cryogenic temperatures in the future.

Keywords: MOSFET Characterization, Cryogenics MOSFET

1. บทนำ

มอสเฟตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการประยุกต์ใช้งานในวงจรที่หลากหลาย รวมถึงสภาพแวดล้อมการใช้งานมอสเฟตที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิต่างๆก็มีความสำคัญสำหรับการออกแบบวงจรด้วย เนื่องจากลักษณะเฉพาะด้านออกและลักษณะเฉพาะถ่ายโอนซึ่งแสดงช่วงการทำงานของมอสเฟตจากมอสเฟตไม่นำกระแส หรือนำกระแสแบบแปรผันตรงกับแรงดันเกตซอสและแรงดันเดรนซอสที่จ่ายให้มอสเฟต หรือมอสเฟตนำกระแสที่เป็นช่วงอิ่มตัว ช่วงการทำงานเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้งานด้วย เช่นถ้าใช้งานมอสเฟตในดาวเทียมที่โคจรอยู่ในอวกาศที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 100K หรือใช้งานมอสเฟตในอุณหภูมิระดับ mK สำหรับวงจรควบคุมสัญญาณทางไฟฟ้าให้กับส่วนประมวลผลทางควอนตัม (Quantum processor) ของควอนตัมคอมพิวเตอร์ (Quantum computer) จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาการทำงานทางกายภาพพื้นฐานของมอสเฟตในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้นจนถึงระดับอุณหภูมิเย็นยวดยิ่ง จากการทดลองวัดลักษณะเฉพาะของมอสเฟตพบว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและกระแสเดรนในช่วงมอสเฟตเริ่มทำงานนำกระแสแบบไทรโอดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิต่ำมีผลต่อการทำงานของมอสเฟตจริง และในบทความนี้ได้นำผลการทดลองนี้มาพัฒนาแบบจำลอง SPICE ของมอสเฟตที่ศึกษา พบว่าแบบจำลอง SPICE เดิมจากผู้ผลิตยังไม่แม่นยำในช่วงที่มอสเฟตทำงานด้วยพลังงานต่ำ กระแสเดรนมีค่าน้อยๆในระดับมิลลิแอมป์ จึงมีการศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ

เพื่อให้แบบจำลอง SPICE ที่ปรับปรุง สามารถจำลองลักษณะเฉพาะของมอสเฟตให้สอดคล้องกับค่าจากการทดลองวัดจริงมากขึ้น

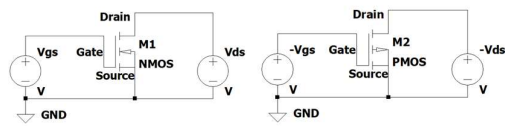
2. การวัดลักษณะสมบัติเฉพาะของมอสเฟต

2.1 ลักษณะเฉพาะด้านออก (Output Characteristic)

การวัดลักษณะเฉพาะด้านออกคือการวัดความสัมพันธ์ของกระแสเดรน (I_d) เมื่อปรับแรงดันเดรนซอส (V_{ds}) ให้เพิ่มขึ้นในขณะที่แรงดันเกตซอส (V_{gs}) มีค่าคงที่ (curve $I_{ds}-V_{ds}$) โดยเครื่องมือที่ใช้วัดคือเครื่อง HP4140B pA Meter [1] ที่สามารถปรับค่า V_{ds} , V_{gs} และวัดค่า I_d ที่มีขนาดเล็กมากในระดับพิโคแอมป์ (pA) ในเวลาเดียวกัน

2.2 ลักษณะเฉพาะถ่ายโอน (Transfer Characteristic)

การวัดลักษณะเฉพาะถ่ายโอนคือการวัดความสัมพันธ์ของ I_d เมื่อปรับ V_{gs} ให้เพิ่มขึ้นในขณะที่ V_{ds} มีค่าคงที่ (curve $I_{ds}-V_{gs}$) โดยรูปด้านล่างแสดงวงจรการวัดลักษณะเฉพาะทั้งสองแบบ



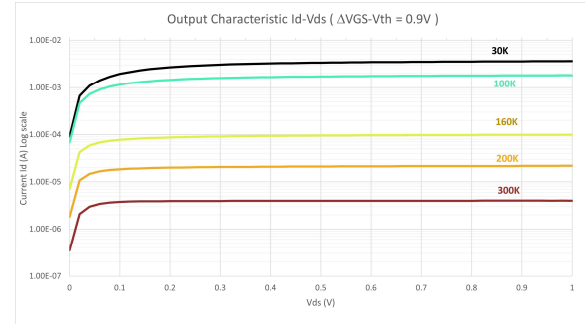
รูปที่ 1 วงจรการวัดลักษณะเฉพาะของเอนมอส(ซ้าย)และพีมอส(ขวา)

