



การออกแบบและพัฒนางจรอ่านข้อมูลสำหรับเซนเซอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไวต่อไอออน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การออกแบบและพัฒนางจรอ่านข้อมูลสำหรับเซนเซอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไวต่อ
ไอออน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผน ก แบบ ก 2

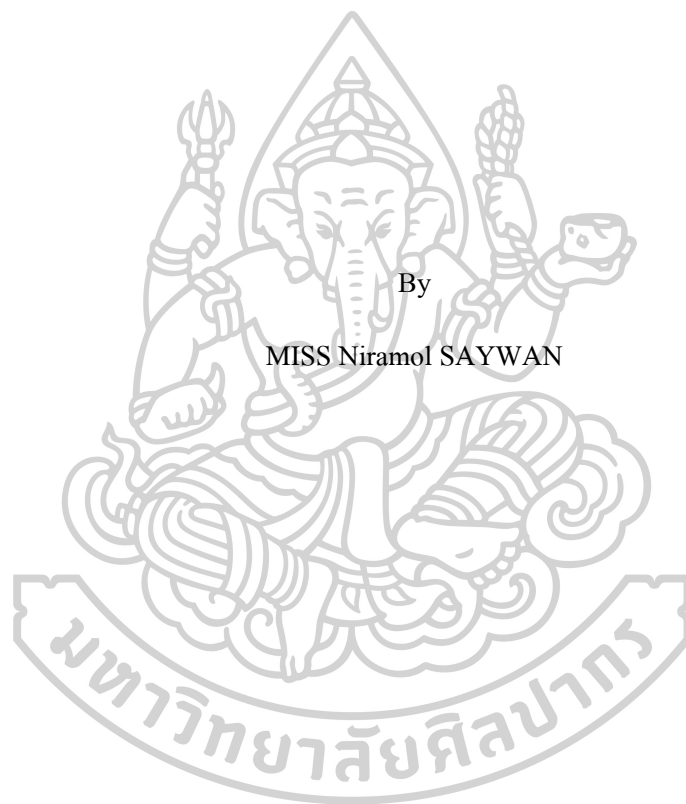
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DESIGN AND DEVELOPMENT OF READOUT CIRCUITS FOR ION-SENSITIVE
FIELD-EFFECT TRANSISTOR SENSOR.



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING)

Department of ELECTRICAL ENGINEERING

Academic Year 2024

Copyright of Silpakorn University

640920026 : วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : ย่านสัญญาณที่กว้าง,ความเป็นเชิงเส้นสูง,วงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET

นางสาว นิรมล สายหวาน: การออกแบบและพัฒนางจรรอ่านข้อมูลสำหรับเซนเซอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไวต่อไอออน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา เจวจินดา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบและพัฒนางจรรอ่านข้อมูลสำหรับเซนเซอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ที่ไวต่อไอออนหรือ เซนเซอร์ ISFET (The ion-sensitive field-effect transistor) มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนางจรรอ่านข้อมูลสำหรับเซนเซอร์ ISFET ให้มีย่านสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่กว้างและมีความเป็นเชิงเส้นสูงรวมถึงการบริโภคพลังงานต่ำ โดยวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ออกแบบประกอบไปด้วย วงจรหลัก 2 วงจร คือ วงจรเซนเซอร์ ISFET และวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ซึ่งภายในวงจรรอ่านข้อมูลนี้จะประกอบไปด้วยวงจรรขยายความนำถ่ายไอออน (OTA) และ วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror)

การจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม LTspice โดยใช้เทคโนโลยี CMOS $0.8\mu\text{m}$ ของ (TMEC) ซึ่งในส่วนของวงจรรเซนเซอร์ ISFET พัฒนาจากมอสทรานซิสเตอร์ ชนิดเอ็น (Level 3) และส่วนของวงจรรอ่านข้อมูลใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (Level 49) และชนิดเอ็น (Level 49) ต่อร่วมกับตัวต้านทาน $500\text{k}\Omega$ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรง $\pm 3.3\text{V}$ จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET พบว่ามีความกว้างของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 3.1V มีค่าความเป็นเชิงเส้น (R^2) 0.9994 และมีความไวอยู่ที่ 38.3mV/pH รวมถึงมีการบริโภคพลังงานต่ำเพียง $34.42\mu\text{W}$

640920026 : Major (ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING)

Keyword : wide range highly linear ISFET readout circuit

MISS Niramol SAYWAN : Design and development of readout circuits for ion-sensitive field-effect transistor sensor. Thesis advisor : Assistant Professor Yutana Jewajinda, Ph.D.

This thesis presents the design and development of a readout circuit for ISFET sensors, aiming for a wide reference voltage range, high linearity, and low power consumption. The ISFET sensor readout circuit consists of two main parts: the ISFET sensor circuit (pH range 4-10) and the ISFET sensor readout circuit which includes Operational Transconductance Amplifier (OTA) circuit and Current mirror circuit.

The design was simulated using LTspice software with 0.8 μ m CMOS TMEC technology. The ISFET sensor circuit uses NMOS transistors (Level 3), while the readout circuit uses PMOS and NMOS transistors (Level 49) with a 500 Ω resistor, powered by \pm 3.3 V DC supply. From the performance test results show a wide reference voltage range of 0.6-3.1 V, high linearity ($R^2=0.9994$), sensitivity of 38.3 mV/pH for the range of 4-10 pH and power consumption of only 34.42 μ W



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการรับความอนุเคราะห์และความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา เจวจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภมร ศิลาพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ระพีพันธ์ แก้วอ่อน หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ ที่เอื้อต่อการทำวิจัย และ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัณธิดา พันธุ์เจริญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้เกียรติเป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายใน ในการสอบวิทยานิพนธ์ กรุณาให้ข้อเสนอแนะในการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. อภิรดี ยอดเทียน ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และให้คำปรึกษาตลอดจนแนะนำแนวทางต่างๆ ในการดำเนินงาน และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วินัย ใจกล้า อาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เกียรติเป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกในการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้ข้อเสนอแนะในการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์แก่ผู้สนใจไม่มากนักน้อยประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังที่กล่าวไป จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จ สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวที่เลี้ยงดูและคอยมอบกำลังใจให้เสมอมา รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ และ น้องๆ ที่คอยเป็นกำลังใจ ทั้งให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องมาโดยตลอด หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย และยินดีที่จะน้อมรับคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

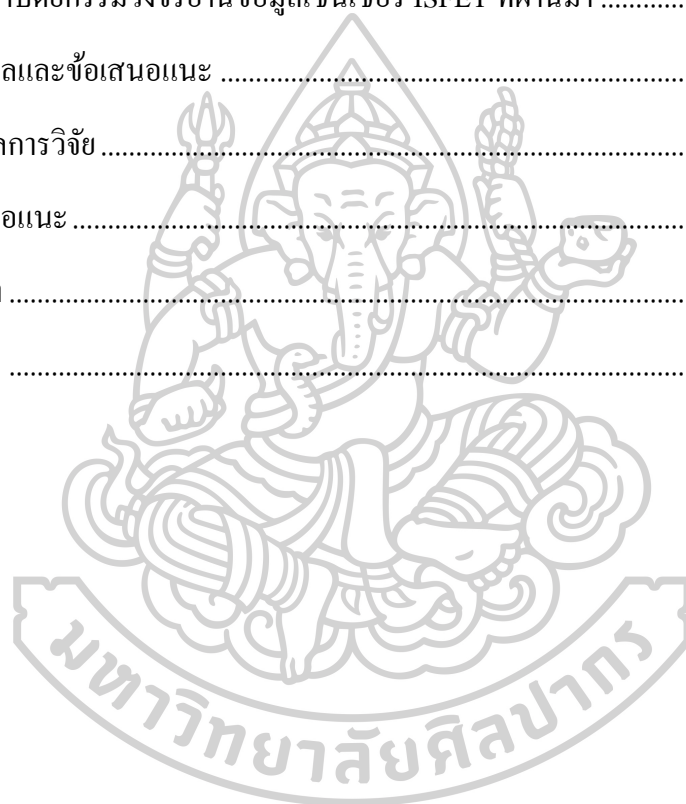
นิรมล สายหวาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐาน.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 มอสมิทธานซิสเตอร์.....	4
2.1.1 สัญลักษณ์ของมอสมิทธานซิสเตอร์	5
2.1.1.1 มอสมิทธานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ใหม่ด	7
2.1.1.2 มอสมิทธานซิสเตอร์แบบดีพลีชั่นใหม่ด	7
2.1.2 เทคโนโลยีของซิมอส	8
2.1.3 ทฤษฎีการทำงานของมอสมิทธานซิสเตอร์	9
2.1.3.1 ย่านไม่นำกระแส (Cutoff).....	10
2.1.3.2 ย่านความต้านทานหรือย่านเชิงเส้น (Ohmic Region).....	11
2.1.3.3 ย่านนำกระแสอิ่มตัว (Saturation Region).....	13
2.1.4 มอสมิทธานซิสเตอร์ในย่าน Subthreshold	15

2.2 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดไวต่อไอออน (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor: ISFET)	17
2.2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ ISFET	17
2.2.2 คุณสมบัติและหลักการทำงานของ ISFET	18
2.3 นิยามการบอกระดับความเป็นกรด-เบส (pH)	20
2.4 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.4.1 การพัฒนาวงจรรอ่านข้อมูล AIS แบบ Complementary ที่มีการป้อนกลับจากขาเกต	20
2.4.2 วงจรรอ่านข้อมูล ISFET แบบ BTR ด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า	24
2.4.3 วงจรรอ่านข้อมูล ISFET แบบ โหมดกระแส	25
2.4.4 วงจรรอ่านข้อมูล ISFET แบบ Bridge-based ที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง	27
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	29
3.1. การวิเคราะห์วงจรถนเซเนอร์ ISFET	29
3.2 การวิเคราะห์วงจรถนสะท้อนกระแส (Current mirror)	31
3.3 การวิเคราะห์วงจรถนขยายความนำถ่ายไอออน (OTA) แบบใช้มอสทรานซิสเตอร์	35
3.4 การวิเคราะห์วงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET	38
3.5 การวิเคราะห์วงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET กรณีไม่เป็นอุดมคติ	39
บทที่ 4 การทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	41
4.1 การทดสอบวงจรถนเซเนอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10	42
4.1.1 การทดสอบวงจรถนเซเนอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อค่า pH4, pH7, และ pH10 เมื่อกำหนดให้แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2 V	42
4.1.2 การทดสอบวงจรถนเซเนอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อค่า pH4, pH7, และ pH10 เมื่อกำหนดให้แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) คงที่เท่ากับ 1.3V	44
4.2 การทดสอบวงจรถนสะท้อนกระแสแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์	45
4.3 การทดสอบวงจรถนขยายความนำถ่ายไอออนแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์	47

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อสารละลายที่มีค่า pH 4, pH7, และ pH10.....	48
4.5 การทดสอบประสิทธิภาพความไวในการตอบสนองต่อค่า pH และค่าความเป็นเชิงเส้น.....	49
4.6 การทดสอบประสิทธิภาพวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25°C, 50°C, 75°C, และ 100°C	52
4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ออกแบบ ในรูปที่ 3.7 กับสถาปัตยกรรมวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ผ่านมา	54
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการวิจัย	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
รายการอ้างอิง	58
ประวัติผู้เขียน	65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีไบโอเซนเซอร์มีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลาโดยมุ่งเน้นให้มีเสถียรภาพ ความไวและมีราคาประหยัดรวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเซนเซอร์ที่ถูกนำมาพัฒนาอยู่เสมอ นั้นก็คือเซนเซอร์ ISFET (The Ion-Sensitive Field-Effect Transistor) เนื่องจากเซนเซอร์ ISFET มีความแม่นยำและรวดเร็วในการตรวจวัด และการประมวลผล จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์อย่างมากและถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น การเก็บข้อมูลทางชีวการแพทย์ ได้แก่ การตรวจผลโลหิตและกรดยูเรียเพื่อใช้สำหรับวินิจฉัยโรค [1-4] อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชุดตรวจวิเคราะห์โรคเบื้องต้นได้เนื่องจากมีความแม่นยำและรวดเร็วจึงทำให้เข้ารับการรักษาได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น[5, 6] นอกจากนี้เซนเซอร์ ISFET ยังสามารถมีส่วนช่วยในการควบคุมค่า pH ในกระบวนการทางเคมี [7-9] รวมถึงการควบคุมค่า pH ในอาหารและเครื่องดื่มซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อสร้างความมั่นใจให้แก่ผู้บริโภคว่าอาหารและเครื่องดื่มมีมาตรฐานและมีคุณภาพ [10] เป็นต้น การวัดค่า pH ในสารละลายแบบทั่วไปจะใช้อิเล็กโทรดกระเปาะแก้ว (Glass Electrode) ที่มีข้อเสียคือมีขนาดใหญ่และเสี่ยงต่อการแตกได้ง่ายรวมถึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จึงเกิดการพัฒนามาเป็นเซนเซอร์ ISFET โดยเป็นการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ มอสเฟต (MOSFET) ด้วยการลอกชั้นฟิล์มเกตโลหะออกให้ขั้วเกตสัมผัสกับสารละลายพบว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิด จึงใช้อุปกรณ์ ISFET เป็นเซนเซอร์สำหรับวัดค่า pH แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ ISFET นั้นมีขนาดเล็กเกินไปทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงต้องใช้วงจรขยายสัญญาณร่วมกับเซนเซอร์ ISFET นั่นก็คือวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET

วงจรรอ่านข้อมูลมีความสำคัญต่อเซนเซอร์ ISFET เนื่องจากมีหน้าที่แปลงข้อมูลทางเคมีเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานต่อไปโดยวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET แบบทั่วไปที่นิยมใช้ได้แก่ Bridge-Type Readout (BTR), Active ISFET Sensor Readout (AIS) และ Complementary ISFET MOSFET Pair (CIMP) เป็นวงจรที่ถูกนำมาพัฒนาดังแสดงใน [11-14] งานวิจัย [11] จากวงจรในภาพที่ 2.19 เป็นวงจร BTR ที่มีข้อดีคือมีความไวสูงแต่มีย่านความกว้างของแรงดันอ้างอิงที่ไม่กว้างและมีความเป็นเชิงเส้นต่ำ อีกทั้งยังใช้อุปกรณ์เป็นจำนวนมากรวมถึงใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักส่งผลให้วงจรมีการบริโภคพลังงานสูง และวงจรภาพที่ 2.20 [11]

เป็นวงจร AIS ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 3 ตัว โดยวงจรนี้มีข้อดีคือใช้พลังงานต่ำและมีความไวสูงถึง 107.101 mV/pH แต่มีความเป็นเชิงเส้นเพียง 0.9884 และมีความกว้างของแรงดันอ้างอิงเพียง 0.8 ถึง 1.1V จากภาพที่ 2.21 และ 2.22 ใน [11] เป็นวงจรอ่านข้อมูลแบบ โหมดแรงดัน มีข้อดีหลายประการได้แก่มีความไวสูงและใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงตัวเดียวรวมถึงมีความเป็นเชิงเส้นสูง 0.9994 และ 0.9991 ตามลำดับ แต่ทั้งสองวงจรมีความกว้างของแรงดันอ้างอิงเพียง 0.8 ถึง 1.1V และ 1.1 ถึง 2.1V ตามลำดับ งานวิจัย [12] กล่าวว่าวงจรอ่านข้อมูล BTR นี้มีความไวและความเป็นเชิงเส้นสูงอยู่ที่ 77.93 mV/pH และ 0.9991 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามวงจรนี้ใช้ทั้งอุปกรณ์แพสซีฟ (Passive) และแอคทีฟ (Active) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัว ออปแอมป์ 2 ตัว ทรานซิสเตอร์ 7 ตัวและตัวต้านทานทั้งหมด 13 ตัว อีกทั้งมีความกว้างของแรงดันอ้างอิงเพียง 0.2 ถึง 0.4 V ในส่วนของวงจรอ่านข้อมูลแบบโหมดกระแสในงานวิจัย [13] ภายในวงจรนี้ประกอบไปด้วยวงจร CCII 2 วงจร ทำให้มีการใช้อุปกรณ์ แอคทีฟจำนวนหลายตัวและยังมีความไวต่ำเพียง 22 $\mu\text{A}/\text{pH}$ จากวงจรอ่านข้อมูล [14] ประกอบไปด้วยออปแอมป์และทรานซิสเตอร์ 4 ตัว โดยวงจรนี้มีความไวต่ำเพียง -37 mV/pH

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาค้นคว้า ออกแบบและพัฒนาวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ให้มีย่านแรงดันอ้างอิงที่กว้างและมีความเป็นเชิงเส้นสูง รวมถึงใช้อุปกรณ์แพสซีฟจำนวนน้อยและใช้พลังงานต่ำโดยบริโกลพลังงานอยู่ที่ไมโครวัตต์ด้วยเทคโนโลยี CMOS 0.8 μm ด้วยการจำลองพฤติกรรมการณ์ถ่ายโอนสัญญาณระหว่างวงจร ISFET กับวงจรอ่านข้อมูลที่ปรับปรุงขึ้นใหม่กระทำด้วยการใช้โปรแกรม LTspice โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อค่า pH และการบริโภคพลังงานของวงจรที่ได้ออกแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ใช้สำหรับวัดค่า pH ในสารละลายเคมี โดยมีจุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยคือ

- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรอ่านข้อมูล ISFET
- 2) เพื่อออกแบบและสร้างวงจรอ่านข้อมูล ISFET ด้วยเทคโนโลยี CMOS 0.8 μm
- 3) เพื่อเพิ่มความกว้างแรงดันอ้างอิงและประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน
- 4) เพื่อประเมินประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ออกแบบกับวงจรอ่านข้อมูลในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3 สมมติฐาน

วงจรอ่านข้อมูลที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นสามารถอ่านค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ ISFET ได้อย่างแม่นยำโดยมีสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่กว้าง 0.6 ถึง 3.1V มีความไว 38.3mV/pHและ ความเป็นเชิงเส้นสูง 0.9994 รวมถึงมีอัตราการบริโภคพลังงานต่ำเพียง 34.42 μ W เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในอดีต

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยในการออกแบบและพัฒนาวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นมีดังนี้

- 1) ใช้อุปกรณ์แอกทีฟและพาสซีฟรวมกันไม่เกิน 10 ตัวในการออกแบบวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET
- 2) ใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงสูงสุดไม่เกิน $\pm 5V$
- 3) วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ออกแบบสามารถใช้งานกับสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10
- 4) ออกแบบและทำการจำลองพฤติกรรมการถ่ายโอนสัญญาณระหว่างวงจรเซนเซอร์ ISFET กับวงจรอ่านข้อมูลที่ได้ออกแบบด้วยเทคโนโลยี CMOS 0.8 μ m ด้วยการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม LTspice

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ออกแบบและพัฒนาวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่มีความไวและความเป็นเชิงเส้นสูง มีแรงดันอ้างอิงที่กว้างรวมถึงมีอัตราการบริโภคพลังงานต่ำสำหรับนำไปใช้ในการตรวจวัดค่า pH ในสารละลาย
- 2) สามารถนำวงจรที่ออกแบบมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิทยาศาสตร์หรืองานที่เกี่ยวข้องในด้านอื่นๆ
- 3) เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาวงจรอ่านข้อมูลสำหรับเซนเซอร์ ISFET ในอนาคตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

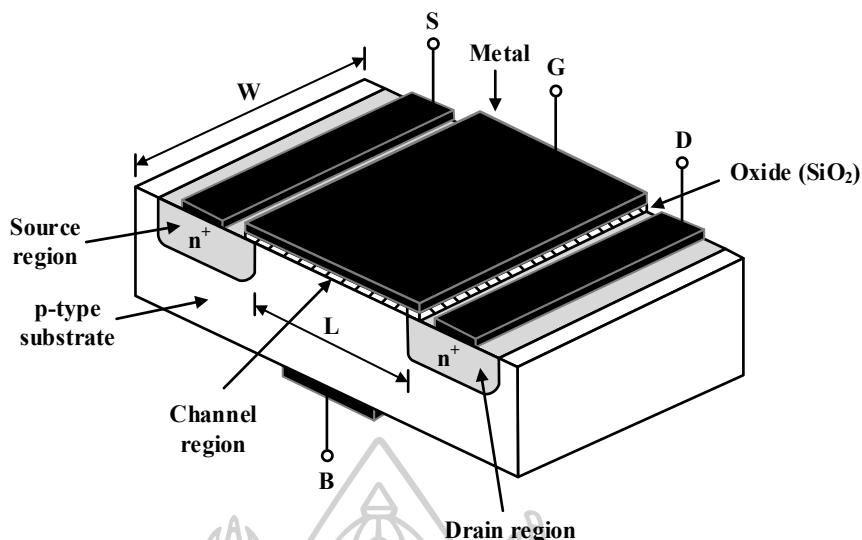
ในส่วนของบทนี้ผู้วิจัยจะทำการนำเสนอหลักการและทฤษฎีของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยรวมถึงศึกษาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาออกแบบและทำให้เกิดการพัฒนาในงานวิจัยนี้โดยประกอบด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 2.1 มอสมทรานซิสเตอร์ (MOS Transistor)
- 2.2 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดไวต่อไอออน (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor : ISFET)
- 2.3 นิยามการบอกระดับความเป็นกรด-เบส (pH)
- 2.4 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอสมทรานซิสเตอร์

มอสมทรานซิสเตอร์ (MOS Transistor) หรือเรียกว่ามอสเฟต (Metal oxide Semiconductor Field Effect Transistor: MOSFET) [15] เป็นทรานซิสเตอร์ประเภทหนึ่งที่มีลักษณะการทำงานแตกต่างจากทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ กล่าวคือ ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะมีลักษณะการทำงานคือใช้กระแสอินพุตเป็นตัวควบคุมกระแสเอาต์พุต แต่มอสเฟต หรือมอสมทรานซิสเตอร์จะมีลักษณะการทำงาน คือใช้แรงดันเป็นตัวควบคุมปริมาณสนามไฟฟ้าระหว่างรอยต่อให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงเพื่อบังคับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อ มีลักษณะเด่นคือ การสูญเสียพลังงานต่ำแต่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงเมื่อเทียบกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทอื่นๆ ที่มีลักษณะการใช้งานแบบเดียวกัน จึงเป็นที่นิยมในการพัฒนาสร้างเป็นวงจรรวมที่มีจำนวนตัวประกอบ (Component) มากๆ เช่นระดับไอซี LSI และ VLSI ทั่วไป โดยโครงสร้างของมอสมทรานซิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของมอสมทรานซิสเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ส่วนซับสเตรท (Substrate) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ซึ่งมีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น 2 ชุด ถูกแพร์ลงบนฐานรองสารกึ่งตัวนำนี้เรียกว่า ซอร์ส (Source) และ เดรน (Drian) บนผิวหน้าระหว่างซอร์สและเดรนจะมีแผ่นฟิล์มบางของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ส่วนบนของซิลิกอนไดออกไซด์ จะมีโพลิซิลิกอนซึ่งทำหน้าที่เรียกว่า เกท (Gate)



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์

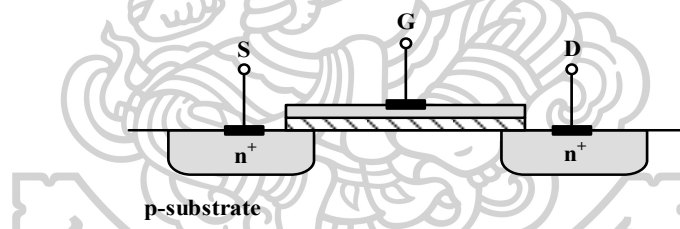
2.1.1 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์

สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์สามารถบอกได้ว่าเป็นมอสทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็น (N) หรือ พี (P) โดยดูที่หัวลูกศรที่ขาซอร์ส ถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาขาเกตแสดงว่าเป็น PMOS แต่ถ้าหัวลูกศรหันออกจากขาเกตแสดงว่าเป็น NMOS หรือดูที่ทิศทางของหัวลูกศรที่ขาบอดี (Body) หรือฐานรอง (Substrate) หรือบางที่อาจเรียกว่า Bulk โดยถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาเกตแสดงว่าเป็น NMOS แต่ถ้าหัวลูกศรหันออกจากขาเกตแสดงว่าเป็น PMOS อีกทั้งสัญลักษณ์ยังสามารถบอกได้อีกว่า มอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ โหมด หรือมอสทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชัน โหมด แสดงดังรูปที่ 2.2

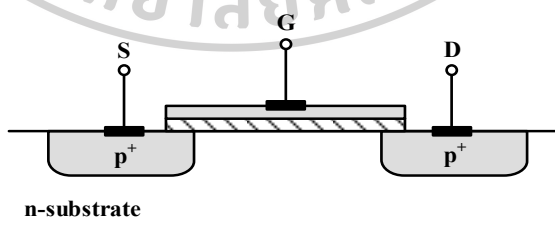
	Enhancement	Depletion	Enhancement	Depletion
PMOS				
NMOS				

รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ

โดยลักษณะโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ที่บริเวณเกตประกอบไปด้วย Metal-Oxide-Semiconductor ดังนั้นมอสทรานซิสเตอร์จึงมีกระแสไหลได้น้อยมากเนื่องจากมีชั้นของฉนวนกั้นอยู่ ทำให้ในการใช้งานมอสทรานซิสเตอร์ต้องการเพียงแหล่งจ่ายความต่างศักย์ที่เกตเท่านั้น ไม่ต้องการแหล่งจ่ายกระแส จึงทำให้มอสทรานซิสเตอร์มีการสูญเสียพลังงาน (Power Consumption) ต่ำนั่นเอง สำหรับเดรนและซอร์สนั้น ปกติจะมีโครงสร้างเหมือนกันทุกประการจึงสามารถใช้สลับกันได้อันเป็นคุณสมบัติพิเศษอีกประการหนึ่ง จากรูป 2.2 มอสทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งตามชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ 2 ชนิดคือ เอ็นแชนแนลมอสทรานซิสเตอร์ (N-Channel MOS Transistor: NMOS) และพีแชนแนลมอสทรานซิสเตอร์ (P-Channel MOS Transistor: PMOS) โดยเอ็นแชนแนลมอสทรานซิสเตอร์เป็นการใช้ประจุลบหรืออิเล็กตรอน (Electron) ในการนำกระแสจากเดรนไปยังซอร์สผ่านบริเวณช่องทางเดินกระแสซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีโดยเดรนและซอร์สเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แสดงดังรูปที่ 2.3 พีแชนแนลมอสทรานซิสเตอร์เป็นการใช้ประจุบวกหรือโฮล (Hole) ในการนำกระแสระหว่างเดรนและซอร์สเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 มอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS



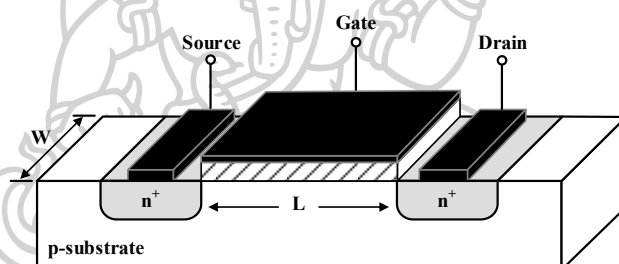
รูปที่ 2.4 มอสทรานซิสเตอร์ชนิด PMOS

ชนิดของมอสทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งได้โดยสารที่ใช้เป็นช่องลำเลียงอิเล็กตรอนคือ เอ็นแชนแนลและพีแชนแนลตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภทคือ มอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (Enhancement Mode Transistor) หรือเรียกว่าอีกอย่างหนึ่งว่า E-MOSFET

และมอสทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชัน โหมด (Depletion Mode Transistor) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า D-MOSFET ซึ่งในแต่ละแบบมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าในขณะที่ใช้งานต่างกันไป

2.1.1.1 มอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

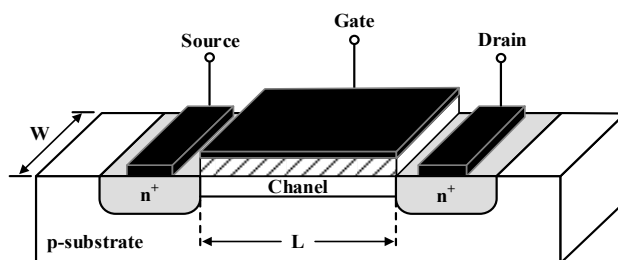
ประกอบด้วยชนิดเอ็นแชนแนลและพีแชนแนลซึ่งทั้งสองชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดชนิดพีแชนแนลจะเกิดจากการนำเอาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมาสร้างเป็นฐานรอง แต่มอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดชนิดเอ็นแชนแนล จะเกิดจากการนำเอาสารกึ่งตัวนำชนิดพีมาสร้างเป็นฐานรอง ซึ่งมีความหนาแน่นน้อย (Lightly Doped p-type Substrate) ที่มีอิเล็กโตรดบริเวณเดรนและซอร์สที่ต่อกับบริเวณสารกึ่งตัวนำ ที่ทำการเติมสารเจือชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นสูงเข้าไปที่ฐานรอง แต่บริเวณสารกึ่งตัวนำที่ถูกสารเจือนั้นไม่เชื่อมต่อกันเหมือนในกรณีของดีพลีชัน แต่จะเคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นฉนวนลงบนบอดี้แล้วทำการต่ออิเล็กโตรดที่เป็นโลหะเข้าที่เกต แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดชนิดเอ็นแชนแนล

2.1.1.2 มอสทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชัน โหมด

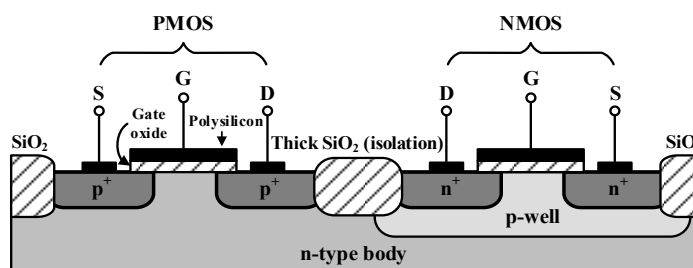
มอสทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชัน โหมด จะมีโครงสร้างคล้ายกับมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดแตกต่างกันที่ช่องระหว่างซอร์สและเดรนของมอสทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชัน โหมดจะมีการแพร่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นน้อย (Lightly Doped n-type Region) เรียกว่าแชนแนลโดยด้านบนแชนแนลนั้นมีฉนวนบางๆ ซึ่งทำจากซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากนั้นจึงวางอิเล็กโตรดเกตซึ่งเป็นโลหะลงบนซิลิกอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.6



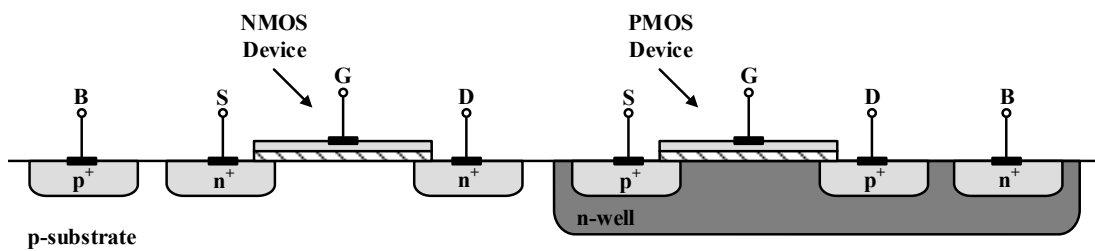
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบคิปลิชั่น โหมดชนิดเอ็นแชนแนล

2.1.2 เทคโนโลยีของซีมอส

เทคโนโลยีซีมอส (CMOS : Complementary MOS) เป็นการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) บนสารกึ่งตัวนำเดียวกัน มอสทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งจะถูกสร้างอยู่ในบ่อฐานรอง (Well) โดยทั่วไปแล้วจะนิยมสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี ในบ่อฐานรองชนิดเอ็น (N-Well) จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นในส่วนของ การสร้างซีมอสโดยใช้ทรานซิสเตอร์ PMOS และ NMOS โดยสังเกตได้ว่าทรานซิสเตอร์ PMOS สร้างได้บนฐานรองชนิดเอ็น (n-type body) ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ NMOS ต้องสร้างบ่อพี (P-Well) และจากรูปที่ 2.8 เป็นการสร้างซีมอสโดยใช้ทรานซิสเตอร์ PMOS ที่ล้อมรอบด้วยบ่อเอ็น (n-well) ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ NMOS อยู่ในฐานรองชนิดพี (p-substrate) เมื่อพิจารณา มอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นแชนแนลโหมดทางกายภาพในรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 เห็นได้ว่าวงจรรวมซีมอสประกอบไปด้วยช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นและช่องทางเดินกระแสชนิดพี ซึ่งจำเป็น อย่างมากในการทำให้ร่องชนิดเอ็นและชนิดพีในวงจรรวมซีมอสแยกจากกันทางไฟฟ้าดังเช่นรูปที่ 2.7 ดังนั้น กระบวนการสร้างบ่อพีแยก (p-well) ถูกใช้เป็นเทคนิคการสร้างวงจรรวมซีมอสโดย เริ่มต้นจากการโดปสารซิลิกอนชนิดเอ็นต่ำๆ ซึ่งช่องทางเดินกระแสชนิดพีของมอสทรานซิสเตอร์ ถูกสร้างขึ้น ต่อมากระบวนการสร้างบ่อพีแยก โดยมีช่องทางเดินกระแสเป็นชนิดเอ็นของ มอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.7 วงจรรวมซีมอสสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น



รูปที่ 2.8 วงจรรวมซีมอสสร้างบนฐานรองชนิดพี

2.1.3 ทฤษฎีการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์

มอสทรานซิสเตอร์จะมีหลักการทำงานคือ ใช้แรงดันเกตเพื่อควบคุมประจุพาหะหรือควบคุมแขนแนลระหว่างเดรนและซอร์ส ส่วนแรงดันที่ป้อนให้เดรนนั้น จะทำให้รอยต่อพี-เอ็นเป็นไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) ดังนั้นในกรณีของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแขนแนลแรงดันที่ขาเกตและเดรนจึงมีค่าเป็นบวก ในทำนองเดียวกันกรณีของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีแขนแนลแรงดันที่ขาเกตและเดรนจึงมีค่าเป็นลบ การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์เป็นลักษณะของการใช้แรงดันไฟฟ้าควบคุมปริมาณของกระแส โดยสมการกระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์หรือแบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่ของมอสทรานซิสเตอร์แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$k' = \mu_n C_{ox} \quad (2.1)$$

โดยที่

k' คือ ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (Transconductance)

μ_n คือ ค่าความคล่องของโฮลหรืออิเล็กตรอน (Surface Mobility of Carrier)

C_{ox} คือ ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์ (Capacitance per Unit Area of The Gate Oxide) มีค่าเท่ากับ ϵ_{ox} / T_{ox}

W คือ ความกว้างของแขนแนล (Channel Width)

L คือ ความยาวของแขนแนล (Channel Length)

V_{GS} คือ แรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส

V_{TH} คือ แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) เท่ากับ $V_{T0} + \gamma (\sqrt{2|\phi_F|} + V_{SB} \sqrt{2|\phi_F|})$

γ คือ แรงดันขีดเริ่มของฐานรอง (Bulk threshold voltage) ($V^{1/2}$)

ϕ_F	คือ ศักดาที่พื้นผิวในย่าน Strong inversion เท่ากับ $kT/q \ln(N_{SUB}/n_i)(V)$ เมื่อ $\phi_{F(substrate)}$ มีค่าเท่ากับ $-kT/q \ln(N_{SUB}/n_i)$ กรณี N-channel เมื่อ p เป็นฐานรอง
	$\phi_{F(gate)}$ มีเท่ากับ $-kT/q \ln(N_{GATE}/n_i)$ กรณี N-channel เมื่อ n^+ เป็น polysilicon gate
V_{SB}	คือ แรงดันระหว่างซอร์สกับฐานรอง
V_{DS}	คือ แรงดันระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส
n_i	คือ ความเข้มข้นของพาหะในตัวสารนั้น
k	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann (Boltzmann's constant)
T	คือ อุณหภูมิจริงขณะนั้น ($^{\circ}K$)
I_D	คือ กระแสเดรน
ϵ_0	คือ ค่า Permittivity ของ Free space เท่ากับ 8.854×10^{-14} F/cm
ϵ_{Si}	คือ ค่า Permittivity ของ Silicon เท่ากับ $11.7\epsilon_0$ F/cm
ϵ_{ox}	คือ ค่า Permittivity ของ SiO_2 เท่ากับ $3.9\epsilon_0$ F/cm

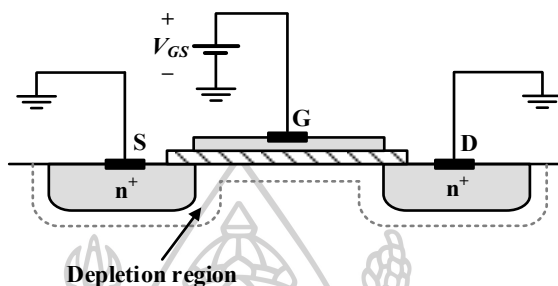
การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ต่างจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ หากพิจารณากรณี NMOS ทรานซิสเตอร์ เมื่อแรงดันที่ขาเกตสูงถึงค่าหนึ่งจะเรียกว่า “แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage: V_{TH})” ฐานรองที่อยู่ใต้ขาเกตจะเสมือนเป็นการกลับชนิดจาก P-type เป็น N-type (Inversion) เป็นผลให้ N-type ที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างขาซอร์สและเดรนนั้นยอมให้เกิดพาหะเพื่อนำพาอิเล็กตรอนผ่านไปได้ ซึ่งจะเรียกเงื่อนไขนี้ว่า Strong inversion มอสทรานซิสเตอร์ใน Strong inversion จะแบ่งการทำงานหลักเป็น 3 ย่าน (Region) โดยคุณสมบัติและการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งออกเป็นย่านต่าง ๆ ได้ ดังนี้

2.1.3.1 ย่านไม่นำกระแส (Cutoff)

เมื่อป้อนแรงดัน V_{GS} น้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH} : Threshold Voltage) หรือ $V_{TH} > V_{GS}$ สนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ที่เกิดจากแรงดัน V_{GS} จะผลักให้โฮลในสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสเคลื่อนที่ห่างออกไป ทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใต้ส่วนเกต ดังรูปที่ 2.9 ดังนั้นในกรณีนี้ เดรนและซอร์สยังคงถูกแยกจากกันด้วยชั้นของบริเวณ

ปิดคพาหะและเมื่อแรงดันเดรนซอร์สเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสเดรนเกิดการไหลแต่มีค่าน้อยมาก ประมาณ $I_D \approx 0$ ในสภาวะนี้มอสทรานซิสเตอร์ยังคงอยู่ในสภาวะคัทออฟ

$$I_D = 0 ; (V_{GS} - V_{TH}) \leq 0 \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.9 การเกิด Channel กรณีไม่นำกระแส ($V_{GS} - V_{TH}) \leq 0$

2.1.3.2 ย่านความต้านทานหรือย่านเชิงเส้น (Ohmic Region)

จากสมการที่ (2.1) เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์กระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอร์สจะได้เป็นรูปพาราโบลา ดังรูปที่ 2.10 และจะพบว่าที่ค่าสูงสุดของกราฟเมื่อลากเส้นต่อกันที่จุดทำให้กราฟสูงสุดมีค่าเท่ากับ แรงดันเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) จะมีค่าเท่ากับ ($V_{GS} - V_{TH}$) ซึ่งจุดนี้ก็คือจุดที่มอสทรานซิสเตอร์จะเริ่มทำงานในย่านอิ่มตัวซึ่งอาจจะเรียกว่าจุด Pinch-off ซึ่งแรงดันเดรน-ซอร์ส ที่จุดนี้จะเรียกว่าแรงดันเดรน-ซอร์สอิ่มตัว (Saturation) และเป็นเส้นขอบกำหนดย่านการทำงานระหว่างย่านไม่อิ่มตัวกับย่านอิ่มตัว ซึ่งอาจเขียนสมการได้ดังนี้

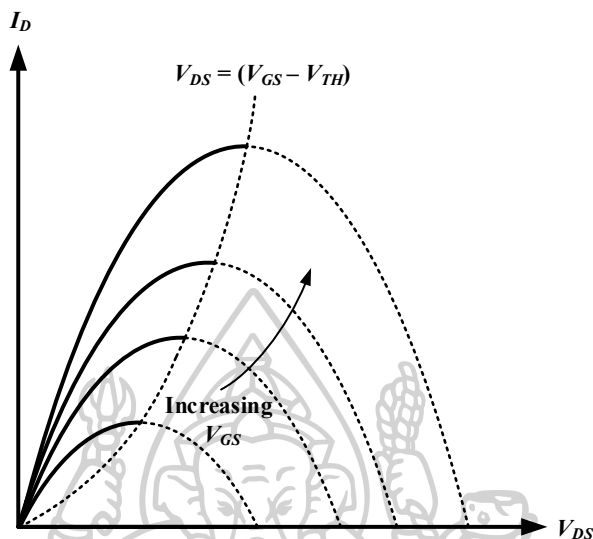
$$V_{DS(sat)} = V_{GS} - V_{TH} \quad (2.3)$$

ซึ่งถ้า V_{DS} มีค่าน้อยกว่า $V_{DS(sat)}$ มอสทรานซิสเตอร์จะทำงานในย่านไม่อิ่มตัว ซึ่งสามารถใช้สมการที่ (2.3) ได้ดังนี้

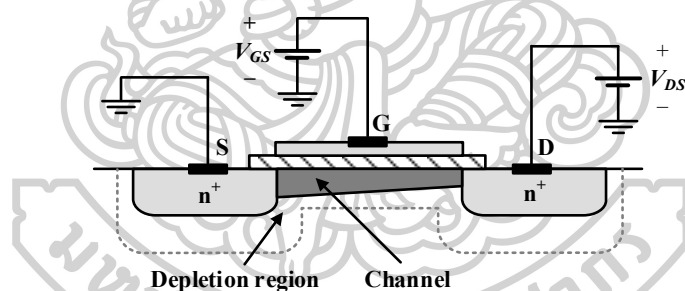
$$I_D = k' \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} ; (V_{GS} - V_{TH}) > V_{DS} \quad (2.4)$$

ในย่านการทำงานนี้แรงดัน ($V_{GS} - V_{TH}$) ต้องมากกว่าแรงดัน V_{DS} ทำให้สนามไฟฟ้าในชั้นฉนวน ออกไซด์ที่เกิดขึ้น มีค่ามากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนลในสารกึ่งตัวนำบริเวณใต้ส่วนเกต ดังรูปที่ 2.11 แชนแนลที่เกิดขึ้นนี้เสมือนเป็นแท่งสารกึ่งตัวนำที่มีความยาวเท่ากับ L โดยมีปลายทั้งสองด้านเป็นส่วนของซอร์สและเดรน เมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จะทำให้อิเล็กตรอนในแชนแนลเกิดการครีฟท์ (Drift) หรือเคลื่อนที่จากซอร์สไปยังเดรน ส่งผลให้มีกระแส I_D เกิดขึ้น



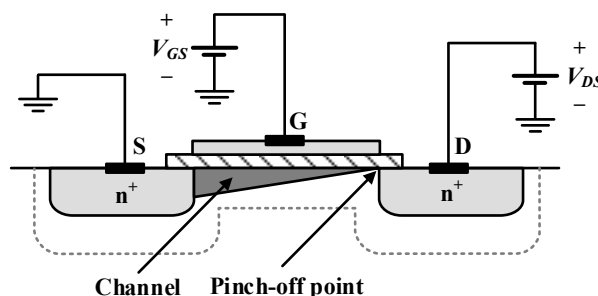
รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดัน-กระแสจากสมการของ Sah



รูปที่ 2.11 การเกิด Channel กรณีที่ ย่านไม่อิ่มตัว

เมื่อสังเกตจากกราฟของมอสทรานซิสเตอร์ย่านไม่อิ่มตัวดังรูปที่ 2.10 (ในด้านเส้นที่ข) กราฟจะเหมือนกับคุณสมบัติของความต้านทาน และค่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น จึงอาจจะเรียกช่วงการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์นี้ว่าย่านเชิงเส้น (Linear Region) หรือ Ohmic Region หรือ Triode Region เมื่อ V_{DS} มีค่ามากขึ้นจนทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่บริเวณปลายด้านเดรนมีค่าเท่ากับ V_{TH} ทำให้ขนาดของแชนแนลที่ปลายด้านเดรน มีค่าลดลงเป็นศูนย์ กล่าวคือแชนแนลขาดออกพอดีที่เดรน ดังรูปที่ 2.12 เรียกสถานะนี้ว่า สภาวะพิตช์ออฟ (Pinch off) ค่า V_{DS} ที่ทำให้เริ่มเกิดสภาวะพิตช์ออฟ เรียกว่า แรงดันเดรน-ซอร์สอิ่มตัว ($V_{DS(sat)}$) หรือเรียกว่า แรงดัน Pinch-off (V_{Pinch}) ในย่านอิ่มตัวนั้น ความต้านทานของแชนแนลจะแปรผกผันตรงกับ V_{DS}

โดยเมื่อ V_{DS} เริ่มมีค่าสูงกว่าเงื่อนไข $V_{DS(sat)}$ คุณสมบัติของกระแสจะชะลอตัวลงซึ่งนั่นหมายถึง มอสทรานซิสเตอร์จะเปลี่ยนย่านการทำงานไปเป็นย่านอิมิตัวซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.12 การเกิด Channel วิกฤติที่ $(V_{GS} - V_{TH}) = V_{DS}$ หรือ $V_{DS(sat)}$

2.1.3.3 ย่านนำกระแสอิมิตัว (Saturation Region)

เมื่อ V_{DS} มีค่ามากกว่า $(V_{GS} - V_{TH})$ หรือ $V_{DS(sat)}$ กระแสเดรนจะเป็นอิสระจาก V_{DS} ดังนั้นแทนที่สมการที่ (2.1) ด้วย $V_{DS(sat)}$ จะได้สมการของมอสทรานซิสเตอร์ในย่านอิมิตัวเท่ากับ

$$I_D = k' \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 ; 0 < (V_{GS} - V_{TH}) \leq V_{DS} \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.4) พบว่ากระแสเดรนจะไม่ขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของแรงดัน V_{DS} แต่ในความจริงแล้วไม่ถูกต้องเพราะในความจริงแล้วเมื่อแรงดัน V_{DS} เพิ่มขึ้นจะพบว่ากระแสเดรนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีลักษณะเป็นเชิงเส้นคล้ายกับในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เมื่อ V_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ระยะของแชนแนล หรือช่องนำกระแสมีค่าลดลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การมอดูเลตความยาวแชนแนล (Channel length modulation: λ) ซึ่งโดยทั่วไป λ จะมีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ และแปรผกผันกับค่า L โดยสมการกระแสของมอสทรานซิสเตอร์ย่านอิมิตัวที่สมบูรณ์จะเพิ่มองค์ประกอบ $(1 + \lambda V_{DS})$ เข้าไปทำให้สมการที่ (2.5) กลายเป็น

$$I_D = k' \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS}) ; 0 < (V_{GS} - V_{TH}) \leq V_{DS} \quad (2.6)$$

จากการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ทั้ง 3 ย่านดังสมการที่ (2.2), (2.3) และ (2.4) สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแบบ Normalized ได้ดังรูปที่ 2.13 โดยกำหนดให้ V_{GS0} กำหนดเป็นค่าของ V_{GS} ที่ทำให้เกิดค่ากระแสเดรน I_{D0} ในย่านอิมิตัว ซึ่งเป็นการขยายกราฟรูปที่ 2.10 ไปทางขวาโดยเส้นทึบแสดงความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์กรณี $\lambda = 0$ ส่วนกรณี $\lambda \neq 0$ กราฟจะแสดงด้วยเส้นประ เมื่อแรงดัน V_{DS} เพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติจุด Pinch-off ทาง

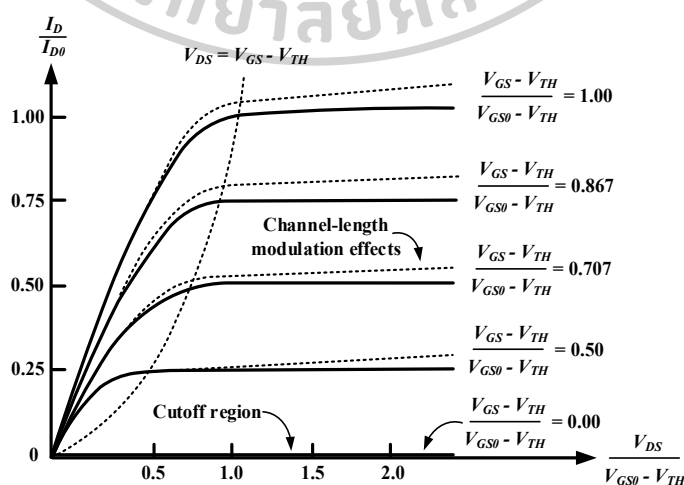
กายภาพจะมีการเลื่อนไปจากบริเวณขาคอนเล็กน้อย ซึ่งทำให้ค่า L ในทางปฏิบัติเปลี่ยนไป (สั้นลง) ทำให้เกิดแรงดันระหว่างซอร์สถึงจุด Pinch-off เปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้กระแสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งถ้าเทียบเคียงกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ก็สามารถเขียนในรูปแรงดัน Early Voltage ได้เช่นกันดังสมการที่ (2.7)

$$\lambda = \frac{1}{V_A} \quad (2.7)$$

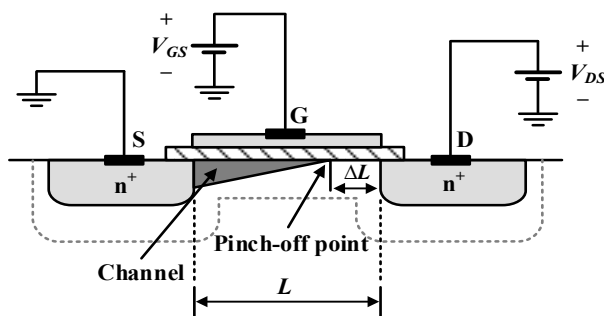
ทำให้สมการที่ (2.6) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_D = k' \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_A} \right) \quad (2.8)$$

โดยค่า Channel Length Modulation (λ) ของมอสทรานซิสเตอร์ก็จะเป็ค่าคงที่เช่นเดียวกันกับ Early Voltage (V_A) ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของ L ตัวอย่างเช่น กรณี $L = 1\mu\text{m}$, $\lambda \approx 0.04\text{V}^{-1}$ (NMOS), $\lambda \approx 0.05\text{V}^{-1}$ (PMOS) และกรณี $L = 2\mu\text{m}$, $\lambda \approx 0.01\text{V}^{-1}$ (NMOS), $\lambda \approx 0.01\text{V}^{-1}$ PMOS ในการออกแบบวงจรด้วยมอสทรานซิสเตอร์เพื่อลดผลกระทบของ Channel Length Modulation ทำได้โดยกำหนดให้ L มีขนาดใหญ่ ($> 5\mu\text{m}$) เป็นผลให้ $\Delta L \ll L$ ดังนั้นความยาวของแชนแนลจึงมีขนาดสั้นลงจากเดิมน้อยมาก จึงอาจประมาณได้ว่ามีขนาดความยาวเท่าเดิม ดังนั้นแม้ว่า V_{DS} จะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างซอร์สถึงจุด Pinch-off มีค่าคงที่เสมอ หรือ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง V_{DS} และเมื่อ V_{DS} เพิ่มขึ้นสูงกว่าแรงดันเดรน-ซอร์สอิ่มตัว กระแสเดรนจะประมาณได้ว่ามีค่าคงที่เท่ากับกระแสเดรนอิ่มตัว $I_{D(sat)}$ ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.5)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน และแรงดันที่ขาคอนซอร์ส



รูปที่ 2.14 การเกิด Channel กรณีที่ $(V_{GS} - V_{TH}) < V_{DS}$

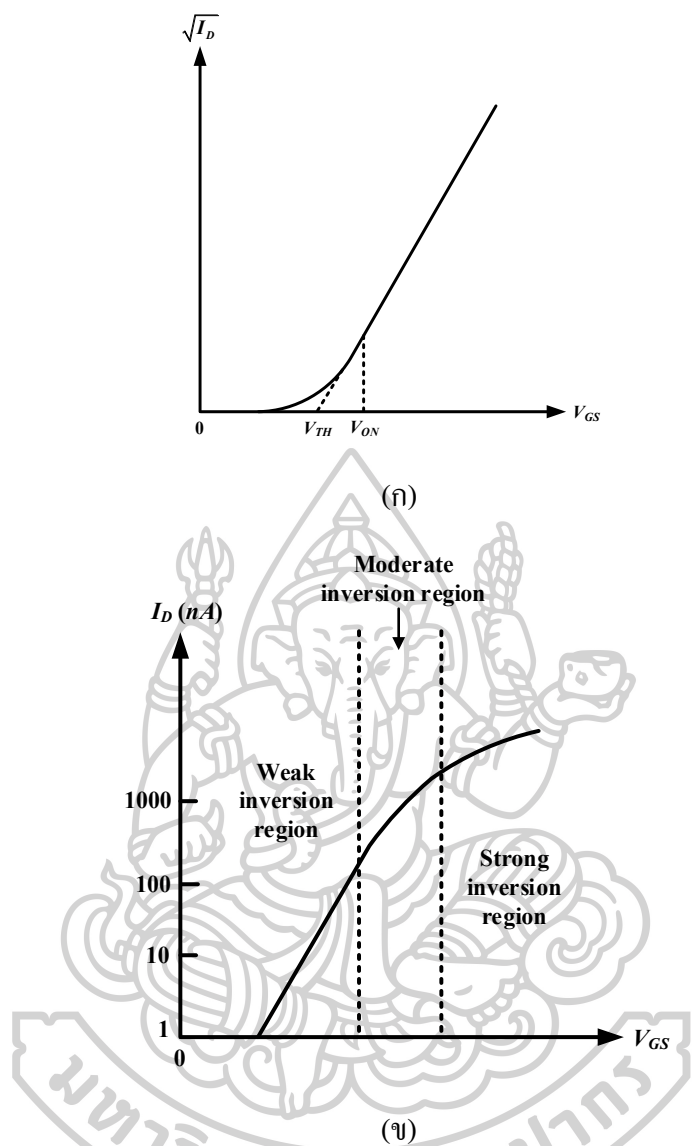
2.1.4 มอสมทรานซิสเตอร์ในย่าน Subthreshold

ในหัวข้อก่อนหน้าได้มีการกล่าวไว้ว่า จะไม่มีกระแสไหลถ้าแรงดันเกต-ซอร์สมีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม แต่ในความจริงแล้วไม่ถูกต้องเสียทีเดียว เนื่องจากเมื่อแรงดัน V_{GS} เข้าใกล้ V_{TH} คุณสมบัติจะเปลี่ยนจากกฎกำลังสอง (Square law) ไปเป็นฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล (Exponential) โดยที่ย่านการทำงานเมื่อ V_{GS} มีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม จะเรียกว่าย่าน Strong Inversion และในย่านการทำงานที่ต่ำกว่านั้นเรียกว่าย่าน Subthreshold หรือ Weak Inversion โดยคุณสมบัติของกระแส-แรงดันของมอสมทรานซิสเตอร์ในย่านอิมิตัวและทำการขยายด้วยการพล็อตในฟังก์ชันรากที่สองของแรงดันเกต-ซอร์สในรูป 2.15 (ก) จะพบว่าในช่วงที่แรงดัน V_{GS} มีค่าสูงกว่า V_{TH} กราฟจะเป็นเส้นตรง แต่เมื่อ V_{GS} ต่ำกว่า V_{TH} กราฟจะเป็นดังรูป 2.15 (ข.) จะมีย่านการทำงานที่อยู่ในย่าน Weak Inversion อย่างถูกต้อง เมื่อ I_D ต่ำกว่า 500 nA

การทำงานในย่าน Subthreshold นี้ แรงดัน V_{GS} จะไม่ถูกจำกัดด้วยแรงดันขีดเริ่มอีกต่อไปจึงเป็นประโยชน์ในการออกแบบและนำไปประยุกต์เป็นวงจรที่ใช้ไฟเลี้ยงต่ำๆ ได้ ซึ่งการทำงานของมอสมทรานซิสเตอร์จะทำงานคล้ายกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยสามารถประมาณค่ากระแสเดรนของมอสมทรานซิสเตอร์ในย่าน Subthreshold ได้ดังนี้

$$I_D \cong \left(\frac{W}{L}\right) I_{D0} \exp\left(\frac{V_{GS}}{\eta U_T}\right) \quad (2.9)$$

$$I_{D0} = 2\eta\mu_0 C_{ox} U_T^2 \left(\frac{W}{L}\right) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.15 (ก.) คุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ในย่านอิมิตัว (ข) ย่านการทำงานที่เกิดขึ้นจริง

3 ย่าน

โดยที่ (W/L) คือ ขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ n คืออัตราความชัน subthreshold ($n=1+C_{js}/O_{ox}$) เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับเทคโนโลยีที่ใช้ (โดยปกติ $1 < n < 3$ หรือประมาณค่าเท่ากับ 1.4) ส่วน $U_T = kT/q$ คือค่าแรงดันอุณหภูมิจริง (k คือ ค่าคงที่ Boltzmann, T คืออุณหภูมิจริง และ q คือ จำนวนประจุ) และ I_{D0} เป็นค่าพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.10) ในรูปที่ 2.15 (ข) แสดงย่านการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมด สามารถแบ่งขอบเขตของการทำงานในย่านต่าง ๆ ด้วยการประมาณค่ากระแส [16]

$$I_D > 10I_{D0} \quad (\text{Strong Inversion}) \quad (2.11)$$

$$10I_{D0} > I_D > 0.1I_{D0} \quad (\text{Moderate Inversion}) \quad (2.12)$$

$$I_D < 0.1I_{D0} \quad (\text{Weak Inversion}) \quad (2.13)$$

2.2 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดไวต่อไอออน (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor: ISFET)

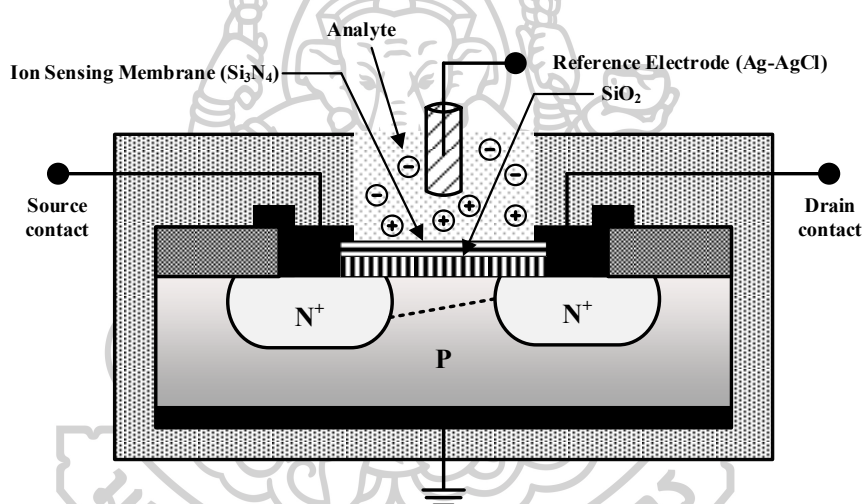
ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดไวต่อไอออน (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor : ISFET) เป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1970 โดย Piet Bergveld [2] และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น การควบคุมคุณภาพอาหารในอุตสาหกรรม การวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ และ การดูแลสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเห็นได้ว่า ISFET มีประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตเป็นอย่างมากทั้งในปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้

ต้นกำเนิดของ ISFET มาจากแนวคิดของมอสทรานซิสเตอร์ โดยอาศัยหลักการทำงานพื้นฐานของมอสทรานซิสเตอร์ด้วยการคิดแปลงช่องนำกระแส (Conducting channel) บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำด้วยการนำโลหะเกตออกจากมอสทรานซิสเตอร์และให้ไดอิเล็กทริกของเกตสัมผัสกับสารละลาย ไอออนจะถูกดูดซับบนพื้นผิวพบว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายและค่ากระแสในช่องทางเดินกระแส (Channel) จะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายหรือตามค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย

2.2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ ISFET

โครงสร้างของ ISFET เกิดจากการพัฒนาโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ให้สามารถตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสได้ โดยการกำจัดชั้นเกตโลหะออกเพื่อให้ชั้นเกตออกไซด์หรือชั้นฉนวนสัมผัสกับสารละลายโดยตรง และใช้อิเล็กโทรดไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ชนิด Ag-AgCl แทนโลหะเกต แสดงดังรูปที่ 2.16 โดยที่ชั้นฉนวนหรือชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน (Ion Sensing Membrane) เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้าง ISFET และมีการใช้ชั้นฉนวนมากกว่าหนึ่งชั้นสำหรับชั้นฉนวนที่สัมผัสกับฐานรองของซิลิกอนนิยมใช้ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปลูกจากกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อนและ ชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความเป็นกรด-เบส เนื่องจากมีคุณสมบัติในการป้องกันไม่ให้ไอออนทะลุผ่านเข้าไปยังรอยสัมผัสระหว่างของซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอน จึงมีความสามารถในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสหรือปริมาณของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย ตัวอย่างของชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเหนือชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เช่น ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) อะลูมินา (Al_2O_3)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และแทนทาลัมเพนทอกไซด์ (Ta_2O_5) และเมื่อเปรียบเทียบกับ อิเล็กโทรดกระแสประแสแบบทั่วไป ISFET มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงและ เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ มีขนาดเล็ก มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว และ มีความเป็นไปได้ในการผลิต ในปริมาณที่มาก โดยการใช้กระบวนการผลิตแบบมอสทรานซิสเตอร์รวมถึงประโยชน์อื่นๆ ของ ISFET คือความแข็งแรงทนทาน ความสามารถในการทนต่อการทำความสะอาดเบาๆ ด้วยปรอทสี ฟีนและสามารถนำมาเก็บไว้ในที่แห้งได้ ทำให้สะดวกต่อการบำรุงรักษาได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถ นำมาฆ่าเชื้อได้และสามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่สูงมากได้ นอกจากนี้ยังสามารถรวมเข้ากับชิป เดียวกันกับวงจรรอ่านสัญญาณได้ จึงถูกนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลายโดยการเลือกใช้เมมเบรนที่ แตกต่างกันได้และสามารถใช้สำหรับวัดปริมาณที่มีปริมาณน้อยมากได้ [17]



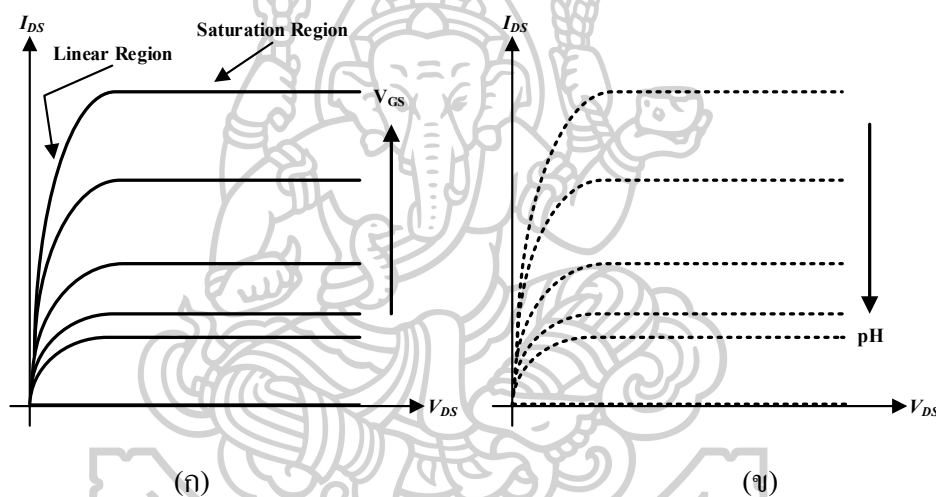
รูปที่ 2.16 แผนภาพโครงสร้างของ ISFET

2.2.2 คุณสมบัติและหลักการทำงานของ ISFET

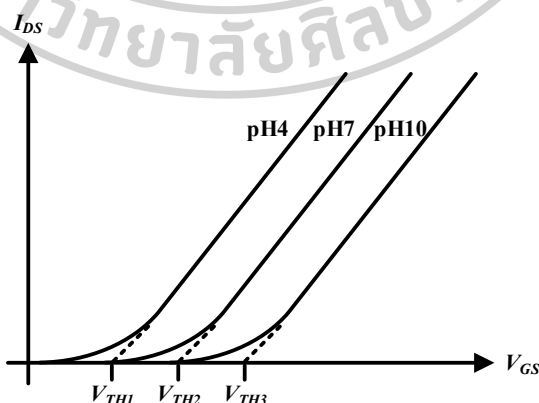
หลักการทำงานของ ISFET อธิบายได้โดยการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ มอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดขณะอยู่ในย่านไม่อิ่มตัว ค่าของกระแส I_{DS} จะขึ้นอยู่กับค่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชัน μ_n ความจุไฟฟ้าของฉนวนและอัตราส่วน ความกว้างต่อความยาวของช่องทางเดินของกระแส นอกจากนี้ยังขึ้นกับค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{TH} ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับฟังก์ชันงานของวัสดุ ϕ ค่าแรงดันขีดเริ่มสำหรับมอสทรานซิสเตอร์จะเป็น ค่าคงที่ ส่งผลให้กระแส I_{DS} จะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่เกต V_{GS} เพียงอย่างเดียว เมื่อแรงดันไฟฟ้า ระหว่างเดรนและซอร์ส V_{DS} มีค่าคงที่ สำหรับเซนเซอร์ ISFET ค่าแรงดันขีดเริ่มไม่ได้เป็นตัวแปรที่ มีค่าคงที่ เปรียบเทียบได้จากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิง-สารละลาย-

จนวน ซึ่งศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นจนวนกับสารละลายจะเปลี่ยนแปลง เมื่อชั้นจนวนสัมผัสกับสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถหาค่าการตอบสนองจากการพิจารณาค่าแรงดันขีดเริ่มได้ [18]

คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ($I_{DS} - V_{DS}$) ของ ISFET เมื่อแรงดันเกตหรือแรงดันที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าคงที่ สามารถนำมาเทียบกับกราฟคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ โดยการแทนที่ V_{GS} ของมอสเฟทเป็นค่า pH ของเซนเซอร์ ISFET แสดงดังรูปที่ 2.17 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต ($I_{DS} - V_{GS}$) ในสารละลายค่า pH ต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ V_{DS} คงที่ แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ($I_{DS} - V_{DS}$) ของ (ก) มอสเฟท และ (ข) ISFET



รูปที่ 2.18 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ($I_{DS} - V_{GS}$) ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10

ที่แรงดัน V_{DS} คงที่

จากกราฟในรูปที่ 2.17 สามารถแสดงค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{TH} ได้ เนื่องจากแรงดัน V_{GS} ที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม ทรานซิสเตอร์จะมีค่าประมาณศูนย์ และเมื่อแรงดันเกตสูงกว่าแรงดันขีดเริ่มทำให้มีค่ากระแสทรานซิสเตอร์ค่าต่าง ๆ นอกจากนี้กราฟ $(I_{DS} - V_{GS})$ ในรูปที่ 2.18 ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับค่า pH ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสได้เนื่องจากค่าแรงดันขีดเริ่มจะแปรผันตามค่า pH หรือค่าความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในสารละลาย

2.3 นิยามการบอกระดับความเป็นกรด-เบส (pH)

คำว่า pH ย่อมาจาก Potential of Hydrogen ion หรือค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือ ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ใช้บอกความเป็นกรด-เบสของสารละลายโดยค่าที่แสดงความเป็นกรดค่า pH จะอยู่ในช่วง 0-6.9 ส่วน 7.0 คือค่ากลาง และความเป็นเบสจะเริ่มต้นจาก 10.0 หรือสูงกว่า

pH คือค่าที่ถูกวัดด้วยตัวกลางชนิดใดชนิดหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น กระดาษ litmus คือสิ่งหนึ่งที่ถูกใช้วัดค่า pH กันอย่างแพร่หลายซึ่งเพียงสามารถบอกค่าคร่าวๆออกมาเท่านั้น อาจจะไม่เหมาะกับการใช้งานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูงมาก ส่วนเครื่องวัดค่าที่สามารถให้ค่าที่มีความแม่นยำมากประกอบไปด้วย pH Meter และ pH Electrode แบบ Glass Membrane หรือ เซนเซอร์ ISFET เป็นต้น โดยใช้หลักการเคลื่อนตัวไอออนผ่านเมมเบรน (Membrane) จะผลิตแรงดันไฟฟ้า (Voltage: V) และจะถูกวัดออกมาเป็น mV ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นค่า pH โดยวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้า และ pH จึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย [19]

2.4 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

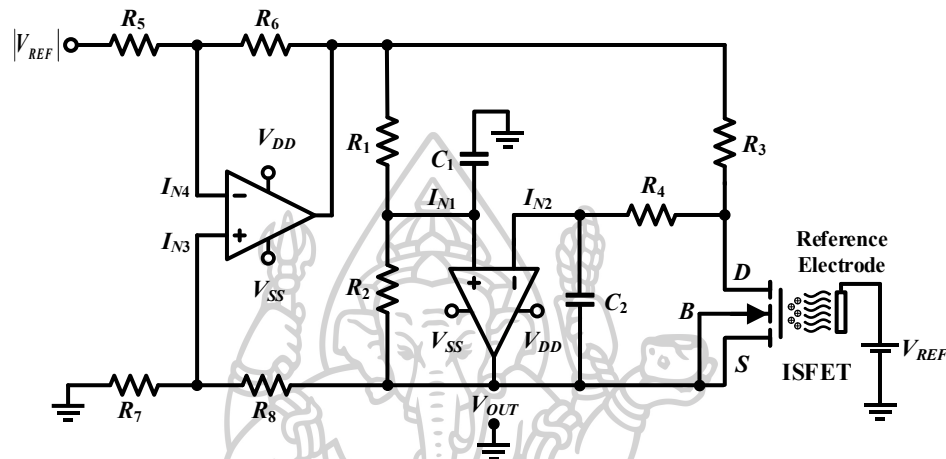
จากที่ได้กล่าวถึงหลักทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไปข้างต้น ในหัวข้อถัดมานี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้มีผู้นำเสนอมาแล้วดังนี้

2.4.1 การพัฒนาวงจรอ่านข้อมูล AIS แบบ Complementary ที่มีกรบ้อนกลับจากขาเกต

จากงานวิจัยที่ [11] มีการกล่าวถึงวงจรอ่านข้อมูลอุปกรณ์ ISFET แบบที่นิยมใช้ทั่วไป 3 วงจร ได้แก่ วงจรอ่านข้อมูล Bridge-Type Readout (BTR) วงจรอ่านข้อมูล Active ISFET Sensor readout (AIS) และวงจรอ่านข้อมูล Complementary ISFET MOSFET Pair (CIMP) จากรูปที่ 6 ใน [11] เป็นวงจรอ่านข้อมูลแบบ BTR ที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วย วงจรกรองความถี่ต่ำ ผ่าน (LPF) 2 วงจร แสดงดังรูปที่ 2.19 โดยวงจรนี้จะทำงานอยู่ในโหมดแรงดันคงที่กระแสคงที่ (CVCC) และ