3 ระบบสถานะเย็นยวดยิ่ง(Cryogenics system)

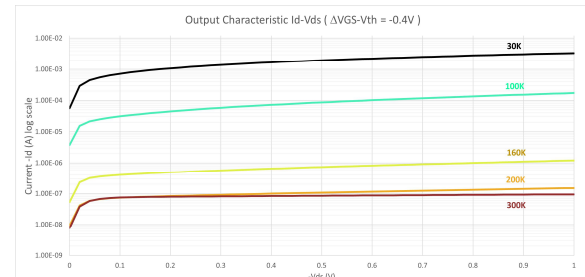
อุณหภูมิในสภาวะเย็นยวดยิ่งหมายถึงช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 100K (-173 °C) ลงไปจนถึงใกล้ 0K (-273°C) ในการควบคุมอุณหภูมิจึงใช้ระบบโครโวจินิกส์บีมที่มีฮีเลียม (Helium) เป็นสารทำความเย็น ควบคุมผ่านเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller, Lakeshore330) [1] โดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิภายในส่วนที่เป็นภาชนะเย็นยวดยิ่ง (Cryostat) เป็นระบบสุญญากาศเพื่อแยกอุณหภูมิภายในให้ไม่ถูกรบกวนจากภายนอก และมีตัวยึดชิ้นงาน (sample holder) ทำมาจากทองแดงสามารถติดตั้งชิ้นงานหรือมอสเฟต ที่ต้องการศึกษาไว้ภายในส่วนนี้ได้ โดยมีการเชื่อมต่อขาของมอสเฟต โดยใช้สายไฟที่มีการฉนวนป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกเพื่อติดตั้งเข้ากับกล่องที่ออกแบบมาเฉพาะ สามารถที่จะเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องมือวัด HP4140B pA Meter และทำการวัดลักษณะเฉพาะของมอสเฟตได้

4 ผลการทดลองการวัดลักษณะเฉพาะของมอสเฟตที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง

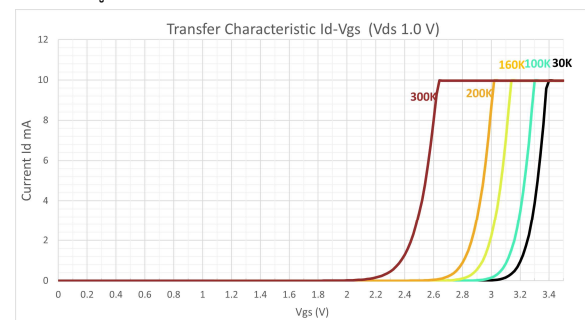
การวัดลักษณะเฉพาะโดยเครื่องมือ HP4140B pA Meter มีข้อจำกัดคือค่ากระแสสูงสุดที่จ่ายให้มอสเฟตได้คือไม่เกิน 10mA จึงทำให้ผลการทดลองสามารถแสดงช่วงที่มอสเฟตชนิด DMG4511SK4-13 ทำงานที่กำลังงานต่ำกระแสเดรนระดับมิลลิแอมป์ แต่ยังคงแสดงลักษณะเฉพาะที่สามารถนำมาศึกษาได้ค่อนข้างดี โดยแสดงเป็นกราฟในช่วงอุณหภูมิ 30K-300K ในรูปด้านล่างนี้



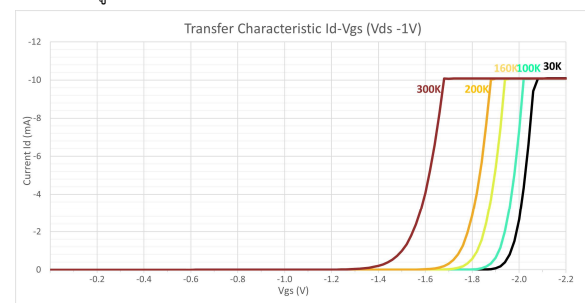
รูปที่ 2 กราฟลักษณะเฉพาะด้านออกของ NFET



รูปที่ 3 กราฟลักษณะเฉพาะด้านออกของ PFET



รูปที่ 4 กราฟลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของ NFET



รูปที่ 5 กราฟลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของ PFET

จากกราฟลักษณะเฉพาะด้านออกของมอสเฟต รูปที่ 2-3 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่า I_d ที่ผลต่าง V_{gs} และ V_{th} มีค่าที่มากพอในการทดลองนี้ใช้ค่า 0.9V และ -0.4V สำหรับมอสเฟต ชนิด NFET และ PFET ตามลำดับ จะเห็นแนวโน้มของค่า I_d มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง และจากกราฟลักษณะเฉพาะถ่ายโอน รูปที่ 4-5 พบว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Voltage, V_{th}) จะมีขนาดที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงสภาวะเย็นยวดยิ่ง ซึ่งอธิบายได้ว่าในสภาวะอุณหภูมิเย็นยวดยิ่งนั้นการสั่นของอะตอมในสารกึ่งตัวนำลดลง ส่งผลให้การกระเจิงของพาหะ (carrier scattering)

ลดลง สภาพการเคลื่อนที่ได้ของพาหะ (carrier mobility) จึงมากขึ้น [2],[3],[4] ส่งผลให้ค่า Id ของมอสเฟต มีค่าสูงขึ้นและ Vth จึงเพิ่มขึ้นตามอีกด้วย

5 การจำลองการทำงานของมอสเฟต

5.1 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลอง SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน (resistor) ตัวเก็บประจุ (capacitor) หรือทรานซิสเตอร์ (transistor) และอื่นๆ รวมถึงมอสเฟตนั้นมีการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองมาอย่างยาวนานควบคู่ไปกับเทคโนโลยีการผลิตที่มีความละเอียดมากขึ้นในระดับนาโนเมตร ความเข้าใจในการทำงานของมอสเฟตในทางกายภาพจึงถูกสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้จำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ SPICE จึงมีส่วนช่วยให้งานออกแบบวงจรต่างๆ มีความสะดวก รวดเร็วและมีความแม่นยำเทียบเท่ากับการทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์จริงยิ่งขึ้น

การทำงานของมอสเฟตแบ่งเป็น 3 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 ช่วงตัด (Cutoff region) $V_{gs} < V_{th}$ มอสเฟตจะไม่นำกระแส สมการพื้นฐานของกระแสเดรน (Id) ที่ใช้ใน SPICE จะพิจารณาได้ดังนี้ [6]

$$I_d = 0 \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) มอสเฟตจะไม่นำกระแส แต่ในการทดลองจริงจะมี Id ค่าน้อยๆในระดับพิโคแอมป์ถึงนาโนแอมป์

ช่วงที่ 2 ช่วงไตรโอด (Triode region) $V_{gs} \geq V_{th}$ และ $V_{ds} > 0$, $V_{ds} < V_{gs} - V_{th}$ มอสเฟต เริ่มมีการนำกระแสแบบเชิงเส้น สมการของ Id ในช่วงไตรโอดคือ [6]

$$I_d = K_P \cdot \frac{W_{eff}}{L_{eff}} \cdot (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \cdot (V_{gs} - V_{th} - \frac{V_{ds}}{2}) \cdot V_{ds} \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) Id จะแปรผันตามค่าพารามิเตอร์ทรานคอนดักแตนซ์ (KP) และอัตราส่วนความกว้างแชนแนลยังผล (Weff) ต่อความยาวแชนแนลยังผล (Leff) ของมอสเฟต ส่วนพารามิเตอร์ λ (Lambda) คือ พารามิเตอร์ของการมอดูเลตความยาวในแชนแนล (Channel length modulation) [1]

ช่วงที่ 3 ช่วงอิ่มตัว (Saturation region) $V_{gs} \geq V_{th}$ และ $V_{ds} \geq (V_{gs} - V_{th})$ สมการกระแสเดรนในช่วงอิ่มตัว (Idsat) คือ [6]

$$I_d = \frac{K_P}{2} \cdot \frac{W_{eff}}{L_{eff}} \cdot (V_{gs} - V_{th})^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) Id จะมีค่าคงที่ในช่วงมอสเฟตอิ่มตัว พิจารณาสมการที่ (1-3) ข้างต้นเป็น SPICE พื้นฐาน (Level1) [6] ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของมอสเฟตโดยโปรแกรมจำลองต่างๆได้ แต่ยังไม่ละเอียดมากนัก จึงมีการพัฒนาแบบจำลอง SPICE (Level3) [6] ที่ลดเวลาในการจำลองให้