ISFET ทำงานในย่านเชิงเส้น ซึ่งค่าแรงดัน V_{OUT} จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน $V_{TH-ISFET}$ ของ ISFET โดยที่ $V_{TH-ISFET}$ จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนของสารละลาย ดังสมการที่ (2.14)

$$I_{DS} \cong \mu_n C_{ox} \frac{W}{2L} [2(V_{GS} - V_{TH-ISFET})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.19 วงจรอ่านข้อมูลแบบ BTR (Bridge-Type Readout Circuit)

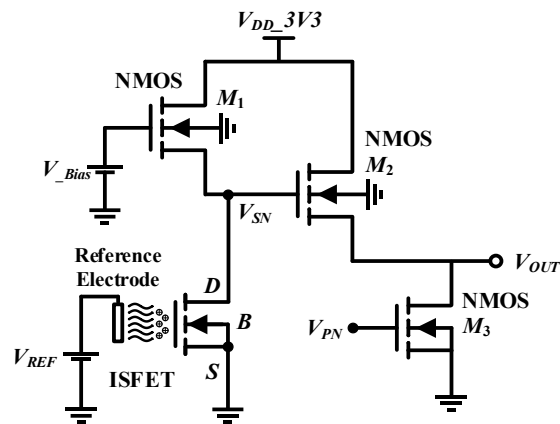
วงจรอ่านข้อมูล AIS ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์เพียง 3 ตัวเท่านั้นและไม่อยู่ในโหมด CVCC เหมือนกับวงจร BTR แสดงดังรูปที่ 2.20 ภายในวงจร AIS ทรานซิสเตอร์ M_1 และ ISFET จะมีกระแส I_{DM1} ที่ไหลผ่านทั้งสองอุปกรณ์เท่ากัน และมีการทำงานในย่านอิมิต์เหมือนกัน โดยค่ากระแส I_{DM1} และค่าแรงดัน V_{SN} หาได้จากสมการที่ (2.15) และ (2.16) ตามลำดับ ซึ่งวงจรอ่านข้อมูล AIS นั้นมีข้อดีคือมีความไวสูงถึง 107.101mV/pH

$$I_{D(M1)} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_{TH(M1)})^2 \quad (2.15)$$

$$V_{SN} = V_{DD} - V_{TH(M1)} - G(V_{REF} - V_{TH-ISFET}) \quad (2.16)$$

โดยที่ G เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแสดงดังนี้

$$G = \sqrt{\frac{\mu_n C_{ox} W_{ISFET}}{L_{ISFET}} \frac{L_{M1}}{\mu_n C_{ox} W_{M1}}} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.20 วงจรอ่านข้อมูล AIS (Active ISFET Readout circuit)

วงจร CIMP ที่มีการป้อนกลับที่ขาเกต มีโครงสร้างประกอบไปด้วย มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) และออปแอมป์อย่างละ 1 ตัวเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.21 ทั้ง PMOS และ ISFET จะทำงานในย่านเชิงเส้นและอิมิตัว ทำให้วงจรมีแรงดัน V_{OUT} ที่มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี และออปแอมป์มีหน้าที่ในการป้อนกลับสัญญาณจากขาเดรนไปที่ขาเกตช่วยในการชดเชย ค่า $V_{TH-ISFET}$ ที่ขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย โดยสามารถหาค่ากระแส I_D และแรงดัน V_{OUT} ในย่านอิมิตัว ได้ดังสมการที่ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ และในย่านเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ (2.20) และ (2.21) ตามลำดับ ซึ่งวงจรอ่านข้อมูล CIMP นี้มีข้อดีคือ มีกระแส I_{DS} ไม่คงที่แต่ค่าแรงดัน V_{DS} จะคงที่เนื่องจากมีแรงดัน V_1 ใช้เพื่อกำหนดค่าแรงดัน V_{DS} ทำให้วงจรนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากบอดี้ (Body effect) เพราะค่า V_{BS} ของ ISFET มีค่าเท่ากับ 0

ค่ากระแสเดรนและแรงดันเอาต์พุตในย่านอิมิตัวแสดงดังนี้

$$I_{D(M1)} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2.18)$$

$$\partial V_{OUT} = \partial V_{G(PMOS)} = \frac{-\partial V_{TH-ISFET} (pH)}{\sqrt{a}} \quad (2.19)$$

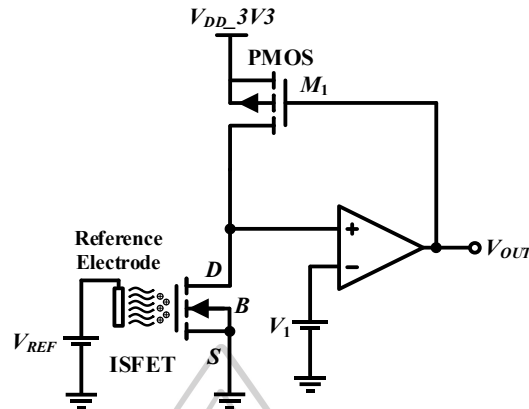
ค่ากระแสเดรนและแรงดันเอาต์พุตในย่านเชิงเส้นแสดงดังนี้

$$I_{D(M1)} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2.20)$$

$$\partial V_{OUT} = \partial V_{G(PMOS)} = \frac{-\partial V_{TH-ISFET} (pH)}{a} \quad (2.21)$$

λ คือพารามิเตอร์ของช่องนำกระแส

a คืออัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของช่องนำกระแสชนิด N และ P



รูปที่ 2.21 วงจรอ่านข้อมูล CIMP (Complementary ISFET MOSFET Pair with gate feedback)

จากวงจรอ่านข้อมูลพื้นฐานที่กล่าวไปข้างต้นในงานวิจัยนี้ ได้มีการนำข้อดีของวงจร CIMP และ AIS โดยที่วงจรอ่านข้อมูล CIMP มีข้อสามารถช่วยลดผลกระทบจากบอดีได้ และวงจรอ่านข้อมูล AIS สามารถเพิ่มความแม่นยำรวมถึงทำให้มีความไวสูงขึ้น มาพัฒนาเป็นวงจรอ่านข้อมูล AIS แบบคอมพลิเมนต์ารี ที่มีการป้อนกลับจากขาเกต ซึ่งประสิทธิภาพของวงจรที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการทำงานของวงจร ด้วยการใช้สมการที่ (2.17) ช่วยในการจำลองพฤติกรรมการทำงานของวงจรได้ ซึ่งวงจรนี้มีค่ากระแสของ ISFET แสดงดังสมการที่ (2.22)

$$I_{D-ISFET} = I_{D(M1)} + I_{D(M2)} \quad (2.22)$$

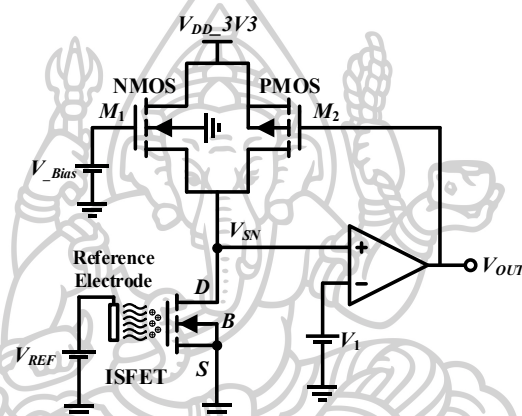
และสามารถหาค่ากระแสเดรนของ ISFET ในย่านอิมิตัวและเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ (2.23) และ (2.24) แสดงตามลำดับดังนี้

$$I_{D(ISFET)} = \frac{\mu_n C_{ox} W_n}{2L_n} (V_{GS(NMOS)} - V_{TH(NMOS)})^2 (1 + \lambda_n V_{DS}) + \frac{\mu_p C_{ox} W_p}{2L_p} (V_{GS(PMOS)} - V_{TH(PMOS)})^2 (1 + \lambda_p V_{DS}) \quad (2.23)$$

$$I_{D(ISFET)} = \frac{\mu_n C_{ox} W_n}{2L_n} \left(V_{GS(NMOS)} - V_{TH(NMOS)} - \frac{V_{DS}}{2} \right) (1 + \lambda_n V_{DS}) + \frac{\mu_p C_{ox} W_p}{2L_p} \left(V_{GS(PMOS)} - V_{TH(PMOS)} - \frac{V_{DS}}{2} \right) (1 + \lambda_p V_{DS}) \quad (2.24)$$

โดยที่ V_{DS} ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS และ PMOS มีค่าเท่ากันเนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองชนิดต่อขนานกัน

วงจรอ่านข้อมูล AIS แบบคอมพลิเมนต์ารีที่มีการป้อนกลับจากขาเกต ที่ปรับปรุงขึ้นใหม่นี้ มีความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ 0.9991 มีความไวเท่ากับ 201.73 mV/pH และมีช่วงแรงดันอ้างอิงที่กว้างอยู่ที่ 1.1-2.2 V ซึ่งวงจรที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้มีข้อดีคือมีความไวสูงเป็นอย่างมาก แต่วงจรนี้ยังมีช่วงแรงดันอ้างอิงที่ไม่กว้างและวงจรมีขนาดใหญ่เนื่องจากการใช้อุปกรณ์ออปแอมป์ภายในวงจรร่วมกับทรานซิสเตอร์ 2 ตัว มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.22

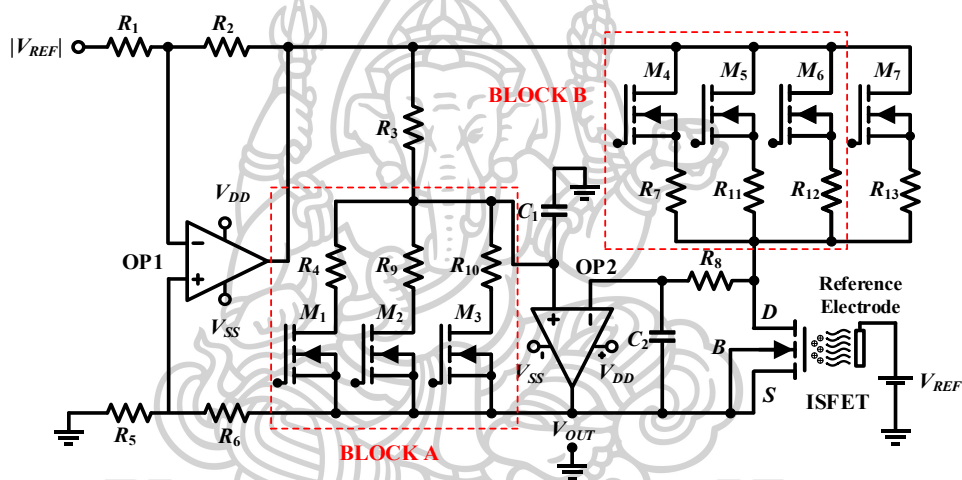


รูปที่ 2.22 วงจรอ่านข้อมูล AIS แบบคอมพลิเมนต์ารี ที่มีการป้อนกลับจากขาเกต
(Complementary AIS readout circuit with gate feedback)

2.4.2 วงจรอ่านข้อมูล ISFET แบบ BTR ด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

จากบทความที่ [12] มีการนำเสนอมอนิเตอร์อ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET แบบ BTR (Bridge-Type Readout) ที่สามารถปรับค่าแรงดัน V_{DS} และกระแส I_D ของเซนเซอร์ ISFET ได้ เพื่อให้วงจรอ่านข้อมูล มีความไวและมีความเป็นเชิงเส้นสูง โดยวงจรมีโครงสร้างประกอบด้วย ออปแอมป์ 2 ตัว และมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 7 ตัว อีกทั้งยังมีอุปกรณ์แพสซีฟจำนวนมาก แสดงดังรูปที่ 2.23 ในวงจรที่นำเสนอจะแบ่งวงจรที่สำคัญเป็น 2 ส่วนคือวงจร BLOCK A ทำหน้าที่ควบคุมแรงดัน V_{DS} ของเซนเซอร์ ISFET ให้คงที่โดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ $M_1, M_2,$ และ M_3 ให้มีค่าแรงดัน V_{DS} คงที่เท่ากับ 0.4V 0.3V และ 0.2V ตามลำดับ และ วงจร BLOCK B ทำหน้าที่ควบคุมกระแส I_D ของเซนเซอร์ ISFET ให้คงที่โดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ $M_4, M_5,$ และ M_6 ให้มีค่ากระแส I_D คงที่เท่ากับ 75 μA , 50 μA , และ 25 μA ตามลำดับ ซึ่งมอสทรานซิสเตอร์เหล่านี้จะทำงานเหมือนกับสวิตช์ ถ้ามอสทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่มอสทรานซิสเตอร์ตัวอื่นๆจะ

อยู่ในสถานะปิดหรือไม่ทำงาน จากผลการจำลองวงจรในรูปที่ 2.23 ให้มอสทรานซิสเตอร์ M_1 ทำ
ให้ค่าแรงดัน V_{DS} ของวงจรคงที่เท่ากับ 4V และทดสอบกับค่ากระแส I_D เท่ากับ $75 \mu A$, $50 \mu A$, และ
 $25 \mu A$ จะได้ความไวอยู่ที่ 63.838 mV/pH , 77.846 mV/pH , และ 77.993 mV/pH ตามลำดับ และม
ีความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ 0.9907 , 0.9989 , และ 0.9991 ตามลำดับ ซึ่งวงจรนี้มีจุดเด่นคือสามารถปรับ
ค่าแรงดัน V_{DS} และกระแส I_D ของเซนเซอร์ ISFET ให้มีค่าคงที่ได้หลายค่า ทำให้สามารถนำวงจร
อ่านข้อมูลนี้ไปประยุกต์ใช้กับเซนเซอร์ ISFET ได้หลายประเภทที่มีกระแสและแรงดันในการ
ทำงานที่แตกต่างกันได้ แต่วงจรอ่านข้อมูลนี้มีข้อเสียคือใช้อุปกรณ์แอคทีฟ 9 ตัวและแพสซีฟ 15 ตัว
ส่งผลให้วงจรมีขนาดใหญ่



รูปที่ 2.23 วงจรอ่านข้อมูลอุปกรณ์ ISFET แบบ BTR ด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและ
กระแสไฟฟ้า

2.4.3 วงจรอ่านข้อมูล ISFET แบบโหมดกระแส

จากบทความที่ [13] นำเสนอวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET แบบโหมดกระแส โดยมี
โครงสร้างประกอบด้วย วงจร CCII 2 วงจรและมอสทรานซิสเตอร์ 1 ตัว คือ REFET (Reference
Field Effect Transistor) ซึ่งมีโครงสร้างและพฤติกรรมทางไฟฟ้าเหมือนกับ ISFET แต่แตกต่างกัน
ที่ REFET จะไม่เกิดปฏิกิริยากับไอออนในสารละลาย ซึ่งค่ากระแส I_{DS} ของ REFET จะคงที่แม้มีค่า
pH เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อมีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ค่ากระแส I_{DS} ของ REFET และ ISFET จะ
เปลี่ยนแปลงเท่ากัน ทำให้สามารถช่วยในการชดเชยอุณหภูมิได้ ซึ่งค่ากระแส I_{OUT} ของวงจรอ่าน
ข้อมูลนี้สามารถหาได้ดังสมการที่ (2.25)

$$I_{OUT} = I_{DS-ISFET} - I_{DS-REFET} \tag{2.25}$$

เมื่อกำหนดให้ $I_{DS-ISFET} = I_{DS-REFET} = I_{DS}$ สามารถหาค่า I_{DS} ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{DS} = K_1 - K_2 pH \tag{2.26}$$

โดยที่

$$K_1 = \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) \left[V_{GS} V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 - V_{DS} (V_{TH} + \gamma) \right] \tag{2.27}$$

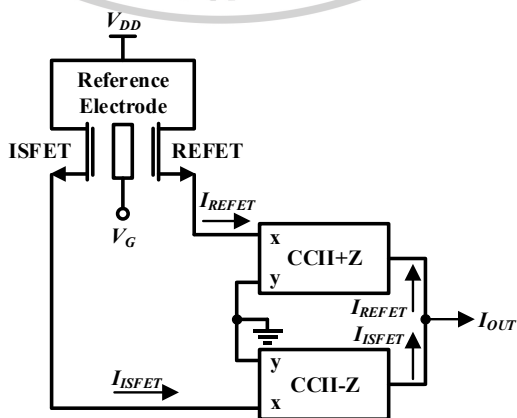
และ

$$K_2 = \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) 2.303 \alpha U_T V_{DS} \tag{2.28}$$

γ คือ กลุ่มของศักย์ไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับค่า pH

α คือ ประสิทธิภาพของพื้นผิวของ ISFET ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

โครงสร้างวงจรรอ่านข้อมูลที่น่าเสนอแสดงดังรูปที่ 2.24 โดยวงจรมีผลจำลองความไวอยู่ที่ 22.7 $\mu A/pH$ และมีจุดเด่นคือ เมื่อเป็นวงจรโหมดกระแส กระแสเอาต์พุตสามารถนำไปแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลได้ดีกว่าวงจรที่เป็นโหมดแรงดันและเป็นวงจรที่ไม่มีผลกระทบด้านอุณหภูมิเนื่องจากมี REFET ที่ช่วยในการชดเชยอุณหภูมิ แต่วงจรมีข้อเสียคือโครงสร้างที่มีอุปกรณ์จำนวนมากเนื่องจากภายในวงจร CCII จะประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์จำนวนหลายตัว



รูปที่ 2.24 วงจรรอ่านข้อมูล ISFET แบบโหมดกระแส

2.4.4 วงจรอ่านข้อมูล ISFET แบบ Bridge-based ที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง

งานวิจัยที่ [14] นำเสนอวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFETแบบ Bridge-based ที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับผักไฮโดรโปนิกส์ (Hydroponic) มีโครงสร้างประกอบด้วย ออปแอมป์ และมอสทรานซิสเตอร์ โดยที่มอสทรานซิสเตอร์ M_2 ทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับวงจรแสดงดังรูปที่ 2.25 วงจรอ่านข้อมูลนี้ทำงานในโหมด CVCC และทำงานในย่าน Weak Inversion ซึ่งสามารถหาค่าแรงดัน V_{OUT} ได้ดังนี้

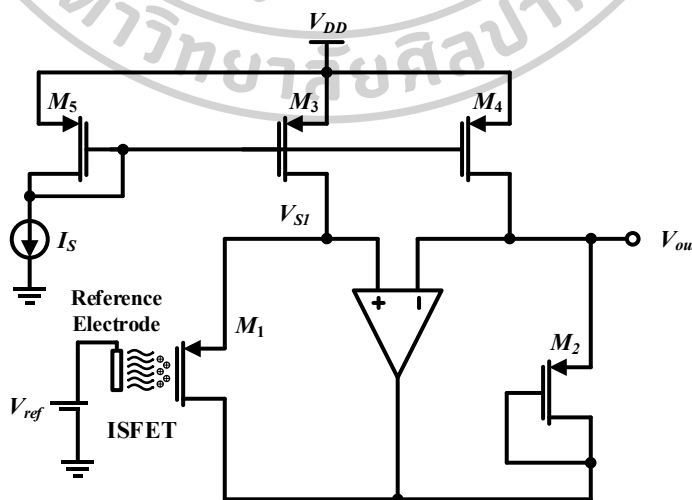
$$V_{OUT} = \gamma - \alpha 2.3U_T pH + V_{REF} + V_{TH-MOSFET} + \eta U_T \ln \left(\frac{I_{D1}}{\frac{W}{L} I_{D0}} - \eta U_T \ln \left[1 - \exp \left(\frac{V_{SD1}}{U_T} \right) \right] \right) \quad (2.29)$$

โดยที่

$$V_{SD1} = \frac{I_{D4}}{g_{m2}} \quad (2.30)$$

g_{m2} คือ ค่าความนำถ่ายโอนของมอสทรานซิสเตอร์ M_2

วงจรรอ่านข้อมูลแบบ Bridge-based ในงานวิจัยนี้มีความไวเท่ากับ 37mV/pH และในวงจรมีข้อดีคือทำงานในย่าน Weak Inversion ทำให้วงจรที่นำเสนอนี้บริโภคพลังงานต่ำเพียง 450nW แต่ยังมีข้อเสียคือ มีการใช้อุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมาก ประกอบด้วยออปแอมป์ขยายสัญญาณภายในวงจร 1 ตัว ต่อกับมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 4 ตัว



รูปที่ 2.25 วงจรรอ่านข้อมูลแบบ Bridge-based ที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่กล่าวไปข้างต้นสามารถนำมาสังเคราะห์จุดเด่นและจุดด้อยของวงจรรอ่านข้อมูลแต่ละประเภทได้ดังตารางที่ 2.1 ทำให้สามารถนำข้อมูลเหล่านี้มาพัฒนาจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ซึ่งถูกอธิบายในบทถัดไป

ตารางที่ 2.1 ภาพรวมของวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา

อ้างอิง	เทคโนโลยี (μm)	โหมด	จำนวนของ อุปกรณ์แอค ทีฟ	R+C	ช่วง แรงดัน V_{ref}	ความไว (mV/pH)	เชิงเส้นตรง (R^2)	อัตรา บริโภค พลังงาน (nW)
[11] รูปที่ 2.19	0.35	แรงดัน	ออปแอมป์ 2	8+2	-	-48.087	0.9906	-
[11] รูปที่ 2.20	0.35	แรงดัน	มอสเฟท 3	0+0	0.8-1.1V	107.101	0.9884	-
[11] รูปที่ 2.21	0.35	แรงดัน	ออปแอมป์ 1+ มอสเฟท 1	0+0	0.8-1.1V	117.800	0.9944	-
[11] รูปที่ 2.22	0.35	แรงดัน	ออปแอมป์ 1+ มอสเฟท 2	0+0	1.1-2.2V	201.736	0.9991	-
[12]	0.35	แรงดัน	ออปแอมป์ 2+ มอสเฟท 7	13+2	0.2-0.4V	77.993	0.9991	-
[13]	0.35	กระแส	CCII 2+ มอสเฟท 1	0+0	-	22.7 $\mu\text{A/pH}$	-	-
[14]	0.18	แรงดัน	ออปแอมป์ 1+ มอสเฟท 4	0+0	-	-37	-	450

บทที่ 3

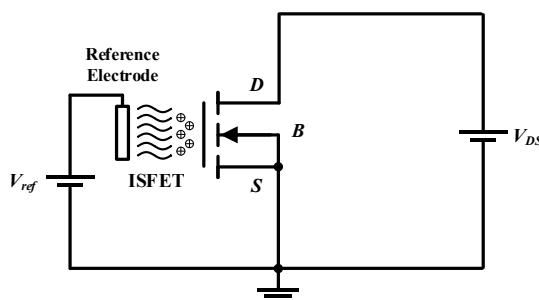
การดำเนินงานวิจัย

จากที่มาและความสำคัญของวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในบทที่ 1 รวมถึงการศึกษา ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 จึงเป็นกรอบ แนวคิดในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยจึงออกแบบและพัฒนาวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET โดยเลือกใช้มอสทรานซิสเตอร์ ชนิดเอ็น และชนิดพี ที่มีโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์ $0.8 \mu\text{m}$ เทคโนโลยีของ Thai Microelectronics Center (TMEC) ในการสังเคราะห์และออกแบบ วงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET โดยมีโครงสร้างประกอบไปด้วย เซนเซอร์ ISFET วงจรขยาย ความนำถ่ายไอออน (OTA) และวงจรสะท้อนกระแส (Current mirror) แสดงผังรูปที่ 3.7 ในบทนี้จะ อธิบายถึงรายละเอียดของวงจรที่ใช้ในออกแบบและพัฒนาวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET โดย แบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

- 3.1 การวิเคราะห์วงจรเซนเซอร์ ISFET
- 3.2 การวิเคราะห์วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror)
- 3.3 การวิเคราะห์วงจรขยายความนำถ่ายไอออน (OTA) แบบใช้มอสทรานซิสเตอร์
- 3.4 การวิเคราะห์วงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET
- 3.5 การวิเคราะห์วงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET กรณีไม่เป็นอุดมคติ

3.1. การวิเคราะห์วงจรเซนเซอร์ ISFET

เซนเซอร์ ISFET ถูกพัฒนามาจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น โดยมีโครงสร้างวงจรเซนเซอร์ ISFET แสดงรูปที่ 3.1 เนื่องจากเซนเซอร์ ISFET มีคุณสมบัติคล้ายกับมอสทรานซิสเตอร์ ทำให้ สามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสเดรน-ซอร์สของ ISFET ($I_{DS-ISFET}$) ในช่วงการทำงานย่านเชิง เส้นและย่านอิ่มตัว ได้ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจรเซนเซอร์ ISFET

$$I_{DS-ISFET} = \mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH-ISFET}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (3.1)$$

และ

$$I_{DS-ISFET} = \mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH-ISFET})^2 \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.1) จะทำงานย่านเชิงเส้นภายใต้เงื่อนไข ($V_{DS} < V_{GS} - V_{TH-ISFET}$) และจากสมการที่ (3.2) จะทำงานในย่านอิ่มตัวภายใต้เงื่อนไข ($V_{DS} > V_{GS} - V_{TH-ISFET}$)

โดยที่

$\mu_{n-ISFET}$ คือ ค่าความคล่องของโฮลหรืออิเล็กตรอนของ ISFET

C_{ox} คือ ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์

W คือ ความกว้างของแชนแนล

L คือ ความยาวของแชนแนล

V_{GS} คือ แรงดันระหว่างเกตและซอร์ส

V_{DS} คือ แรงดันระหว่างเดรนและซอร์ส

และแรงดันขีดเริ่มของ ISFET ($V_{TH-ISFET}$) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$V_{TH-ISFET} = V_{TH-CHEM} + V_{TH-MOSFET} \quad (3.3)$$

เมื่อแทนค่า $V_{TH-ISFET}$ จากสมการที่ (3.3) ลงในสมการที่ (3.1) และ (3.2) แสดงดังนี้

$$I_{DS-ISFET} = \mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH-CHEM} - V_{TH-MOSFET}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (3.4)$$

และ

$$I_{DS-ISFET} = \mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH-CHEM} - V_{TH-MOSFET})^2 \quad (3.5)$$

โดยที่

$V_{TH-MOSFET}$ คือ ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์

$V_{TH-CHEM}$ คือ ค่าแรงขีดเริ่มทางเคมี

ซึ่ง $V_{TH-CHEM}$ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$V_{TH-CHEM} = E_{Ref} + \phi^{ij} + \chi_{sol} - \Psi_{eo} \quad (3.6)$$

โดยที่

E_{Ref} คือ ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag-AgCl

ϕ^{ij} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิงกับสารละลาย

χ_{sol} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมด้านสารละลายแต่ละชนิด

Ψ_{eo} คือ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อชั้นฉนวนกับสารละลาย

ดังนั้น แทนค่า $V_{TH-CHEM}$ จากสมการที่ (3.6) ลงในสมการที่ (3.4) และ (3.5) สามารถเขียนสมการใหม่ของ กระแส $I_{DS-ISFET}$ ในช่วงการทำงานย่านเชิงเส้นและย่านอิ่มตัวได้ตามลำดับ ดังนี้

$$I_{DS-ISFET} = \mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH-MOSFET} - E_{ref} - \phi^{ij} - \chi_{sol} + \Psi_{eo}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (3.7)$$

และ

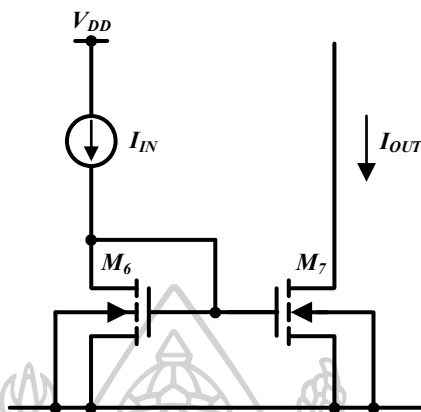
$$I_{DS-ISFET} = \mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH-MOSFET} - E_{ref} - \phi^{ij} - \chi_{sol} + \Psi_{eo})^2 \quad (3.8)$$

จะเห็นได้ว่ากระแสเกรน-ซอร์ส ($I_{DS-ISFET}$) ของ ISFET จะขึ้นอยู่กับแรงดันขั้วเริ่มทางเคมี ($V_{TH-ISFET}$) โดยที่แรงดัน $V_{TH-ISFET}$ จะแปรผันตามพารามิเตอร์ทางเคมีเหล่านี้ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง (E_{ref}) ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิงกับสารละลาย (ϕ^{ij}) ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมด้านสารละลายแต่ละชนิด (χ_{sol}) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะเป็นค่าคงที่ และ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อชั้นฉนวนกับสารละลาย (Ψ_{eo}) จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย (H^+) หรือค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย โดยเมื่อค่า pH มีการเปลี่ยนแปลง ศักย์ไฟฟ้า Ψ_{eo} ก็จะเปลี่ยนแปลงตาม ส่งผลให้แรงดันขั้วเริ่ม $V_{TH-ISFET}$ เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแรงดัน $V_{TH-ISFET}$ ส่งผลโดยตรงต่อแรงดัน V_{GS} และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของกระแส $I_{DS-ISFET}$ ของเซนเซอร์ ISFET

3.2 การวิเคราะห์วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror)

วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror) เป็นวงจรย่อยที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ ความต้านทานด้านอินพุตต่ำและมีความต้านทานเอาต์พุตสูง จากคุณสมบัตินี้ทำให้นำไปใช้เป็นวงจรส่งผ่านกระแส ในงานนี้จะใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์ ทั้งชนิด NMOS และ PMOS

โดยอาศัยหลักการที่ว่า หากแรงดันไบแอสที่เกต-ซอร์สของมอสทรานซิสเตอร์ ที่เหมือนกันสองตัว มีค่าเท่ากันแล้วกระแสทรานจะเท่ากันด้วย



รูปที่ 3.2 วงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ ชนิด NMOS

จากรูปที่ 3.2 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ ชนิด NMOS โดยมีแหล่งกำเนิดกระแสคงที่ I_{IN} เป็นกระแสที่ทางเข้าและ I_{OUT} เป็นกระแสที่ทางออกหรือกระแสที่ถูกสะท้อน โดยมอสทรานซิสเตอร์ M_6 ที่ $V_{DS6} = V_{GS}$ เมื่อสมมติให้มอสทรานซิสเตอร์ M_7 มีค่า $V_{DS7} \geq (V_{GS} - V_{TH})$ ดังนั้นมอสทรานซิสเตอร์ M_7 จะทำงานในช่วงอิมิตัวมีค่ากระแสทรานแสดงดังนี้

กำหนดให้ $I_{D6} = I_{IN}$

$$I_{IN} = \frac{1}{2} (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS6} - V_{TH})^2 \quad (3.9)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\sqrt{\frac{2I_{IN}}{\mu_n C_{ox} (W/L)}} + V_{TH} = V_{GS6} \quad (3.10)$$

และพิจารณาให้ $I_{D7} = I_{OUT}$

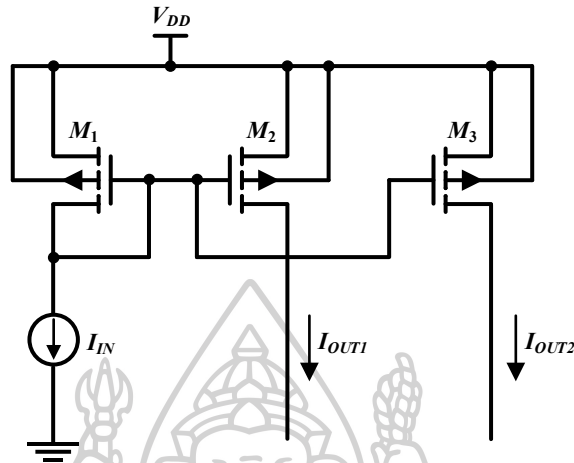
$$I_{OUT} = \frac{1}{2} (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS7} - V_{TH})^2 \quad (3.11)$$

จากรูปที่ 3.3 พบว่า $V_{GS7} = V_{GS6}$ จะได้ว่า

$$\sqrt{\frac{2I_{OUT}}{\mu_n C_{ox} (W/L)}} + V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_{IN}}{\mu_n C_{ox} (W/L)}} + V_{TH} \quad (3.12)$$

เมื่อยกกำลังสอง ทั้ง 2 ข้างสมการสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

มอสทรานซิสเตอร์ M_2 และ M_3 เมื่อทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัว ทำงานในช่วงอิ่มตัวจะมีค่ากระแสเดรน ดังนี้



รูปที่ 3.4 วงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ ชนิด PMOS

โดยพิจารณาให้ $I_{D1} = I_{IN}$

$$I_{IN} = \frac{1}{2} (\mu C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (V_{SG1} - V_{TH})^2 \quad (3.15)$$

และพิจารณาให้ $I_{D2} = I_{OUT1}$ และ $I_{D3} = I_{OUT2}$

$$I_{OUT1} = \frac{1}{2} (\mu C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (V_{SG2} - V_{TH})^2 \quad (3.16)$$

และ

$$I_{OUT2} = \frac{1}{2} (\mu C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (V_{SG3} - V_{TH})^2 \quad (3.17)$$

จากรูปที่ 3.4 พบว่า $V_{SG3} = V_{SG2} = V_{SG1}$

$$\sqrt{\frac{2I_{OUT2}}{\mu_n C_{ox} (W/L)}} + V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_{OUT1}}{\mu_n C_{ox} (W/L)}} + V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_{IN}}{\mu_n C_{ox} (W/L)}} + V_{TH} \quad (3.18)$$

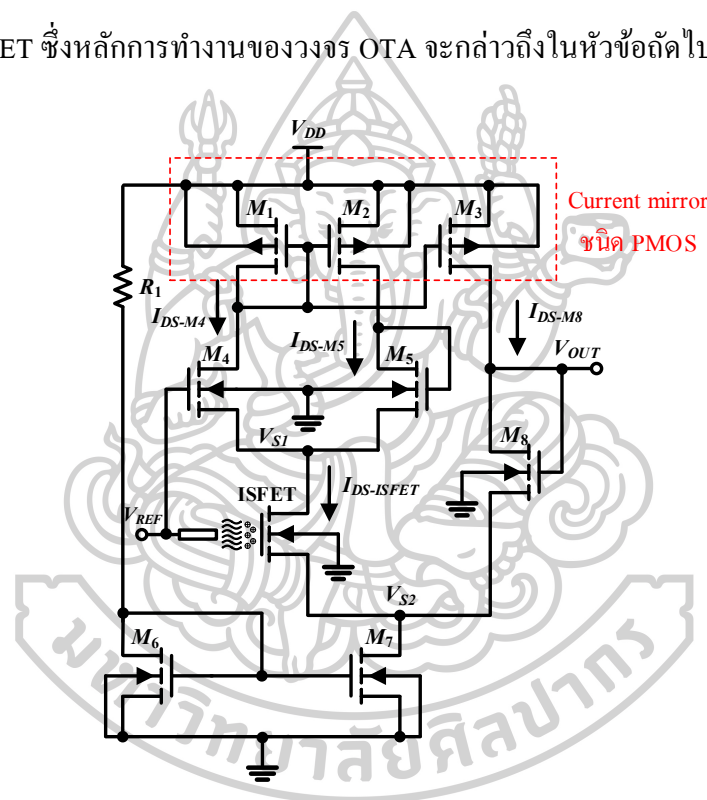
เมื่อยกกำลังสองตลอดสมการจะได้ว่า

$$\frac{2I_{OUT2}}{\mu_n C_{ox} (W/L)} = \frac{2I_{OUT1}}{\mu_n C_{ox} (W/L)} = \frac{2I_{IN}}{\mu_n C_{ox} (W/L)} \quad (3.19)$$

และเมื่อมอสทรานซิสเตอร์ M_1 , M_2 และ M_3 ทั้งสามตัวมีคุณสมบัติเหมือนกันสามารถจัดรูปสมการใหม่จะได้ดังนี้

$$I_{OUT2} = I_{OUT1} = I_{IN} \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.20) พบว่าค่ากระแสเอาต์พุตทั้ง I_{OUT1} และ I_{OUT2} ที่ถูกสะท้อนโดยมอสทรานซิสเตอร์ M_2 และ M_3 จะมีค่าเท่ากับกระแสอินพุตของวงจร หลักการนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสที่ทำงานร่วมกับวงจรผลต่างแรงดัน (Voltage Differential) ที่ประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ M_4 และ M_5 เมื่อพิจารณาภาพรวมจะพบว่าวงจรดังกล่าวมีลักษณะโครงสร้างวงจรเหมือนกับวงจรขยายความนำถ่ายโอน (OTA) โดยทำหน้าที่รับและประมวลผลสัญญาณจากเซนเซอร์ ISFET ซึ่งหลักการทำงานของวงจร OTA จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.5 วงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ ชนิด PMOS ที่ใช้ในการออกแบบวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET

3.3 การวิเคราะห์วงจรขยายความนำถ่ายโอน (OTA) แบบใช้มอสทรานซิสเตอร์

วงจรขยายความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifier : OTA) แบบใช้มอสทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 3.6 จะมีมอสทรานซิสเตอร์ M_4 และ M_5 ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส ส่วนมอสทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 เป็นวงจรสะท้อนกระแสซึ่งให้อัตราส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่ง โดยมีกระแส I_B เป็นกระแสไบแอสให้กับวงจร เมื่อวงจรได้รับแรงดันอินพุต V_{IN} จะทำให้เกิดกระแส I_{D4} และ I_{D5} ขึ้นที่มอสทรานซิสเตอร์ M_4 และ M_5 ตามลำดับ จากนั้นกระแส I_{D4} จะถูก

$$\sqrt{\frac{2}{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} (\sqrt{I_{D4}} - \sqrt{I_{D5}}) = V_+ - V_- \quad (3.25)$$

เมื่อวิเคราะห์ KCL จะได้ว่า $I_{D4} = I_{D2} = \frac{I_B + I_{OUT}}{2}$ และ $I_{D5} = \frac{I_B - I_{OUT}}{2}$ เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (3.25) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\sqrt{\frac{2}{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} \left(\sqrt{\frac{I_B + I_{OUT}}{2}} - \sqrt{\frac{I_B - I_{OUT}}{2}} \right) = V_+ - V_- \quad (3.26)$$

และกำหนดให้ $V_+ - V_- = V_{IN}$ แทนลงในสมการที่ (3.26)

$$\sqrt{\frac{2}{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} \left(\sqrt{\frac{I_B + I_{OUT}}{2}} - \sqrt{\frac{I_B - I_{OUT}}{2}} \right) = V_{IN} \quad (3.27)$$

จัดรูปสมการที่ (3.27) ใหม่จะได้ดังนี้

$$I_{OUT} = \frac{\mu_n C_{ox}(W/L)}{2} V_{IN} \sqrt{\frac{4I_B}{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} - V_{IN}^2 \quad (3.28)$$

$$I_{OUT} = \frac{(\mu_n C_{ox})(W/L)}{2} V_{IN} \sqrt{\frac{4I_B}{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} \left(1 - \frac{V_{IN}^2 (\mu_n C_{ox})(W/L)}{4I_B} \right) \quad (3.29)$$

$$I_{OUT} = \frac{(\mu_n C_{ox})(W/L)}{2} V_{IN} \left(\sqrt{\frac{4I_B}{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} \right) \left(\sqrt{1 - \frac{(\mu_n C_{ox})(W/L)V_{IN}^2}{4I_B}} \right) \quad (3.30)$$

เมื่อกำหนดให้ $1 \gg \frac{\mu_n C_{ox}(W/L)V_{IN}^2}{I_B}$ ดังนั้น $\sqrt{1 - \frac{\mu_n C_{ox}(W/L)V_{IN}^2}{4I_B}} \approx 1$ ทำให้สามารถเขียนสมการที่ (3.30) ใหม่ได้ดังนี้

$$I_{OUT} = \frac{(\mu_n C_{ox})(W/L)}{2} V_{IN} (2) \left(\sqrt{\frac{I_B}{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} \right) (1) \quad (3.31)$$

$$I_{OUT} = \frac{(\mu_n C_{ox})(W/L)}{2} V_{IN} (2) \left(\sqrt{\frac{I_B}{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} \right) \quad (3.32)$$

$$I_{OUT} = (\mu_n C_{ox})(W/L) \left(\frac{1}{\sqrt{(\mu_n C_{ox})(W/L)}} \right) (\sqrt{I_B}) V_{IN} \quad (3.33)$$

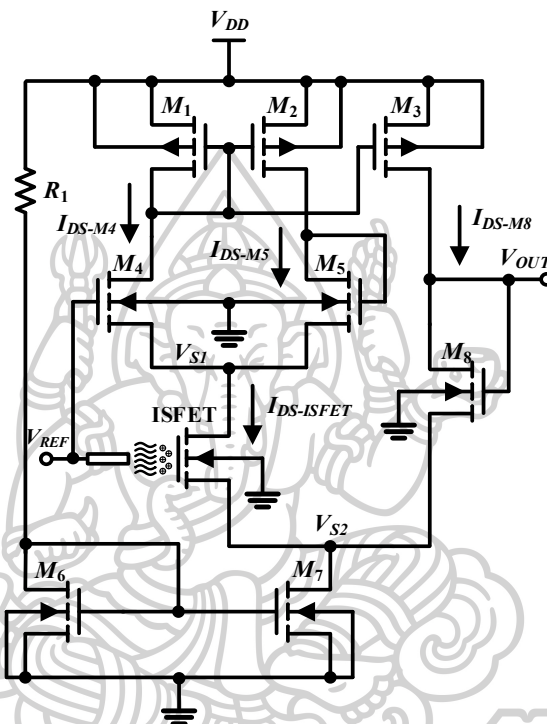
$$I_{OUT} = \sqrt{I_B (\mu_n C_{ox})(W/L)} V_{IN} \quad (3.34)$$

และกำหนดให้ $\sqrt{I_B (\mu_n C_{ox})(W/L)} = g_m$ ทำให้สามารถเขียนสมการที่ (3.34) ใหม่ได้ดังนี้

$$I_{OUT} = g_m V_{IN} \tag{3.35}$$

โดยที่ g_m คือ ความนำถ่ายไออน (Transconductance) ของวงจรถูกที่เกิดขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนได้จากค่าของกระแส I_B หรือด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

3.4 การวิเคราะห์วงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET



รูปที่ 3.7 วงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET

โครงสร้างของวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ประกอบด้วย วงจรขยายความนำถ่ายไออน (OTA) และ วงจรสะท้อนกระแส เมื่อพิจารณาจากวงจรถัดบนกระแสในรูปที่ 3.7 พบว่ากระแส $I_{DS-M4} = I_{DS-M5} = I_{DS-M8}$ และ กำหนดกระแสดังกล่าวทั้งหมดให้เท่ากับ I_{DS} เมื่อทรานซิสเตอร์ M_4 , M_5 , M_8 และ ISFET ทำงานในย่านอิ่มตัว จึงสามารถเขียนสมการกระแส I_{DS} และ $I_{DS-ISFET}$ ได้ตามลำดับดังนี้

$$I_{DS} = \mu_{n-M} C_{ox} \frac{W}{2L} (V_{GS-M} - V_{TH-M})^2 \tag{3.36}$$

และ

$$I_{DS-ISFET} = \mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH-ISFET})^2 \tag{3.37}$$

เมื่อพิจารณาที่โหนด V_{S1} พบว่ากระแส $I_{DS-ISFET}$ มีค่าแสดงดังนี้

$$I_{DS-ISFET} = 2I_{DS} \quad (3.38)$$

นำสมการที่ (3.36) และสมการที่ (3.37) ลงในสมการที่ (3.38) เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$(V_{GS} - V_{TH-ISFET})^2 = \frac{2\mu_{n-M} C_{ox} \frac{W_M}{2L_M}}{\mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{2L}} (V_{GS-M} - V_{TH-M})^2 \quad (3.39)$$

จากนั้นสมมติให้ G เท่ากับ $\sqrt{\frac{\mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L}}{2\mu_{n-M} C_{ox} \frac{W_M}{L_M}}}$ ทำให้สมการที่ (3.34) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$V_{GS} - V_{TH-ISFET} = \frac{V_{GS-M} - V_{TH-M}}{G} \quad (3.40)$$

เมื่อพิจารณาจากวงจรรูปที่ 3.7 จะได้ว่า $V_{GS} = V_{REF} - V_{S2}$ และ $V_{GS-M} = V_{OUT} - V_{S2}$ ดังนั้นสมการที่ (3.40) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_{REF} - V_{S2} - V_{TH-ISFET} = \frac{V_{OUT} - V_{S2} - V_{TH-M}}{G} \quad (3.41)$$

และสามารถจัดรูปสมการใหม่โดยการใช้อนุพันธ์ย่อย (Partial derivatives) เพื่อหาค่าแรงดัน V_{OUT} ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้ดังนี้

$$\frac{\partial V_{OUT}}{\partial pH} = -G \frac{\partial V_{TH-ISFET}}{\partial pH} (pH) \quad (3.42)$$

จากสมการที่ (3.42) เมื่อพิจารณาจากความชันของแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า pH ของสารละลาย พบว่าวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้สังเคราะห์และออกแบบนั้นสามารถตอบสนองต่อค่า pH ที่แตกต่างกันได้อย่างเป็นเชิงเส้น

3.5 การวิเคราะห์วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET กรณีไม่เป็นอุดมคติ

เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรสะท้อนกระแสจากวงจรรูปที่ 3.7 พบว่าเมื่อมีการส่งผ่านกระแสจะทำให้ค่า อัตราขยายกระแสหนึ่งหน่วย (Unity current gain : A_v) มีค่าไม่เท่ากับ 1 แต่จะเท่ากับ α ส่งผลให้ $I_{DS-ISFET}$ ในสมการที่ (3.38) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_{DS-ISFET} = (1 + \alpha)I_{DS} \quad (3.43)$$

และจากสมการที่ (3.43) ทำให้สามารถเขียนสมการที่ (3.39) ใหม่ได้ดังนี้

$$(V_{GS} - V_{TH-ISFET})^2 = \frac{(1 + \alpha)\mu_{n-M}C_{ox} \frac{W_M}{2L}}{\mu_{n-ISFET}C_{ox} \frac{W}{2L}} (V_{GS-M} - V_{TH-M})^2 \quad (3.44)$$

จากนั้นสมมติให้ G^* มีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{\mu_{n-ISFET}C_{ox} \frac{W}{L}}{(1 + \alpha)\mu_{n-M}C_{ox} \frac{W_M}{L_M}}}$ ทำให้สมการที่ (3.44) สามารถจัดรูปสมการ

ใหม่ได้เป็น

$$V_{GS} - V_{TH-ISFET} = \frac{V_{GS-M} - V_{TH-M}}{G^*} \quad (3.45)$$

เมื่อพิจารณาจากวงจรรูปที่ 3.7 จะได้ว่า $V_{GS} = V_{REF} - V_{S2}$ และ $V_{GS-M} = V_{OUT} - V_{S2}$ ทำให้สมการที่ (3.45) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_{REF} - V_{S2} - V_{TH-ISFET} = \frac{V_{OUT} - V_{S2} - V_{TH-M}}{G^*} \quad (3.46)$$

ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการใหม่โดยการใช้อนุพันธ์ย่อย (Partial derivatives) เพื่อหาค่าแรงดัน V_{OUT} ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้ดังนี้

$$\frac{\partial V_{OUT}}{\partial pH} = -G \partial V_{TH-ISFET} (pH) \quad (3.47)$$

จะเห็นได้ว่าจากสมการ (3.47) เมื่อพิจารณาจากความชันของแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า pH ของสารละลาย วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้สังเคราะห์และออกแบบ สามารถตอบสนองต่อค่า pH ที่แตกต่างกันได้อย่างเป็นเชิงเส้น ถึงแม้ว่าวงจรสะท้อนกระแสที่ใช้ออกแบบจะทำงานแบบไม่เป็นอุดมคติ