น้อยลงและมีผลใกล้เคียงกับมอสเฟตจริงมากขึ้น สมการ Id จะแบ่งเป็น 2 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 ช่วงตัด Id จะเป็นศูนย์มอสเฟตไม่มีการนำกระแส จึงมีสมการเดียวกับมอสเฟต SPICE (Level1) สมการที่ (1) และช่วงที่ 2 ช่วงไตรโอด เมื่อ $V_{gs} > V_{th}$ สมการ Id เป็นดังนี้ [6]

$$I_d = \beta \cdot (V_{gs} - V_{th} - \frac{1 + f_b}{2} \cdot v_{de}) \cdot v_{de} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) Id จะมี β (beta) เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลอย่างมาก โดยที่สมการของ β (beta) เป็นดังนี้ [6]

$$\beta = K_P \cdot \frac{W_{eff}}{L_{eff}} = \mu_{eff} \cdot C_{ox} \cdot \frac{W_{eff}}{L_{eff}} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) สังเกตได้ว่าเป็นพจน์แรกเหมือนกับ SPICE (Level1) แต่ในส่วนนี้จะมีค่าที่น่าสนใจคือสภาพเคลื่อนที่ได้ยังผล μ_{eff} (Effective mobility) และ ค่าความจุของชั้นออกไซด์ C_{ox} (Oxide capacitance) เพิ่มขึ้นโดยมีสมการดังนี้ [6]

$$\mu_{eff} = \frac{U_0}{1 + \Theta(V_{gs} - V_{th})} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) สภาพการเคลื่อนที่ได้ยังผลจะพิจารณาการลดลงของสภาพการเคลื่อนที่ได้ของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำ U_0 (Low-field bulk mobility) เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าตามขวางที่เพิ่มขึ้นจากการจ่าย V_{gs} จะทำให้สภาพการเคลื่อนที่ได้ลดลงแปรตามค่า V_{gs} [1] โดย Θ (Mobility degradation factor, Θ) เป็นพารามิเตอร์จากการทดลองที่แสดงการลดลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ จากสมการที่ (4) f_b คือสัมประสิทธิ์การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ของประจุใน bulk [7] มีผลต่อ Id สำหรับมอสเฟตทั่วไปที่มีความกว้างและความยาวของแชนแนลในระดับไมโครเมตรไม่มากนัก แต่จะมีผลเมื่อมอสเฟตที่มีเทคโนโลยีการผลิตในระดับนาโนเมตรมีแชนแนลขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร [1] ค่า f_b เป็นการแสดงผลกระทบของมอสเฟตที่มีแชนแนลสั้น (Short Channel effect) และมอสเฟตที่มีแชนแนลแคบ (Narrow width effect) มีสมการดังนี้[6]

$$f_b = f_n + \frac{\Gamma \cdot f_s}{4 \cdot \sqrt{(\Phi_I + V_{sb})}} \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) อธิบายได้ว่า f_b จะมีค่าที่เป็นผลกระทบจาก correction factor ของปรากฏการณ์มอสเฟตแชนแนลแคบ (Narrow channel effect) f_n และ correction factor ของปรากฏการณ์มอสเฟตแชนแนลสั้น (Short channel effect) f_s [7] ส่วน Γ (body effect) คือค่าสัมประสิทธิ์แรงดันภายใน bulk และ source ซึ่งส่งผลต่อแรงดัน V_{th} [7] ส่วน Φ_I (Surface inversion potential) คือ ค่าศักย์พื้นผิวในขณะที่เป็นภาวะเกิดการผกผันแบบเข้ม [7] จากสมการที่ (4) ค่า v_{de} (effective drain voltage) ใช้เพื่อการจำลอง Id ช่วงเปลี่ยนจากไตรโอดเป็นช่วงอิ่มตัว ที่มีความโค้งใกล้เคียงมอสเฟตจริงมากขึ้นโดยในช่วงไตรโอด v_{de}

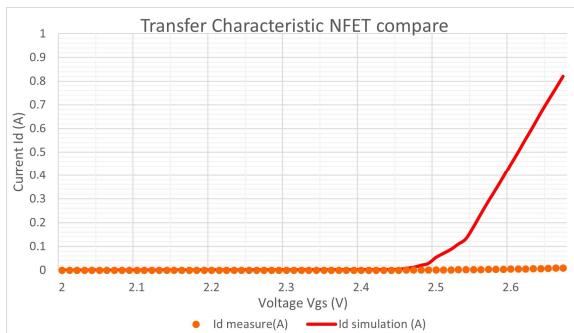
จะมีค่าเท่ากับ V_{ds} ส่วนในช่วงเปลี่ยนผ่านจากไทรโอดเป็นช่วงอิ่มตัว v_{de} จะเป็นค่าแรงดันอิ่มตัว V_{dsat} หมายถึง V_{ds} ที่มากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ แชนแนลถูกบีบปิด เรียกว่า channel pinch-off จะไม่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของ V_{ds} อีกและจะอิ่มตัวเป็น I_{dsat} [1]สมการของ V_{dsat} เป็นดังนี้[6]

$$V_{dsat} = \frac{V_{gs} - V_{th}}{1 + f_b} + \left(\frac{V_{MAX} \cdot \text{Leff}}{us} \right) - \left[\left(\frac{V_{gs} - V_{th}}{1 + f_b} \right)^2 + \left(\frac{V_{MAX} \cdot \text{Leff}}{us} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