บทที่ 4

การทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการแสดงผลการทดลองของวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้สังเคราะห์ไว้ในบทที่ 3 ด้วยการจำลองผลการทำงานผ่าน โปรแกรม LTspice เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของวงจรที่ได้ออกแบบขึ้น โดยแบ่งวงจรเป็น 2 ส่วนสำคัญคือวงจรเซนเซอร์ ISFET ที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ ชนิดเอ็น (Level 3) และวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ใช้โครงสร้างวงจรเป็นเทคโนโลยีมอสทรานซิสเตอร์ TMEC 0.8 μ m ชนิดพี (Level 49) และ ชนิดเอ็น (Level 49) ดังตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ในแต่ละตัวที่ใช้ในการออกแบบวงจร และในบทนี้ได้แสดงการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรเซนเซอร์ ISFET เมื่อทำงานร่วมกับวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET โดยมีการทดสอบแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

- 4.1 การทดสอบวงจรเซนเซอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10
- 4.2 การทดสอบวงจรสะท้อนกระแสแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์
- 4.3 การทดสอบวงจรขยายความนำถ่ายโอน (OTA) แบบใช้มอสทรานซิสเตอร์
- 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10
- 4.5 การทดสอบประสิทธิภาพความไวในการตอบสนองต่อค่า pH และค่าความเป็นเชิงเส้น
- 4.6 การทดสอบประสิทธิภาพวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25°C, 50°C, 75°C, และ 100°C
- 4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ออกแบบในรูปแบบที่ 3.7 กับสถาปัตยกรรมวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ผ่านมา

ตารางที่ 4.1 ชื่อวงจร ชนิด อัตราส่วน ของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ใช้ในการออกแบบวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET

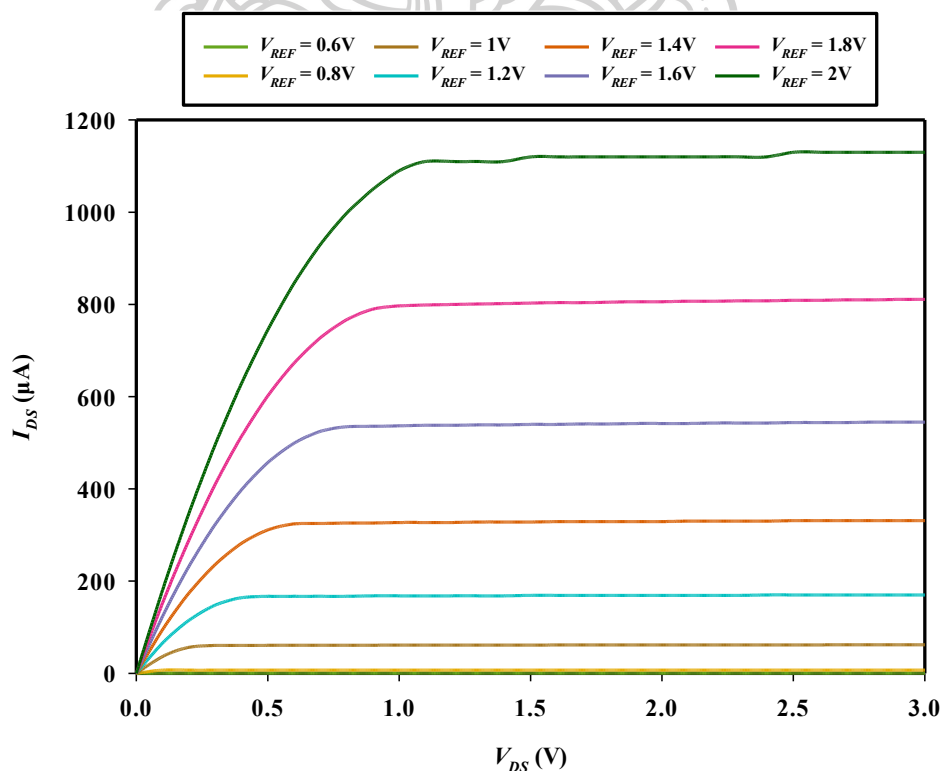
ชื่อวงจร	ชื่อของทรานซิสเตอร์	ชนิด	W/L ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
วงจรเซนเซอร์ ISFET	ISFET	NMOS	100/10
วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET	M1	PMOS	10/1
	M2	PMOS	10/1

ชื่อวงจร	ชื่อของทรานซิสเตอร์	ชนิด	W/L ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
	M3	PMOS	10/1
	M4	NMOS	35/1
	M5	NMOS	35/1
	M6	NMOS	10/1
	M7	NMOS	10/1
	M8	NMOS	100/25

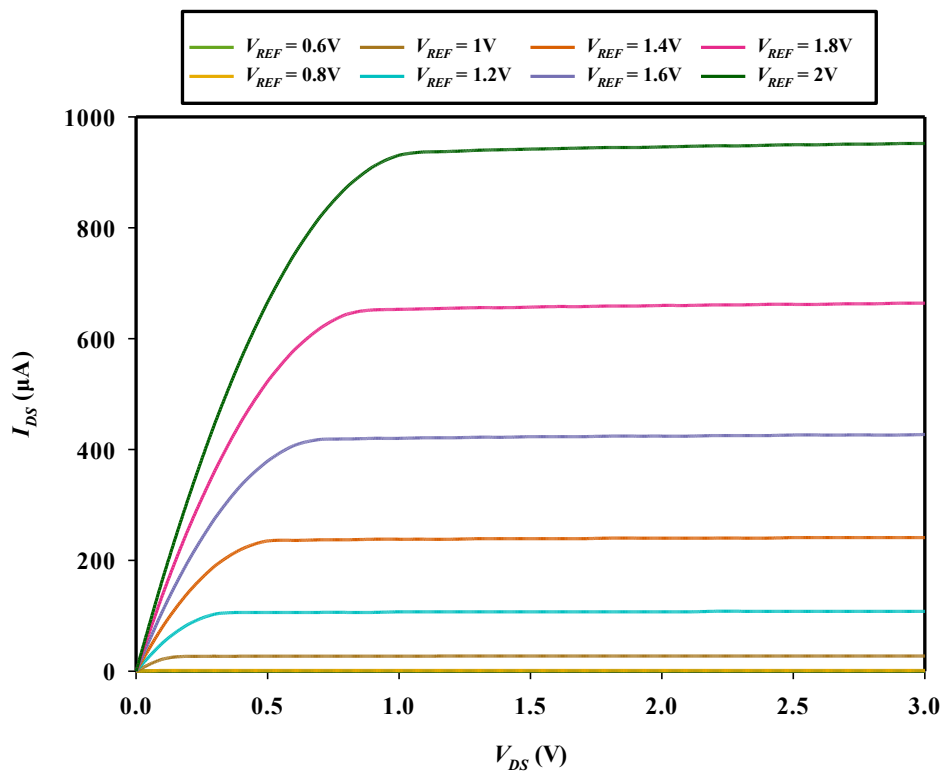
4.1 การทดสอบวงจรเซนเซอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10

4.1.1 การทดสอบวงจรเซนเซอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อค่า pH4, pH7, และ pH10 เมื่อกำหนดให้แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2 V

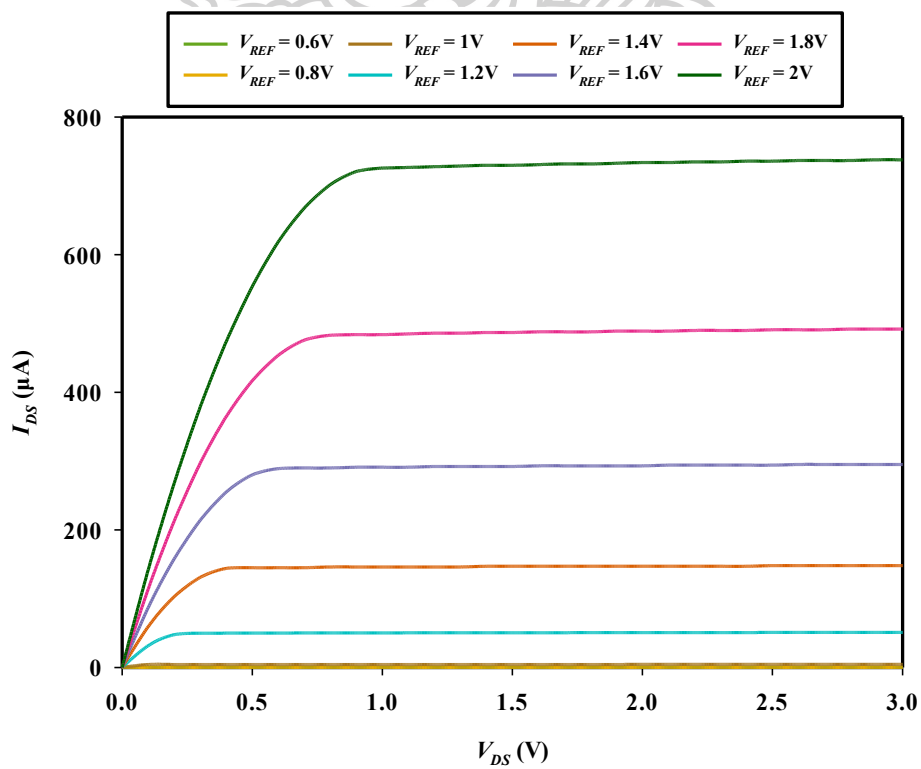
ขั้นต้นเป็นการทดสอบวงจรเซนเซอร์ ISFET ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน-ซอร์ส กับ แรงดันเดรน-ซอร์ส ($I_{DS}-V_{DS}$) ในสารละลาย pH 4, pH7, และ pH10 เมื่อกำหนดให้ แรงดัน V_{DS} ของวงจรให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 3V และแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2V ได้ผลทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับนี้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ($I_{DS}-V_{DS}$) ในสารละลาย pH 4



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (I_{DS} - V_{DS}) ในสารละลาย pH 7



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (I_{DS} - V_{DS}) ในสารละลาย pH 10

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ($I_{DS}-V_{DS}$). ในสารละลาย pH 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดัน V_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากระแส I_{DS} จะสูงขึ้นระยะหนึ่งแล้วจะเข้าสู่ย่านอิ่มตัว และเมื่อแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) มีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่ากระแส I_{DS} สูงขึ้นตาม ซึ่งค่ากระแส I_{DS} มีค่าสูงสุดประมาณ $1130\mu A$ ที่ V_{REF} มีค่าเท่ากับ $2V$ เมื่ออยู่ในย่านอิ่มตัว และจะมีค่ากระแส I_{DS} ลดลงเมื่อ แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ที่ถูกป้อนให้กับวงจรมีค่าลดลง โดยจะมีค่าต่ำสุดประมาณ $0.3060\mu A$ ที่ V_{REF} มีค่าเท่ากับ $0.6V$ เมื่อเข้าสู่ย่านอิ่มตัว และจากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ($I_{DS}-V_{DS}$) ในสารละลาย pH7 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีค่า pH สูงขึ้น และค่ากระแส I_{DS} ที่วัดได้จะมีค่าลดลง โดยค่ากระแส I_{DS} จะมีค่าสูงสุดประมาณ $952\mu A$ ที่ V_{REF} มีค่าเท่ากับ $2V$ และมีค่ากระแสต่ำสุดประมาณ $0.0725\mu A$ ที่ V_{REF} มีค่าเท่ากับ $0.6V$ เมื่ออยู่ในย่านอิ่มตัว สุดท้ายรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ($I_{DS}-V_{DS}$). ในสารละลาย pH 10 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีค่า pH สูงขึ้นเท่ากับ 10 ค่ากระแส I_{DS} ที่วัดได้จะมีค่าลดลงมาเมื่อเทียบกับกระแส I_{DS} ในสารละลาย pH4 และ pH7 ซึ่งค่ากระแส I_{DS} จะมีค่าสูงสุดประมาณ $738\mu A$ ที่ V_{REF} มีค่าเท่ากับ $2V$ และมีค่ากระแสต่ำสุดประมาณ $0.0125\mu A$ ที่ V_{REF} มีค่าเท่ากับ $0.6V$ เมื่ออยู่ในย่านอิ่มตัว

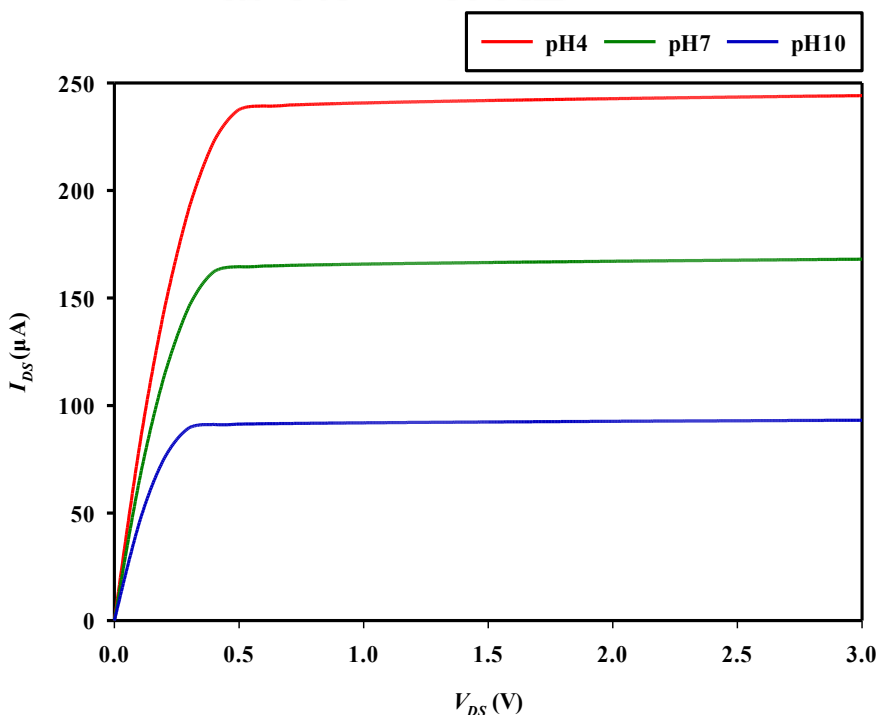
จากการทดสอบวงจรเซนเซอร์ ISFET เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ($I_{DS}-V_{DS}$) ในสารละลาย pH4,7, และ 10 เมื่อแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง $2V$ พบว่าค่ากระแส I_{DS} ของวงจรเซนเซอร์ ISFET จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) และจะมีค่าสูงสุดเมื่อทดสอบกับสารละลาย pH4 และมีค่าต่ำสุดเมื่อทดสอบกับสารละลาย pH10 อีกทั้งการทดสอบนี้ยังแสดงให้เห็นว่า แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเริ่มทำงานของเซนเซอร์ ISFET สามารถสังเกตได้จากแรงดันอ้างอิงในช่วง 0.6 ถึง $0.8V$ จะมีกระแส I_{DS} ที่มีค่าต่ำมากซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในการออกแบบวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET จำเป็นต้องเลือกค่าแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ให้เหมาะสม เพื่อให้เซนเซอร์ ISFET สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้อย่างแม่นยำ

4.1.2 การทดสอบวงจรเซนเซอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อค่า pH4, pH7, และ pH10 เมื่อกำหนดให้แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) คงที่เท่ากับ $1.3V$

จากรูปที่ 4.4 เป็นการทดสอบวงจรเซนเซอร์ ISFET เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ($I_{DS}-V_{DS}$) ในสารละลาย pH4, pH7, และ pH10 โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิง

(V_{REF}) คงที่เท่ากับ 1.3V พบว่าค่ากระแส I_{DS} ของวงจรถนเซออร์ ISFET จะมีค่าสูงสุดเมื่อทดสอบในสารละลาย pH4 โดยมีค่ากระแส I_{DS} เมื่อเข้าสู่ย่านอิ่มตัวประมาณ 244 μ A ในขณะที่เมื่อทดสอบในสารละลาย pH7 และ pH10 ค่ากระแส I_{DS} ลดลงเหลือประมาณ 167 μ A และ 93 μ A ตามลำดับ

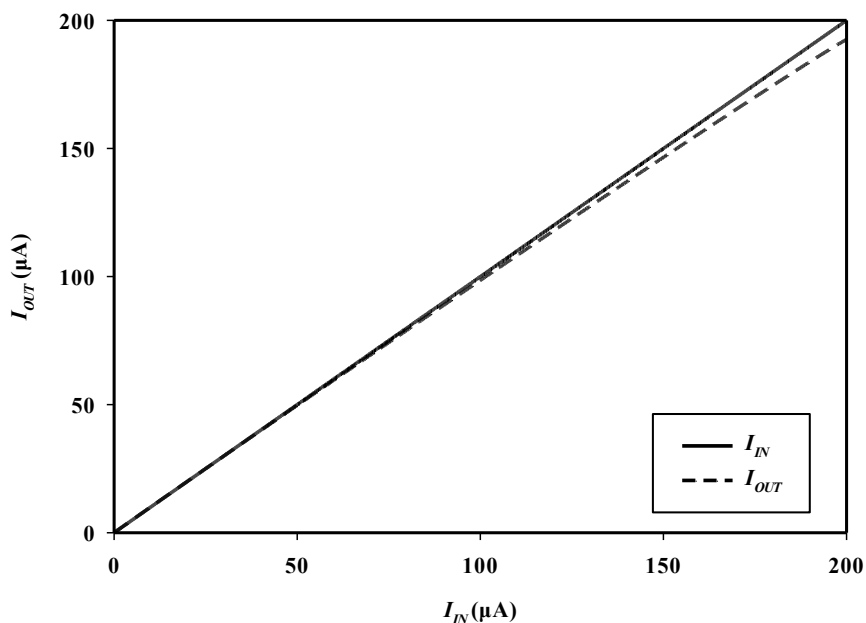
จากผลการทดลองพบว่ากระแส I_{DS} มีค่าลดลงเมื่อค่า pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่ลดลงในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบส โดยสารละลายที่มีค่า pH ต่ำหรือมีฤทธิ์เป็นกรดจะมีปริมาณไฮโดรเจนไอออนจำนวนมากทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของชั้นฉนวนมากกว่าสารละลายที่มีค่า pH สูง ส่งผลให้กระแส I_{DS} ที่วัดได้มีค่าสูงกว่า ดังนั้น ค่ากระแส I_{DS} จึงแปรผันตามปริมาณของไฮโดรเจนไอออนที่ถูกดูดซับบนชั้นฉนวนของเซนเซออร์ ISFET



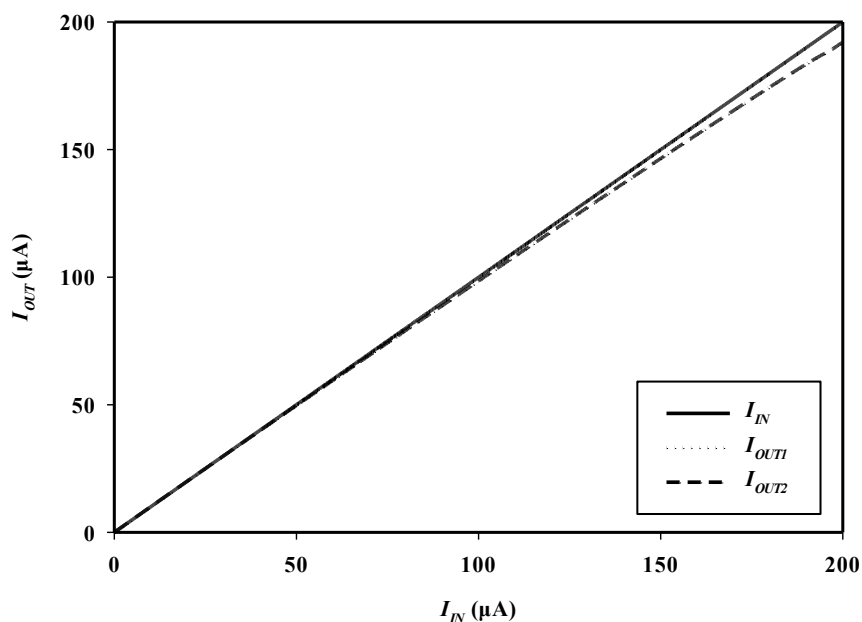
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (I_{DS} - V_{DS}) ในสารละลาย pH4, pH7, และ pH10

4.2 การทดสอบวงจรถนเซออร์แบบใช้มอสทรานซิสเตอร์

วงจรถนอ่านข้อมูลเซนเซออร์ที่ได้ออกแบบโดยมีโครงสร้างประกอบไปด้วยวงจรถนเซออร์กระแส 2 วงจร ได้แก่ วงจรถนเซออร์กระแสแบบที่ใช้ มอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS ดังรูปที่ 3.2 และ มอสทรานซิสเตอร์ชนิด PMOS ดังรูปที่ 3.4 โดยมีผลการทดสอบวงจรถนเซออร์กระแสทั้ง 2 ชนิด แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุตของวงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ ชนิด NMOS



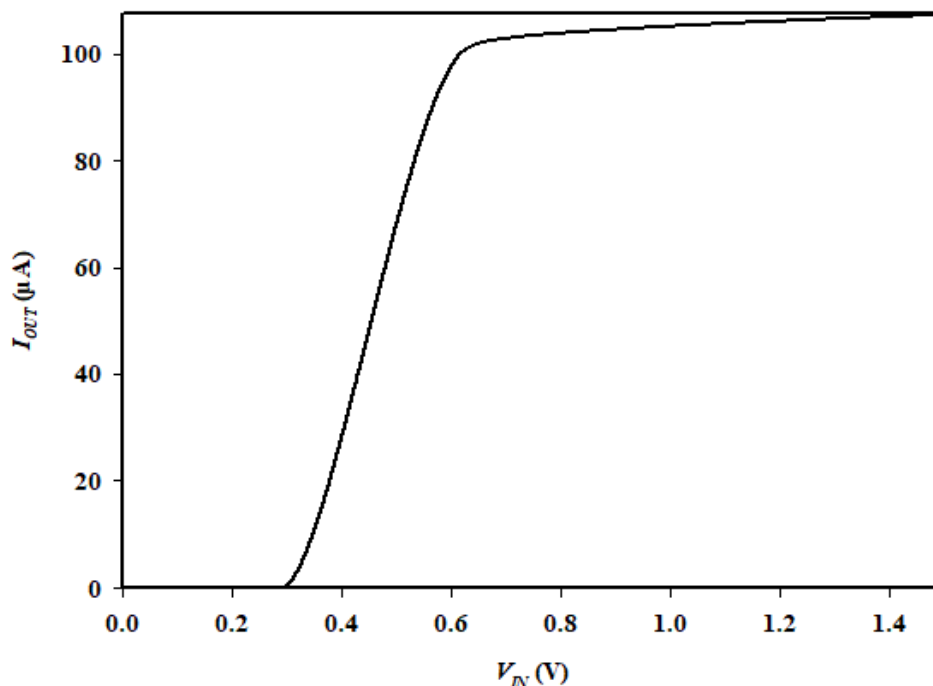
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุตของวงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ ชนิด PMOS

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบวงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้ มอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS โดยเมื่อป้อนกระแสอินพุต I_{IN} ให้กับวงจร กระแสจะถูกส่งผ่านจากมอสทรานซิสเตอร์ M_6 ไปยัง มอสทรานซิสเตอร์ M_7 ซึ่งเป็นไปตามหลักการของวงจรสะท้อนกระแส ทำให้กระแสเอาต์พุต I_{OUT} มีค่าเท่ากับกระแสอินพุต I_{IN} ในช่วงที่กระแส I_{IN} อยู่ระหว่าง 0 ถึง 50 μA และเมื่อกระแส I_{IN} มีค่ามากกว่า 50 μA พบว่ากระแส I_{OUT} ยังคงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับกระแสอินพุต และจากรูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบวงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้ มอสทรานซิสเตอร์ชนิด PMOS พบว่าเมื่อป้อนกระแสอินพุต I_{IN} ให้กับวงจรจะทำให้เกิดการส่งผ่านกระแสผ่านมอสทรานซิสเตอร์ M_1 ไปยัง มอสทรานซิสเตอร์ M_2 และสะท้อนกระแสไปยังทรานซิสเตอร์ M_3 ทำให้กระแสเอาต์พุต I_{OUT1} และ I_{OUT2} มีค่าเท่ากันและมีค่าเท่ากับกระแสอินพุต I_{IN} ในช่วงที่กระแส I_{IN} อยู่ระหว่าง 0 ถึง 50 μA และเมื่อกระแส I_{IN} มีค่ามากกว่า 50 μA พบว่ากระแส I_{OUT1} และ I_{OUT2} ยังคงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับกระแสอินพุต ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวงจรในการคงค่ากระแสเอาต์พุตให้สอดคล้องกับกระแสอินพุต