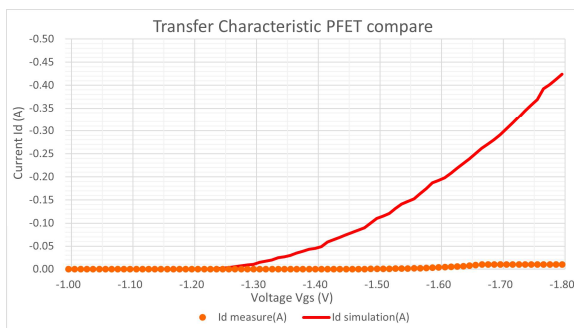
จากสมการที่ (8) V_{dsat} จะขึ้นอยู่กับผลต่าง $V_{gs}-V_{th}$ รวมถึงผลจากความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดของพาหะ V_{MAX} (Maximum drift velocity) และสภาพเคลื่อนที่ได้ยังผลบนพื้นผิว us (effective surface mobility)

5.2 ผลการจำลองการทำงานมอสเฟตเปรียบเทียบกับผลการวัดจริง

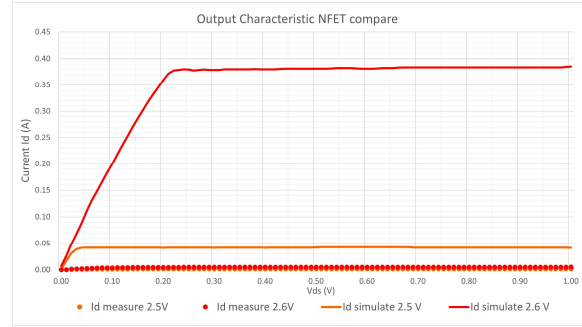
มอสเฟต DMG4511SK4 นั้นมีแบบจำลอง SPICE ที่สร้างขึ้นโดยบริษัทผู้ผลิต (Diodes incorporation) มาให้ใช้ในการจำลองวงจรอยู่แล้ว เป็น SPICE (Level3) จึงนำแบบจำลองนี้มาปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดลองวัดค่ามอสเฟตจริง โดยใช้โปรแกรม LTspice ในงานวิจัยนี้จำลองการวัดลักษณะสมบัติเฉพาะของมอสเฟต DMG4511SK4-13 เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ได้ผลเบื้องต้นดังรูปด้านล่างนี้



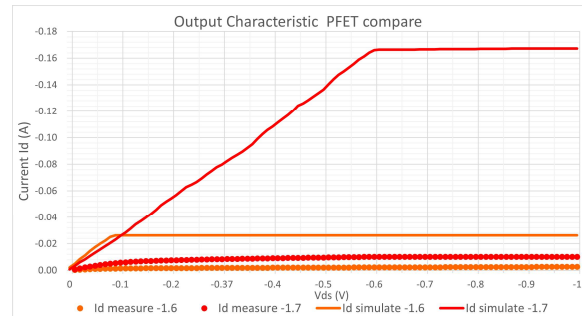
รูปที่ 6 กราฟลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของ NFET เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเดิมและการวัดจริง (อุณหภูมิ 300K)



รูปที่ 7 กราฟลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของ PFET เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเดิมและการวัดจริง (อุณหภูมิ 300K)



รูปที่ 8 กราฟลักษณะเฉพาะด้านออกของ NFET เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเดิมและการวัดจริง (อุณหภูมิ 300K)



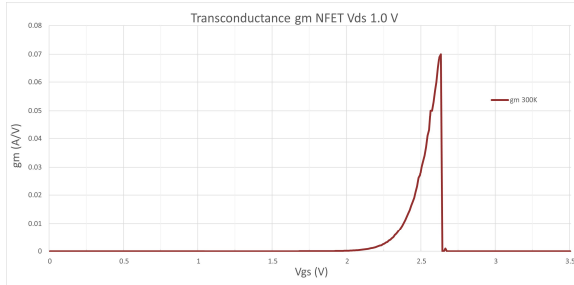
รูปที่ 9 กราฟลักษณะเฉพาะด้านออกของ PFET เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเดิมและการวัดจริง (อุณหภูมิ 300K)

จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองเดิมจากบริษัทผู้ผลิตกับผลการทดลองจริงดังรูปที่ 6-7 กราฟลักษณะเฉพาะของทั้ง NFET และ PFET แบบจำลองมีค่า I_d สูงกว่าการวัดจริงมาก โดยค่า I_d จากแบบจำลอง NFET สูงสุดที่ 0.8A แตกต่างจากการวัดจริงที่ค่า I_d ได้เพียง 10mA ส่วนแบบจำลอง PFET ค่า I_d สูงสุดที่ -0.42A และจากรูปที่ 8-9 กราฟลักษณะเฉพาะด้านออกของ NFET แสดงผลการจำลองค่า I_d จากแบบจำลองได้สูงถึง 1A และของ PFET แสดงผลการจำลองของ I_d ได้ -0.16A (-160mA) แบบจำลองทั้งสองมีค่า I_d มากกว่าการทดลองจริงที่ได้เพียง 10mA แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเดิมจากผู้ผลิตนี้ยังมีการจำลองค่า I_d แตกต่างอย่างมากจากค่าที่วัดได้จริง ในช่วงที่มอสเฟตทำงานที่กระแสน้อยๆ หรือช่วงพลังงานต่ำ จึงต้องมีการศึกษาผลการทำงานทางกายภาพของมอสเฟตนี้ และปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการนำ I_d และ V_{th} เพิ่มเติม เพื่อให้ผลการจำลองมีความสอดคล้องกับการวัดมอสเฟตจริง

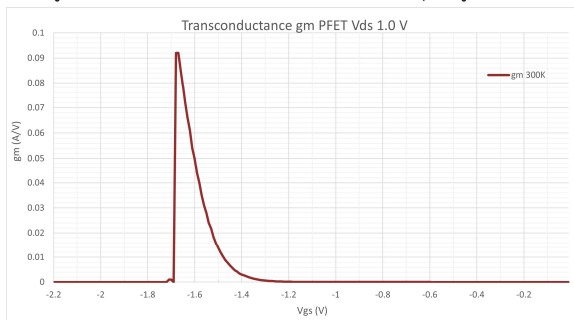
5.3 การปรับพารามิเตอร์ในแบบจำลอง SPICE ของมอสเฟต

การปรับค่าพารามิเตอร์แรกจะพิจารณาค่า V_{th} ก่อน โดยอ้างอิงจากผลการวัดลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของมอสเฟต รูปที่ 4-5 ที่อุณหภูมิห้อง (300K) ค่า V_{th} โดยการใช้วิธีค่าทรานคอนดักแตนซ์สูงสุด (Maximum transconductance) [1],[5] คือการพิจารณาช่วงที่มอสเฟตนำกระแสแบบไทรโอด ความชันของ I_d จะมีค่าคงที่จึงประมาณ V_{th} จากเส้นความชันที่เริ่มมีการนำกระแส จากรูปที่ 4-5 V_{th} ของ NFET คือ 2.45V ซึ่งเท่ากับแบบจำลองเดิมแล้ว และ V_{th} ของ PFET คือ -1.54V เท่ากับ

แบบจำลองเดิมเช่นกัน V_{th} จึงไม่เปลี่ยนแปลง จากสมการที่ 4-6 พารามิเตอร์ตัวต่อไปที่มีผลกระทบต่อ I_d มากที่สุด คือ KP ซึ่งสามารถหาได้โดยเป็นการประมาณค่า จากกราฟทรานคอนดักแตนซ์ (g_m) ในรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 10 กราฟทรานคอนดักแตนซ์ของ NFET (อุณหภูมิ 300K)

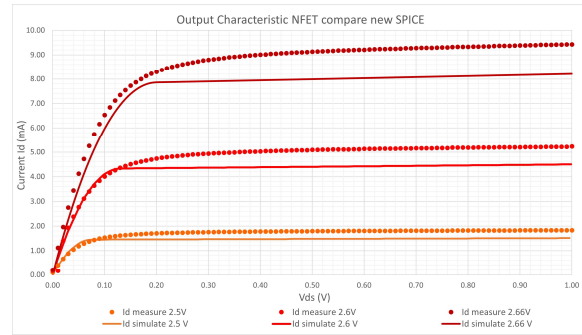


รูปที่ 11 กราฟทรานคอนดักแตนซ์ของ PFET (อุณหภูมิ 300K)

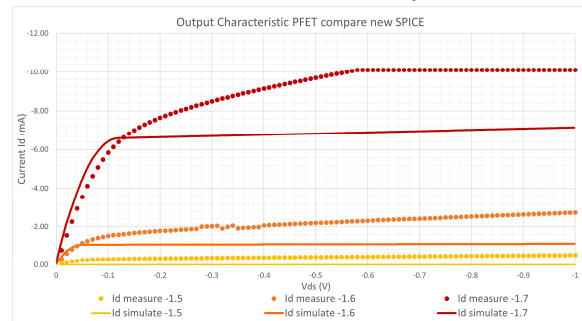
จากรูปที่ 10-11 สามารถนำค่า g_m สูงสุดที่วัดในช่วง V_{ds} มีค่าสูง เช่น 1V มอสเฟตจะทำงานในช่วงอิมิตัว อ้างอิงจากสมการที่ (3) โดยยังไม่คิดผลของพารามิเตอร์ λ ให้เป็นศูนย์ สมการของ g_m จะเป็นดังนี้ [1]

$$g_m = \frac{\partial I_{dsat}}{\partial V_{gs}} \approx KP \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{gs} - V_{th}) \quad (9)$$

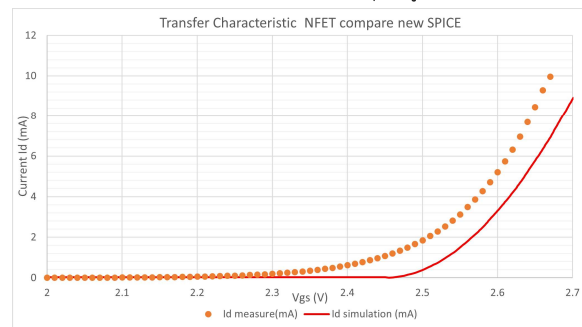
จากสมการที่ (9) สามารถอ้างอิงค่า W และ L จาก SPICE ของมอสเฟตนี้ มีค่าเท่ากันที่ $1\mu m$ อัตราส่วนของ W และ L จึงเป็น 1 เมื่อคำนวณกลับเพื่อหาค่า KP โดยแทนค่า g_m สูงสุดของ NFET และ PFET จากรูปที่ 10-11 เป็นค่า 0.07 , 0.092 A/V ตามลำดับ จะคำนวณ KP ของ NFET ได้เป็น $0.39 A/V^2$ ลดลงจากค่าเดิมที่ $43.98 A/V^2$ และค่า KP ของ PFET เป็น $0.71 A/V^2$ ลดลงจากค่าเดิมที่ $16.62 A/V^2$ เมื่อปรับค่า KP ใส่ใน SPICE ใหม่ และปรับค่า VMAX ให้เป็นค่ามาตรฐานตามของ SPICE [6] โดยค่า VMAX ของ NFET คือ $8.46e+4 cm/s$ จากค่าเดิม $1.0e+6 cm/s$ และของ PFET คือ $4.30e+4 cm/s$ จากค่าเดิม $1.56e+5 cm/s$ จะได้ผลการจำลองที่สอดคล้องใกล้เคียงการวัดจริงมากขึ้นในรูปด้านล่างนี้



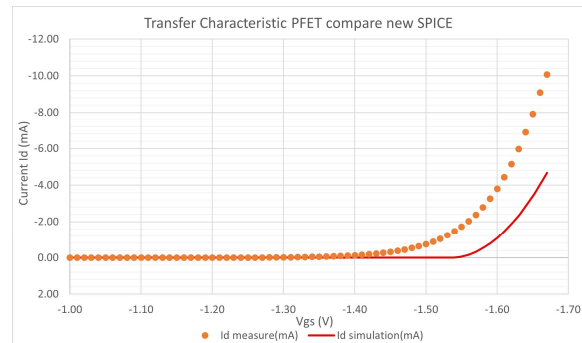
รูปที่ 12 กราฟลักษณะเฉพาะด้านออกของ NFET เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองใหม่และการวัดจริง (อุณหภูมิ 300K)



รูปที่ 13 กราฟลักษณะเฉพาะด้านออกของ PFET เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองใหม่และการวัดจริง (อุณหภูมิ 300K)



รูปที่ 14 กราฟลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของ NFET เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองใหม่และการวัดจริง (อุณหภูมิ 300K)



รูปที่ 15 กราฟลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของ PFET เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองใหม่และการวัดจริง (อุณหภูมิ 300K)

จากรูปที่ 12-15 ผลการจำลองแบบจำลองใหม่พบว่ากราฟลักษณะเฉพาะด้านออก และลักษณะเฉพาะถ่ายโอน จากแบบจำลองใหม่ของ NFET มีค่าใกล้เคียงการวัดจริงอย่างมาก ส่วนกราฟลักษณะเฉพาะด้านออกและลักษณะเฉพาะของ PFET มีค่าใกล้เคียงการวัดจริงมากขึ้นแต่ยังมีส่วนที่แตกต่างอยู่บ้าง คาดว่าเป็นผลจากความละเอียดความยาวของแซนแนลมีผลกระทบกับ PFET มากกว่า NFET

6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวัดลักษณะเฉพาะถ่ายโอนของมอสเฟตในช่วงอุณหภูมิเย็นยวดยังพบว่า V_{th} จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างชัดเจน และการวัดลักษณะเฉพาะด้านออกพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่าผลต่าง V_{gs} และ V_{th} ช่วงค่าที่เหมาะสมพบว่า I_d ของมอสเฟต มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน การพิจารณาผลของอุณหภูมิจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบวงจรการทำงานของมอสเฟตอย่างมาก

ในส่วนของการปรับปรุงแบบจำลอง SPICE พบว่าแบบจำลองเดิมของมอสเฟตจากผู้ผลิตที่ทดลองในงานวิจัยนี้ยังจำลองผลไม่แม่นยำในช่วงที่มอสเฟตทำงานด้วยพลังงานต่ำ I_d มีค่าในช่วง mA จึงได้ศึกษาการปรับพารามิเตอร์ V_{th} KP และ VMAX เพื่อปรับแบบจำลองให้ได้ผลการจำลองใกล้เคียงการวัดจริงมากขึ้น สรุปในตารางที่ (1) ด้านล่างนี้ ผลที่ได้จากการจำลองของ NFET มีค่าใกล้เคียงการวัดจริงอย่างมาก แต่ของ PFET มีค่าที่บางช่วงยังแตกต่างจากการวัดจริงซึ่งเป็นผลจากการมอดูเลตความยาวแซนแนล ที่มีผลกระทบมากกว่า NFET จึงต้องมีการปรับปรุงแบบจำลองเพิ่มเติม จากการวิจัยแนวทางในการสร้างแบบจำลองของมอสเฟตนี้สามารถพัฒนาต่อสำหรับแบบจำลอง SPICE ในช่วงอุณหภูมิเย็นยวดยังให้ได้ผลใกล้เคียงการวัดจริงต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 1 สรุปการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอสเฟต

FET Type	Parameter	Default SPICE	New SPICE	unit
NFET	V_{th}	2.45	2.45	V
	KP	43.98	0.39	A/V^2
	VMAX	1.0e+6	8.46e+4	cm/s
PFET	V_{th}	-1.536	-1.536	V
	KP	16.62	0.71	A/V^2
	VMAX	1.56e+5	4.30e+4	cm/s

7 กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสมาชิกของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) ที่ให้คำแนะนำการใช้งานเครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณทุนการศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนเงินทุนการศึกษาและการทำวิจัยนี้แก่ผู้เขียน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทรงพล กาญจนชูชัย, อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559

- [2] Homulle, H. (2019). Cryogenic electronics for the read-out of quantum processors .<https://doi.org/10.4233/uuid:e833f394-c8b1-46e2-86b8-da0c71559538>
- [3] Chao Luo, Zhen Li, Teng-Teng Lu, Jun Xu,Guo-Ping Guo, (2018),MOSFET characterization and modeling at cryogenictemperatures,<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.12.009>International
- [4] Yuanke Zhang, Teng-teng Lu, Wenjie Wang, Yujing Zhang, Jun Xu, Chao Luo and Guo-ping Guo, (2021), Characterization and Modeling of Native MOSFETs Down to 4.2 K, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 68, NO. 9
- [5] T.-Y. Yang, A. Ruffino, J. Michniewicz, Y. Peng, E. Charbon and M. F. Gonzalez-Zalba,(2020), Quantum Transport in 40-nm MOSFETs at Deep-Cryogenic Temperatures, IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 41, NO. 7
- [6] Synopsys Inc., HSPICE® Reference Manual: MOSFET Models version-2013.03
- [7] A. Vladimirescu and S. Liu, The Simulation of MOS Integrated Circuits Using SPICE2, ERL Memo No. M80/7, Electronics Research Laboratory University of California, Berkeley, October 1980



ประวัติผู้เขียนบทความ

นายบุญมงคล บุญสม

จบการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ.2555 เริ่มต้นทำงานที่บริษัท โซนี่เทคโนโลยี ประเทศไทย ในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า (Electrical Engineer) ตั้งแต่ พ.ศ.2556-2567 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ในสาขาวัสดุและอุปกรณ์ขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความสนใจในเรื่องนาโนอิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบและการผลิตวงจรรวม และคอนดัคคอมพิวเตอร์