ผลการจำลองวงจรสะท้อนกระแสแบบที่ใช้ มอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS และ PMOS แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่มอสทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกันทุกประการ กระแสเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับกระแสอินพุตภายในช่วงค่าหนึ่งของกระแสอินพุต แต่เมื่อค่ากระแสอินพุตเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง ค่ากระแสเอาต์พุตจะเริ่มเบี่ยงเบนจากค่ากระแสอินพุตเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์รวมถึงข้อจำกัดเชิงโครงสร้าง เช่น อัตราส่วน W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ที่กำหนดไว้ ส่งผลให้วงจรไม่สามารถรักษาความเป็นอุดมคติในการสะท้อนกระแสได้ตลอดช่วงการทำงาน

4.3 การทดสอบวงจรขยายความนำถ่ายโอนแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์

วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ที่ได้ออกแบบโดยมีโครงสร้างประกอบไปด้วยวงจรขยายความนำถ่ายโอนแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์ซึ่งประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ชนิด PMOS 2 ตัว และ NMOS 2 ตัว ดังรูปที่ 3.6 ทดสอบวงจรด้วยการไบอัสกระแส I_B คงที่เท่ากับ 100 μA และป้อนแรงดันอินพุต V_{IN} ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1.5V โดยมีผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.7

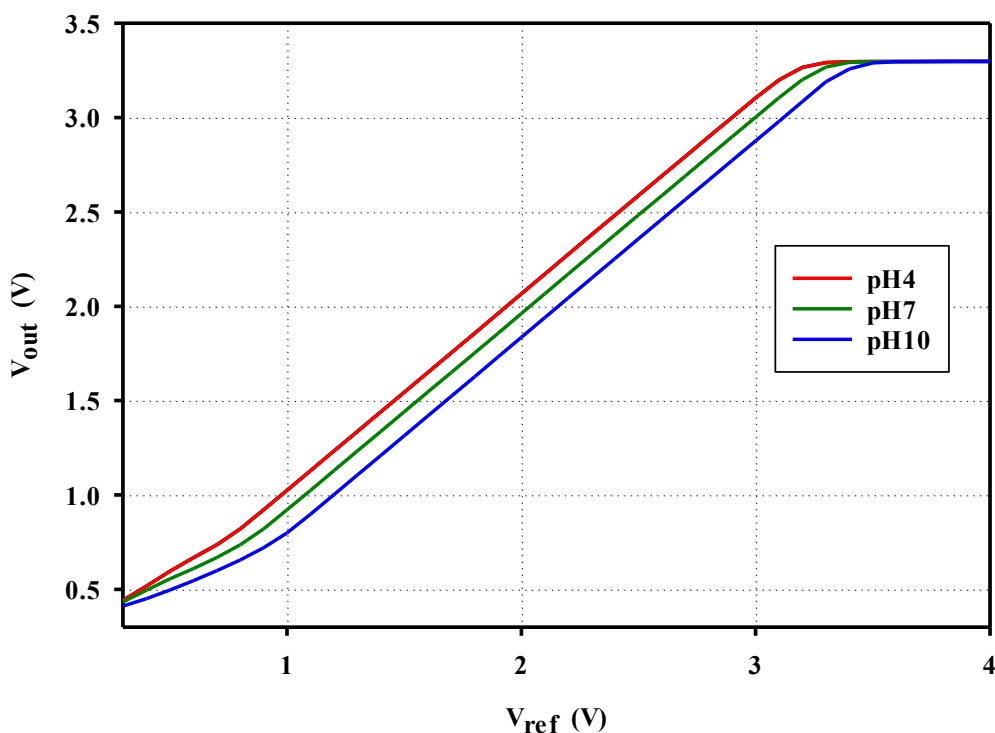


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับกระแสเอาต์พุตของวงจร OTA

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_{IN} กับกระแสเอาต์พุต I_{OUT} ของวงจร OTA ที่ใช้ภายในวงจรอ่านข้อมูล พบว่า มีช่วงการทำงานในย่านเชิงเส้นที่แคบ และเมื่อป้อนแรงดันอินพุต V_{IN} มากกว่า 0.5 V ขึ้นไป การทำงานของวงจรจะเข้าสู่ย่านอิ่มตัวทำให้ค่ากระแสเอาต์พุต I_{OUT} มีค่าเท่ากับกระแสอินพุต I_{IN} ที่ถูกป้อนให้กับวงจร

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อสารละลายที่มีค่า pH 4, pH7, และ pH10

การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในการตอบสนองต่อค่า pH4, pH7, และ pH10 ในรูปที่ 3.7 เมื่อกำหนดให้ค่าความต้านทาน (R_f) เท่ากับ 500 $k\Omega$ โดยมีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรง (V_{DD}) เท่ากับ $\pm 3.3V$ และกำหนดค่าแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 4V จะได้ผลลัพธ์การจำลองวงจรแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แรงดันเอาต์พุต V_{OUT} ในช่วงค่า pH 4, 7 และ 10 ที่ แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 4V

จากผลลัพธ์การจำลองวงจรดังรูปที่ 4.8 พบว่าแรงดันเอาต์พุต V_{OUT} สามารถแยกความแตกต่างของสารละลายที่มีค่า pH 4, 7 และ 10 ได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อแรงดันอ้างอิงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 3.1V แต่เมื่อแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) มีค่าต่ำกว่า 0.6V หรือ มากกว่า 3.1V จะไม่สามารถแยกความแตกต่างของค่า pH ในสารละลายแต่ละชนิดได้ ดังนั้นแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ที่อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 3.1V จึงเป็นแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ที่สามารถนำไปใช้งานได้และพบว่าแรงดันในช่วงดังกล่าวข้างต้นมีความไวต่อการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบส สูงซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

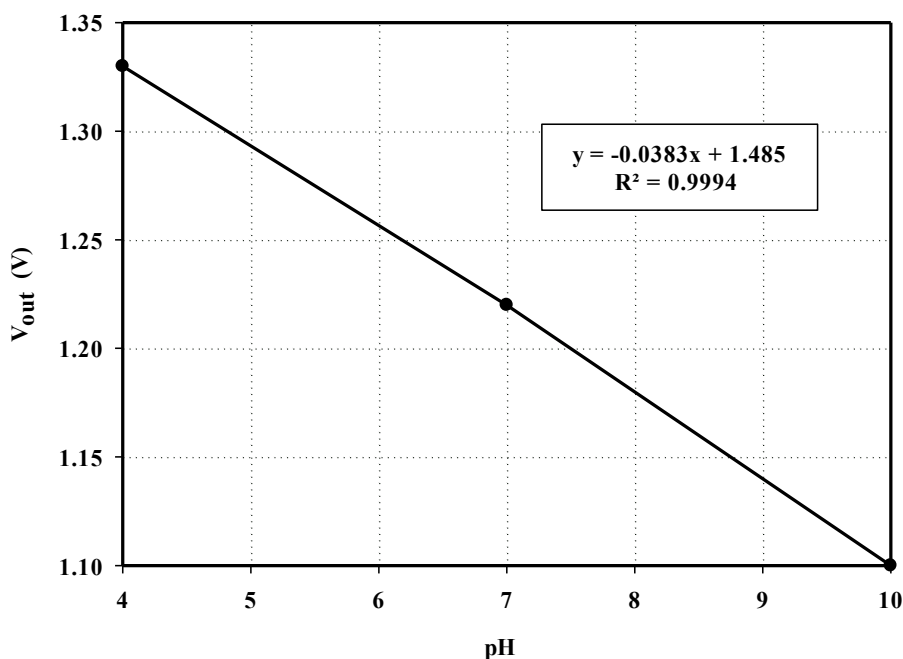
4.5 การทดสอบประสิทธิภาพความไวในการตอบสนองต่อค่า pH และค่าความเป็นเชิงเส้น

เนื่องจากเซนเซอร์ ISFET ถือเป็นเครื่องมือวัดชนิดหนึ่งดังนั้น ค่าความไว (Sensitivity) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity) จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพความไวในการตอบสนองค่า pH เมื่อทดสอบกับสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10 รวมถึงคำนวณหาค่าความเป็นเชิงเส้นเมื่อกำหนดให้แรงอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 3.1 V : ซึ่งเป็นช่วงแรงดันอ้างอิงที่มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพในหัวข้อที่ 4.4 จะได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพความไวในการตอบสนองต่อค่า pH และค่าความเป็นเชิงเส้น ของวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET

Voltage reference V_{REF} (V)	Sensitivity (mV/pH)	Linearity R^2
0.6	18.30	0.9973
0.7	25.00	0.9985
0.8	28.30	0.9988
0.9	35.00	0.9992
1.0	38.30	0.9994
1.1	38.30	0.9994
1.2	38.30	0.9994
1.3	38.30	0.9994
1.4	38.30	0.9994
1.5	38.30	0.9994
1.6	38.30	0.9994
1.7	38.30	0.9994
1.8	38.30	0.9994
1.9	38.30	0.9994
2.0	38.30	0.9994
2.1	38.30	0.9994
2.2	38.30	0.9994
2.3	38.30	0.9994
2.4	38.30	0.9994
2.5	38.30	0.9994
2.6	38.30	0.9994
2.7	38.30	0.9994
2.8	38.30	0.9994
2.9	38.30	0.9994
3.0	38.30	0.9944
3.1	38.30	0.9944

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าแรงดันอ้างอิงที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.9V มีค่าความไวในการตอบสนองต่อค่า pH และค่าความเป็นเชิงเส้นมีค่าต่ำเพียง 18.3 ถึง 35 mV/pH และ 0.9973 ถึง 0.9992 ตามลำดับ และเมื่อแรงดันอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 3.1V จะมีค่าความไวสูงสุดเท่ากับ 38.3 mV/pH และมีค่าความเป็นเส้นสูงสุดเท่ากับ 0.9994 แต่เมื่อค่าแรงดันอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.1V ค่าความเป็นเชิงเส้นจะลดลงเท่ากับ 0.9944 จากการผลการทดสอบประสิทธิภาพความไวในการตอบสนองต่อค่า pH และค่าความเป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถเลือกค่าแรงดันอ้างอิงที่ทำให้วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 2.9 V ดังนั้นจึงเลือกค่าแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 1.3 V ป้อนให้กับวงจร และนำค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET มาพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบกับระดับค่า pH ที่แตกต่างกันในช่วง pH 4, pH7, และ pH10 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แรงดันเอาต์พุต V_{out} ในช่วงค่า pH 4,7, และ 10 ที่แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) เท่ากับ 1.3V

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ค่า pH 4 จะมีค่าแรงดันเอาต์พุตสูงที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อค่า pH มีค่าสูงขึ้นเป็น 7 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการตรวจจับปริมาณของไฮโดรเจนไอออนบนชั้นฉนวนมีความเข้มข้นลดลงทำให้เกิดการไหลของกระแส $I_{DS-ISFET}$ ลดลง ส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ของวงจรมีค่าลดลงตาม และเมื่อคำนวณหาค่าความไว

จะได้ค่าความไวเท่ากับ 38.3 mV/pH และ ความเป็นเชิงเส้นหรือ (R^2) เท่ากับ 0.9994 ซึ่งความไวในที่นี้ หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต V_{OUT} ของวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นไอออนไฮโดรเจนในสารละลาย ที่สามารถหาได้จากความชันของกราฟแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อค่า pH โดยในรายงานผลการทดลองจะไม่คำนึงถึงเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ (บวกหรือลบ) และ ความเป็นเชิงเส้น (R^2) หมายถึง ระดับความสอดคล้องของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต กับค่า pH ซึ่งในทางอุดมคติ ความสัมพันธ์นี้ควรเป็นเส้นตรงตามสมการเนินสต์ (Nernst Equation) [2] กล่าวคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ควรเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเป็นเส้นตรงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า pH ซึ่ง วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่มีประสิทธิภาพที่ดีควรมีค่าความเป็นเชิงเส้น มากกว่า 0.99

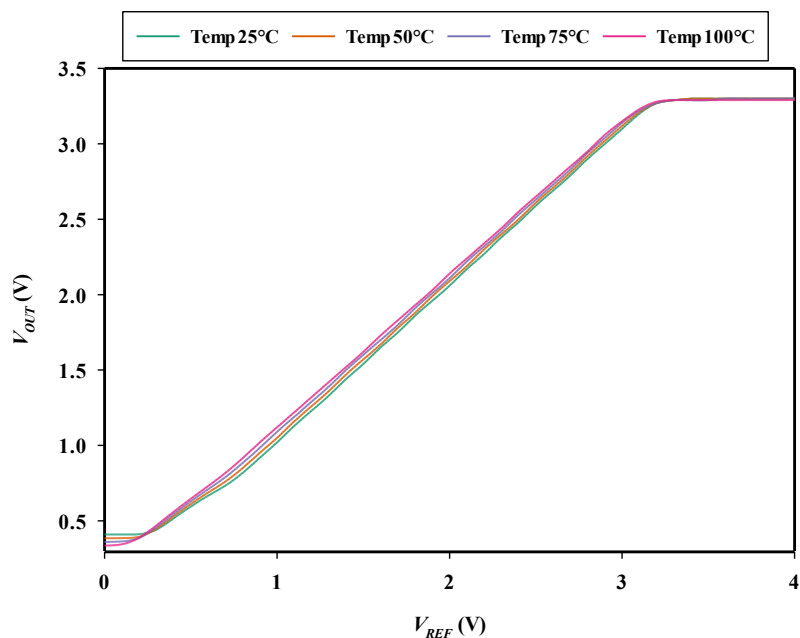
4.6 การทดสอบประสิทธิภาพวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25°C, 50°C, 75°C, และ 100°C

เนื่องจากการทดลองจริง ปัจจัยด้านอุณหภูมิถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของสารละลาย โดยเฉพาะค่า pH ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สมดุลของไอออนในสารละลายจะเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่า pH ของสารละลายเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เพื่อศึกษาผลกระทบดังกล่าว จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10 ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ได้แก่ 25°C, 50°C, 75°C, และ 100°C

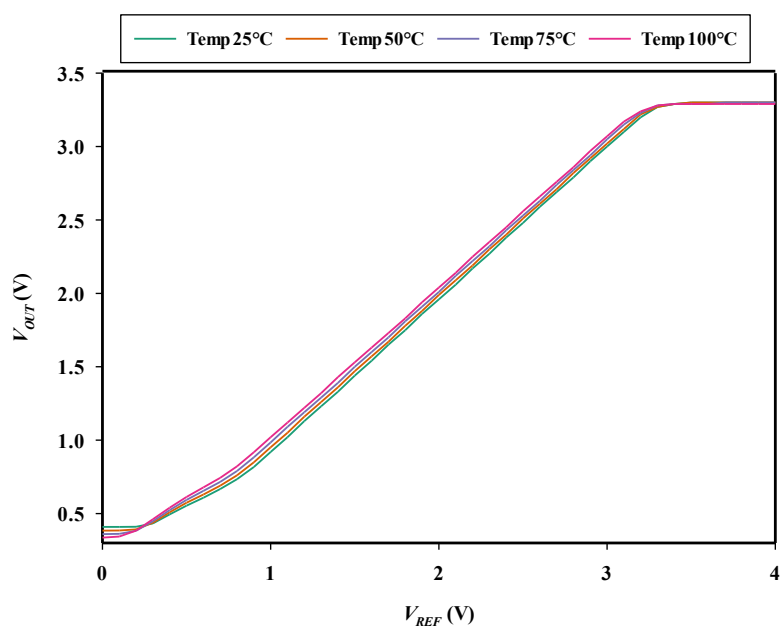
ในการทดลองนี้ กำหนดให้ค่าความต้านทาน (R_I) เท่ากับ 500 k Ω โดยมีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรง (V_{DD}) เท่ากับ $\pm 3.3V$ และกำหนดแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 4 V และทำการจำลองวงจรในสารละลายทั้งสามค่า pH ดังที่กล่าวไปข้างต้น โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10, รูปที่ 4.11, และ รูปที่ 4.12 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองในสารละลาย pH4 เมื่อแรงดันอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 0.6-3.1V พบว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยมีความเบี่ยงเบนสูงสุดเท่ากับ 11.94% ที่อุณหภูมิ 100°C และต่ำสุด 0.39% ที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 0.8V และ 3.1V ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.11 เป็นผลการทดลองในสารละลาย pH 7 พบว่าแรงดันเอาต์พุต มีความเบี่ยงเบนสูงสุด 11.98% ที่อุณหภูมิ 100°C และต่ำสุด 0.63% ที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 0.9V และ 3.1V ตามลำดับ สุดท้ายจากรูปที่ 4.12 เป็นผลการทดลองใน

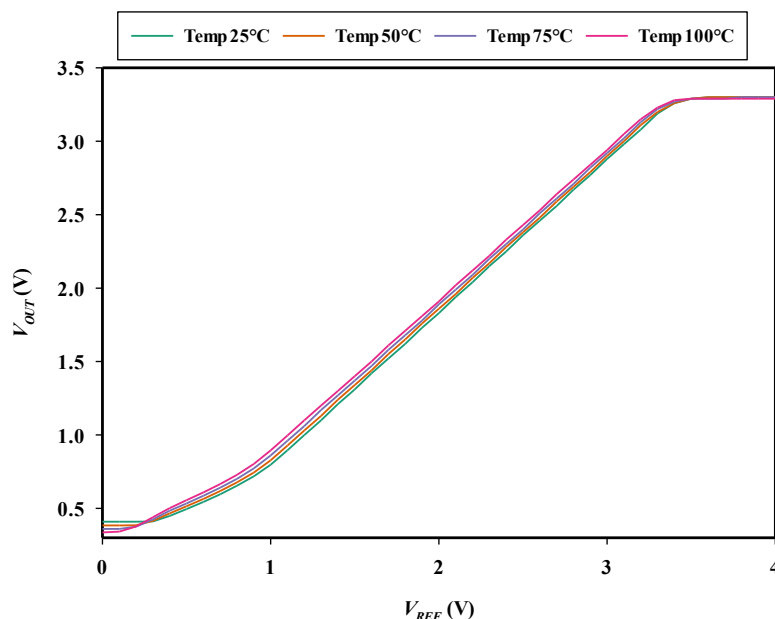
สารละลาย pH10 พบว่าแรงดันเอาต์พุต มีความเบี่ยงเบนสูงสุด 12.34% ที่อุณหภูมิ 100°C และต่ำสุด 0.74% ที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 1V และ 3.1V ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 แรงดันเอาต์พุตของสารละลาย pH4 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25°C, 50°C, 75°C, และ 100°C



รูปที่ 4.11 แรงดันเอาต์พุตของสารละลาย pH7 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25°C, 50°C, 75°C, และ 100°C



รูปที่ 4.12 แรงดันเอาต์พุตของสารละลาย pH10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25°C, 50°C, 75°C, และ 100°C

โดยสรุปพบว่า แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นในทุกค่า pH ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการทำงานของวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ ออกแบบ อีกทั้งยังพบว่าแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ส่งผลต่อระดับความเบี่ยงเบนของแรงดันเอาต์พุตของ สารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) และค่า pH ต่อพฤติกรรมของวงจรอ่านข้อมูลที่ได้ออกแบบ

4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ ออกแบบ ในรูปที่ 3.7 กับ สถาปัตยกรรมวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ผ่านมา

จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ ออกแบบ และพัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำผลการทำงานมาเปรียบเทียบการทำงานกับวงจรอ่าน ข้อมูลเซนเซอร์ ISFET จากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 2 โดยใช้เกณฑ์ในการ เปรียบเทียบที่สำคัญได้แก่ เทคโนโลยีที่ใช้ในการออกแบบ โหมดการทำงานของวงจร จำนวนของ อุปกรณ์แอกทีฟและพาสซีฟที่ใช้ในวงจร ช่วงแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ที่วงจรสามารถรองรับได้ ความไว ความเป็นเชิงเส้นของแรงดันเอาต์พุต และอัตราการใช้พลังงาน แสดงได้ดัง ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในรูปที่ 3.7 กับสถาปัตยกรรมวงจรรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ผ่านมา

อ้างอิง	เทคโนโลยี (μm)	โหมด	จำนวนของ อุปกรณ์ แอคทีฟ	R+C	ช่วง แรงดัน V_{REF}	ความไว (mV/pH)	เชิงเส้นตรง (R^2)	อัตรา บริโภค พลังงาน (W)
[11] รูปที่ 2.19	0.35	แรงดัน	ออปแอมป์ 2	8+2	-	-48.087	0.9906	-
[11] รูปที่ 2.20	0.35	แรงดัน	มอสเฟต 3	0+0	0.8-1.1V	107.101	0.9884	-
[11] รูปที่ 2.21	0.35	แรงดัน	ออปแอมป์ 1+ มอสเฟต 1	0+0	0.8-1.1V	117.800	0.9944	-
[11] รูปที่ 2.22	0.35	แรงดัน	ออปแอมป์ 1+ มอสเฟต 2	0+0	1.1-2.2V	201.736	0.9991	-
[12]	0.35	แรงดัน	ออปแอมป์ 2+ มอสเฟต 7	13+2	0.2-0.4V	77.993	0.9991	-
[13]	0.35	กระแส	CCH 2+ มอสเฟต 1	0+0	-	22.7 $\mu\text{A/pH}$	-	-
[14]	0.18	แรงดัน	ออปแอมป์ 1+ มอสเฟต 4	0+0	-	-37	-	450n
วงจรรูป ที่ 3.7	0.8	แรงดัน	มอสเฟต 8	1+0	0.6-3.1	38.3	0.9994	34.42 μ

*ค่าความไว (Sensitivity) คือ ค่าความชัน (ไม่คิดเครื่องหมาย บวก-ลบ)

จากตารางที่ 5.1 พบว่าวงจรรอ่านข้อมูลที่ได้ออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความกว้างของสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่กว้างกว่าเท่ากับ 0.6-3.1V และมีความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่ากับ 0.9994 อีกทั้งยังใช้จำนวนอุปกรณ์แอคทีฟและแพสซีฟในจำนวนน้อยกว่างานวิจัย [11] รูปที่ 2.19 และงานวิจัย [12] ซึ่งวงจรรอ่านข้อมูลที่ออกแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์เพียง 8 ตัว ต่อกับตัวต้านทาน 1 ตัว แต่วงจรมีความไวที่ต่ำกว่างานวิจัย [11-12]

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาวงจรอ่านข้อมูลสำหรับเซนเซอร์ ISFET ให้มีช่วงสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่กว้างและมีความเป็นเชิงเส้นสูงรวมถึงการบริโภคพลังงานต่ำ โดยวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ออกแบบประกอบไปด้วย วงจรหลัก 2 วงจร คือ วงจรเซนเซอร์ ISFET และวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ซึ่งภายในวงจรอ่านข้อมูลนี้จะประกอบไปด้วย วงจรขยายความนำถ่ายโอน (OTA) และวงจรสะท้อนกระแส (Current mirror) โดยการวิเคราะห์ห้วงจรได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

การทดสอบประสิทธิภาพวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ออกแบบด้วยการจำลองการทำงานผ่าน โปรแกรม LTspice โดยใช้โมสทรานซิสเตอร์ $0.8\ \mu\text{m}$ ของ TMEC จากการจำลองการทำงานวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ในสารละลายที่มีค่าเท่ากับ pH4, pH7, และ pH10 พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย โดยค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่ามากที่สุดเมื่อทดสอบกับสารละลายที่มีค่า pH4 และเมื่อทดสอบกับสารละลายที่มีค่า pH7 และ pH10 พบว่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลง โดยค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้วัดได้ในสารละลาย pH10 จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองวงจร ที่ออกแบบกับสารละลายที่มีค่า pH ที่แตกต่างกันที่กล่าวข้างต้นพบว่าแรงดันเอาต์พุตจะลดลงอย่างสม่ำเสมอตามลำดับสารละลายที่มีค่า pH สูงขึ้น ทำให้สามารถแยกความแตกต่างของค่า pH ของสารละลายแต่ละชนิดได้ และพบว่าวงจรอ่านข้อมูลที่ออกแบบมีค่าแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ที่สามารถใช้งานได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.6-3.1V ซึ่งค่าแรงดันอ้างอิงในช่วงดังกล่าวจะสามารถตอบสนองต่อการแยกความแตกต่างของค่า pH ของสารละลายแต่ละชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะมีค่าความไวสูงสุดเท่ากับ $38.3\ \text{mV/pH}$ และมีความเป็นเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่ากับ 0.9994 ที่ค่า V_{REF} อยู่ในช่วง 1 ถึง 2.9V แต่เมื่อค่าแรงดันอ้างอิงอยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.1V ค่าความเป็นเชิงเส้นจะลดลงเท่ากับ 0.9944 และจะมีค่าความไวต่ำที่สุดเท่ากับ $18.3\ \text{mV/pH}$ และมีความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ 0.9973 ที่ V_{REF} เท่ากับ 0.6V นอกจากนี้เมื่อทดสอบประสิทธิภาพวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ออกแบบ ด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25°C , 50°C , 75°C , และ 100°C ในสารละลายที่มีค่า pH4, pH7, และ pH10 พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นในทุกค่า pH โดยผลทดสอบในสารละลาย pH4 แรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งมีความเบี่ยงเบน

สูงสุดเท่ากับ 11.94% ที่ อุณหภูมิ 100°C และต่ำสุด 0.39% ที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 0.8V และ 3.1V ตามลำดับ และในสารละลาย pH 7 พบว่าแรงดันเอาต์พุต มีความเบี่ยงเบนสูงสุด 11.98% ที่อุณหภูมิ 100°C และต่ำสุด 0.63% ที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 0.9V และ 3.1V ตามลำดับ สุกท้ายในสารละลาย pH10 พบว่าแรงดันเอาต์พุต มีความเบี่ยงเบนสูงสุด 12.34% ที่อุณหภูมิ 100°C และ ต่ำสุด 0.74% ที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 1V และ 3.1V ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) และค่า pH ที่แตกต่างกันของสารละลายต่อพฤติกรรมของวงจรอ่านข้อมูลที่ได้ออกแบบ

และเมื่อนำวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ได้ออกแบบและพัฒนาเปรียบเทียบกับวงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่ผ่านมาที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 พบว่าวงจรอ่านข้อมูลที่ได้ออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถรองรับสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่กว้างกว่า เท่ากับ 0.6 ถึง 3.1V และมีความเป็นเชิงเส้นสูง เท่ากับ 0.9994 อีกทั้งยังใช้จำนวนอุปกรณ์แอกทีฟและแพสซีฟในจำนวนน้อยรวมกันทั้งหมด 9 ตัว จากจุดเด่นที่ได้กล่าวไปเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจะได้วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ที่มีช่วงแรงดันอ้างอิงรองรับที่กว้างทำให้สามารถเลือกใช้ค่าแรงดันอ้างอิงได้หลายค่า และมีความแม่นยำในการตรวจวัดค่า pH เนื่องจากมีความเป็นเชิงเส้นสูง และนอกจากนี้ยังประหยัดพลังงานโดยวงจรที่ได้ออกแบบบริโภคพลังงานเพียง 34.42 μ W

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรพัฒนาให้วงจรอ่านข้อมูลเซนเซอร์ ISFET ให้มีความไวต่อการตอบสนองต่อค่า pH ให้มีความไวสูงขึ้น โดยอาจใช้วิธีการปรับปรุงโครงสร้างภายในวงจร เช่น การเลือกใช้ อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- 2) ลดจำนวนอุปกรณ์แอกทีฟเพื่อลดการใช้พลังงานของวงจรและเพิ่มความเหมาะสมในการใช้งานแบบพกพา
- 3) เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งต่อการวัดค่า pH ของสารละลาย จึงควรออกแบบวงจรอ่านข้อมูลให้สามารถชดเชยผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ เช่น เพิ่มวงจรปรับค่าชดเชยแรงดัน เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่า pH ในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย

รายการอ้างอิง

1. Khanna, V.K., *FIETE (2008) ISFET (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor)-based Enzymatic Biosensors for Clinical Diagnostics and their Signal Conditioning Instrumentation*. IETE Journal of Research, 2008. **54**(3): p. 193-200.
2. Bergveld, P., *Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements*. IEEE Trans. on Biomedical Engineering, 1970. **BME-17**(1): p. 70-71.
3. L. Kuang, J.Z., and P. Georgiou, *On-Chip Compressed Sensing with CMOS ISFET Arrays for Biomedical Applications*, in *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*. 2023. p. 1-5.
4. K. Chen, P.T., N. Moser and P. Georgiou, *A Wide-Range ISFET Readout Circuit with Low-Power Linearity Enhancement*, in *2023 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2023: Monterey, CA, USA. p. 1-5.
5. M. Cacho-Soblechero, K.M.-C., C. Cicatiello, J. Rodriguez-Manzano, and P. Georgiou, *A Dual-Sensing Thermo-Chemical ISFET Array for DNA-Based Diagnostics*. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2020. **14**(3): p. 477-489.
6. L. Keeble, N.M., J. Rodriguez-Manzano and P. Georgiou, *ISFET-Based Sensing and Electric Field Actuation of DNA for On-Chip Detection: A Review*. IEEE Sensors Journal, 2020. **20**(19): p. 11044-11065.
7. Toumazou, A.A.-A.a.C., *ISFET-Based Chemical Switch*. IEEE Sensors Journal, 2012. **12**(5): p. 1140-1146.
8. K. Wang, Y.L., C. Toumazou and P. Georgiou, *A TDC based ISFET readout for large-scale chemical sensing systems*, in *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*. 2012: Hsinchu, Taiwan. p. 176-179.
9. G. A. Taylor, C.P., H. Carrillo, and A. Mouazen, *A decision framework reference for ISFET sensor-based electronic systems design for agriculture industry applications*, in *2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON)*. 2020: New Delhi, India. p. 1-6.
10. T. C. Ye, S.F.W.M.H., N. Soin, and A. A. Bakar Sajak, *Modeling and optimization of ISFET microsensor for the use of quality testing in food and pharmaceutical industry*, in *2021 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*. 2021: Kuala

- Lumpur, Malaysia. p. 120-123.
11. L. S. O. de Castro, C.A.d.M.C., V. F. Cardoso, L. L. F. da Silva, M. V. Pelegrini and G. C. Marques, *Improved ISFET Readout Circuit: Characterization and Comparison*, in *2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. 2019: Sao Paulo, Brazil. p. 1-6.
 12. F. R. G. Cruz, E.S.R.P.M., J. C. M. Aranel, D. Jason Hao Paredes, G. R. P. Ramirez and W. -Y. Chung, *ISFET Bridge Type Readout Circuit with Programmable Voltage and Current*, in *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*. 2018: Jeju, Korea (South). p. 2362-2365.
 13. Yan, W.C.a.Z., *A novel current-mode readout circuit for ISFET sensor*, in *APCCAS 2008 - 2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*. 2008: Macao. p. 407-410.
 14. M. Asgari, K.-s.L.a.N.I., *Highly linear bridge-based ISFET pH sensor readout circuit*, in *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. 2017: Boston, MA, USA. p. 1049-1052.
 15. พิพัฒน์ พรหมมี, ตำราเรียนวิชาวงจรรวมแบบแอนะล็อกสำหรับการสื่อสาร = *Analog integrated circuits for communications* 2560, กรุงเทพมหานคร ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 16. Harrison, R. *The MOS Transistor in Weak Inversion* Available from : <https://amarketplaceofideas.com/wp-content/uploads/2014/06/Subthreshold1.pdf>.
 17. KOROTCENKOV, G., *CHEMICAL SENSORS COMPREHENSIVE SENSORS TECHNOLOGIES*. Vol. 5. 2011.
 18. Lee, C.-S., S.K. Kim, and M. Kim, *Ion-Sensitive Field-Effect Transistor for Biological Sensing*. *Sensors-Basel*, 2009(9): p. 7111-7131.
 19. อุทัย ไทยเจริญ สัตยา บุญรัตน์ชู ก้องเกียรติ รักษ์วงศ์ สัมพันธ์ มะแข็ง, รายงานวิจัยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง *pH meter*. 2558, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.



A Wide Range and Highly Linear ISFET Readout Circuit

Niramol Saywan
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering and Industrial
Technology
Silpakorn University (Sanam Chandra
Palace Campus)
Nakhonpathom, Thailand
e-mail: saywan_n@su.ac.th

Apiradee Yodtean
NECTEC National Science and
Technology Development Agency
(NSTDA)
112 Thailand Science Park
Pathum Thani, Thailand
e-mail: apiradee.yodtean@nectec.or.th

Phamorn Silapan
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering and Industrial
Technology
Silpakorn University (Sanam Chandra
Palace Campus)
Nakhonpathom, Thailand
e-mail: silapan_p@su.ac.th

Yutana Jewajinda
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering and Industrial
Technology
Silpakorn University (Sanam Chandra
Palace Campus)
Nakhonpathom, Thailand
e-mail: jewajinda_y@su.ac.th

Abstract— The article introduces a highly linear readout circuit for ion-sensitive field-effect transistors (ISFET) developed in 0.8 μm CMOS technology. The proposed circuit comprises only eight transistors and a resistor, providing wide input ranges with high linearity. Simulation results from the LTSpice application indicate that the proposed circuit can function across a wide input range of 0.6–3.1 V. It exhibits a sensitivity of 38.3 mV/pH and a linearity of 0.9994 when simulated with a power supply of 3.3 volts. The power consumption rate is 34.42 μW .

Keywords— wide range, highly linear, ISFET readout circuit

I. INTRODUCTION

The MOSFET principle is the foundation of the ion-sensitive field-effect transistor (ISFET). A conducting channel on the surface of a semiconductor substrate is the foundation of MOSFET functionality. Primarily functioning as a pH sensor, the ISFET measures the pH of biological fluids used in medical devices, including blood and urine analysis applications. pH monitoring is paramount for diagnosing specific medical conditions and comprehending physiological states [1–4].

Using ISFET-based sensors in point-of-care diagnostic devices enables expeditious and site-specific testing. This is especially beneficial for rapid analysis of biological samples in healthcare settings [5–6]. In chemical manufacturing, ISFET-based sensors regulate pH in chemical processes [7–9]. Monitoring and regulating pH levels is essential to optimize reaction conditions and guarantee product quality. ISFETs also apply to monitor and control pH levels at various production phases in the food and beverage industry. This application is essential for ensuring that food and beverages remain safe and high-quality [10].

Critical to the ISFET is the readout circuit, which converts the electrical signals produced by the ISFET into legible and interpretable data. The primary objective of the readout circuit is to generate a measurable output from the changes in ion concentration detected by the ISFET. Readout circuits, which can be classified as Bridge-type readout (BTR), Active ISFET

Sensor readout (AIS), and Complementary ISFET MOSFET Pair (CIMP), are the subject of significant research because many readout circuits have been proposed [11–15]. The circuit in Fig. 6 of [11] offers high sensitivity. Still, it has limitations such as a narrow input range, low linearity, and the use of many resistors and capacitors, with the Op-Amp as the primary device, therefore consuming power. Fig. 7 of [11] comprises MOS transistors and excludes any passive components. This circuit has a low voltage and power requirement, a high sensitivity of 107.101 mV/pH, a narrow input range, and a modest linearity of 0.9884. The voltage-mode readout circuit depicted in Fig. 8–9 of [11] has numerous benefits: extremely high sensitivity, design using only active elements, and linearities of 0.9944 and 0.9991. However, both circuits lack a wide input range. [12] reports sensitivity and intense linearity of 77.93 mV/pH and 0.9991. However, the circuit is designed with many passive and active components, including two capacitors, two Op-Amps, seven MOS transistors, and thirteen resistors. Moreover, the input range is 0.2–0.4 V. The circuit functions in current mode, as demonstrated in reference [13]. The circuit structure is exclusively active, devoid of any passive components. As a result, the circuit is uncomplicated. Fortunately, this circuit exhibits relatively low sensitivity, measuring only 22 $\mu\text{A}/\text{pH}$. In voltage mode, the circuit described in [14] demonstrates notable sensitivity at 600 kHz/pH. However, it is characterized by a substantial configuration comprising 28 MOS transistors and has a limited input range of 0–1.8 V. In [15], an operational amplifier and four MOS transistors are used to construct a circuit devoid of passive components. Previously, its sensitivity was only -37 mV/pH.

In light of the issues mentioned earlier, this paper introduces an ISFET readout circuit suitable for instrumentation and measurement systems due to its broad input range and high linearity. Furthermore, the design utilizes CMOS technology, employs a limited number of passive components, and has a low power supply voltage. The rate of power consumption is measured in microwatts.

$$I_{DS} = \mu_{n-M} C_{ox} \frac{W_M}{L_M} (V_{GS-M} - V_{TH-M})^2, \quad (9)$$

and

$$I_{DS-ISFET} = \mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH-ISFET})^2. \quad (10)$$

where μ_{n-M} is MOSFET's the carrier's surface mobility, W_M is the channel width and L_M is the channel length of MOSFET. The voltage between MOSFET's gate-source pin and drain-source pin is represented by V_{GS-M} and V_{DS-M} . V_{TH-M} is the threshold voltage of MOSFET. At Node V_{S1} , $I_{DS-ISFET}$ can be expressed as

$$I_{DS-ISFET} = 2I_{DS}. \quad (11)$$

Substitute (9) and (10) into (11), which will be as follows:

$$(V_{GS} - V_{TH-ISFET})^2 = \frac{2\mu_{n-M} C_{ox} \frac{W_M}{L_M}}{\mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L}} (V_{GS-M} - V_{TH-M})^2. \quad (12)$$

Assuming that $G = \sqrt{\frac{\mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L}}{2\mu_{n-M} C_{ox} \frac{W_M}{L_M}}}$, (12) can be represented as

$$V_{GS} - V_{TH-ISFET} = \frac{V_{GS-M4} - V_{TH-M4}}{G}, \quad (13)$$

where $V_{GS} = V_{ref} - V_S$ and $V_{GS-M} = V_{out} - V_S$. Consequently, (13) can be rewritten to be

$$V_{ref} - V_S - V_{TH-ISFET} = \frac{V_{out} - V_S - V_{TH-M}}{G}, \quad (14)$$

(15) defines the output voltage change with pH to be

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial pH} = -G \partial V_{TH-ISFET} (pH). \quad (15)$$

From (15), it is found that the proposed circuit provides linear operation.

B. Non-ideal Case

This non-ideal case is a functional analysis of the current mirror's operation, which cannot transfer current at unity current gain (A_i). In this case, A_i is equal to α . From the above-mentioned, $I_{DS-ISFET}$ can be delivered to be

$$I_{DS-ISFET} = (1 + \alpha) I_{DS}. \quad (16)$$

From (16), it is possible to recalculate (12) to be

$$V_{GS} - V_{TH-ISFET} = (V_{GS-M} - V_{TH-M}) \sqrt{\frac{(1 + \alpha) \mu_{n-M} C_{ox} \frac{W_M}{L_M}}{\mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L}}} \quad (17)$$

Thus $G = \sqrt{\frac{\mu_{n-ISFET} C_{ox} \frac{W}{L}}{(1 + \alpha) \mu_{n-M} C_{ox} \frac{W_M}{L_M}}}$, the output voltage depends on pH as

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial pH} = -\partial G V_{TH-ISFET} (pH). \quad (18)$$

As seen from (18), the proposed circuit can produce linear results even though the current mirror does not operate ideally.

IV. SIMULATION RESULTS

To confirm that the readout circuit is effective, it was simulated using LTSpice. In the simulation, NMOS and PMOS $0.8 \mu\text{m}$ TMEC technology [17], a 3.3V power supply, and a resistor of 500k Ω are used in the circuit. ISFET is the model of [18]. Table I displays the dimensions of the NMOS, PMOS, and ISFET.

TABLE I. THE MOS TRANSISTOR'S ASPECT RATIOS.

Name of transistor	type	W/L ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
M_4, M_5	NMOS	35/1
M_2	NMOS	100/25
M_1-M_3, M_6-M_7	PMOS	10/1
ISFET		100/10

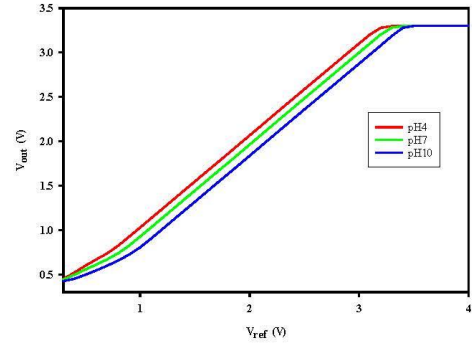


Fig. 3. The output voltage where V_{ref} varied

The simulation's output, which shows a pH range between 4 and 10, is shown in Fig. 3. Throughout the whole pH-simulated range, the reference electrode's optimal biasing point needs to maintain the highest level of sensitivity. It is evident that any value within the 0.6V to 3.1 V range can serve as the reference electrode's biasing point, supporting a wide range of inputs. The output voltage is illustrated in Fig. 4, which is in comparison to the pH value. The simulation results of the proposed circuit give a sensitivity of

38.3mV/pH with a linearity of 0.9994, which was achieved with a pH range of 4 to 10. The proposed circuit has strong linearity.

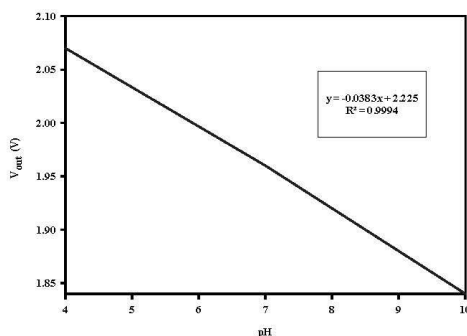


Fig. 4. The output voltage of proposed circuit versus pH

V. CONCLUSION

The voltage-mode readout circuit for ISFET consists of two current mirrors and two voltage differential circuits designed using 0.8 μm CMOS technology. The performance of this work is evaluated using LTspice simulations and compared with other cutting-edge circuits in Table II., in which our proposed circuit requires only eight MOS transistors. The results of the simulation demonstrate that the readout circuit can accommodate a broad input range of 0.6-3.1 V and provide an output with a linearity of 0.9994 and sensitivity of 38.3 mV/pH for the range of 4-10pH, as shown in Table II.

ACKNOWLEDGMENT

The research described in the paper was supported by the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, and we sincerely thank TMEC for providing and supporting TMEC process technology and ISFET tools.

REFERENCES

- [1] V. K. Khanna, "FIETE (2008) ISFET (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor)-based Enzymatic Biosensors for Clinical Diagnostics and their Signal Conditioning Instrumentation," *IETE Journal of Research*, vol. 54, no. 3, pp.193-200, 2008.
- [2] P. Bergveld, "Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements," *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, vol. BME-17, no. 1, pp. 70-71, 1970.
- [3] L. Kuang, J. Zeng, and P. Georgiou, "On-Chip Compressed Sensing with CMOS ISFET Arrays for Biomedical Applications," 2023 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), Toronto, ON, Canada, pp. 1-5, 2023.
- [4] P. Bergveld, "Thirty years of ISFETOLOGY: What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years," *Sensors And Actuators B: Chemical*, vol. B88, no. 1, pp. 1-20, 2003.
- [5] M. Cacho-Soblechero, K. Malpartida-Cardenas, C. Cicatiello, J. Rodriguez-Manzano, and P. Georgiou, "A Dual-Sensing Thermo-Chemical ISFET Array for DNA-Based Diagnostics," in *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 477-489, 2020.
- [6] L. Keeble, N. Moser, J. Rodriguez-Manzano and P. Georgiou, "ISFET-Based Sensing and Electric Field Actuation of DNA for On-Chip Detection: A Review," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 19, pp. 11044-11065, 1 Oct.1, 2020.
- [7] A. Al-Ahdal and C. Toumazou, "ISFET-Based Chemical Switch," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 1140-1146, May 2012.
- [8] K. Wang, Y. Liu, C. Toumazou and P. Georgiou, "A TDC based ISFET readout for large-scale chemical sensing systems," 2012 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), Hsinchu, Taiwan, pp. 176-179, 2012.
- [9] G. A. Taylor, C. Parra, H. Carrillo, and A. Mouazen, "A decision framework reference for ISFET sensor-based electronic systems design for agriculture industry applications," 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON), New Delhi, India, pp. 1-6, 2020.
- [10] T. C. Ye, S. F. W. M. Hatta, N. Soin, and A. A. Bakar Sajak, "Modeling and optimization of ISFET microsensor for the use of quality testing in food and pharmaceutical industry," 2021 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 120-123, 2021.
- [11] L. S. O. de Castro, C. A. de Moraes Cruz, V. F. Cardoso, L. L. F. da Silva, M. V. Pelegrini and G. C. Marques, "Improved ISFET Readout Circuit: Characterization and Comparison," 2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Sao Paulo, Brazil, pp. 1-6, 2019.
- [12] F. R. G. Cruz, E. S. R. P. Montealegre, J. C. M. Aranel, D. Jason Hao Paredes, G. R. P. Ramirez and W. -Y. Chung, "ISFET Bridge Type Readout Circuit with Programmable Voltage and Current," *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference, Jeju, Korea (South)*, pp. 2362-2365, 2018.
- [13] W. Chunhua and Z. Yan, "A novel current-mode readout circuit for ISFET sensor," *APCCAS 2008 - 2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Macao*, pp. 407-410, 2008.
- [14] K. Chen, P. Tripathi, N. Moser and P. Georgiou, "A Wide-Range ISFET Readout Circuit with Low-Power Linearity Enhancement," 2023 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Monterey, CA, USA, pp. 1-5, 2023.
- [15] M. Asgari, K. -s. Lee and N. Ida, "Highly linear bridge-based ISFET pH sensor readout circuit," 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Boston, MA, USA, pp. 1049-1052, 2017.
- [16] L. H. Jiao and N. Barakat, "Ion-Sensitive Field Effect Transistor as a pH Sensor," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 12, pp.1-5, 2012.
- [17] A. Yodtean and C. Punyasai, "A design of CMOS Operational Amplifier in TMEC 0.8 μm technology," 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Rai, Thailand, pp. 372-375, 2018.
- [18] W. Bunjongpru, O. Trithaveesak, K. Sowsuwan, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun, and A. Poyai, "CMOS compatible Ion Sensitive Field Effect Transistor with Silicon Nitride Membrane for pH Measurement System," *ECTI-CON 2007 The 2007 ECTI International Conference*, pp. 29-31, 2007.

TABLE II. COMPARISON OF THE PROPOSED DESIGN WITH PREVIOUS ISFET READOUT CIRCUITS.

Ref.	Mode	Number of ABB	R+C	Rang of V_{ref}	Sensitivity (mV/pH)	Linearity (R^2)
[11] Fig.6	VM	2 OPAMP	8+2	40/0.8	-48.087	0.9906
[11] Fig.7	VM	3 MOS	0+0	0.8-1.1V	107.101	0.9884
[11] Fig.8	VM	1 OPAMP & 1 MOS	0+0	0.8-1.1V	117.800	0.9944
[11] Fig.9	VM	1 OPAMP & 2 MOS	0+0	1.1-2.2V	201.736	0.9991
[12]	VM	2 OPAMP & 7 MOS	13+2	0.2-0.4V	77.993	0.9991
[13]	CM	2 CCII & 1 MOS	0+0	1.5V	22.7 $\mu\text{A/pH}$	-
[14]	VM	28 MOS	0+0	0-1.8V	59	0.997
[15]	VM	1 OPAMP & 4 MOS	0+0	-	-37	-
This Work	VM	8 MOS	1+0	0.6-3.1V	38.3	0.9994

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นิรมล สายหวาน
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียน สาธิตมหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2563 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ) สาขา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผลงานตีพิมพ์	Niramol Saywan, Apiradee Yodtean, Phamorn Silapan and Yuttana Jewajinda, "A Wide Range and Highly Linear ISFET Readout Circuit," 2025 4th International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), Dhaka, Bangladesh, January 11-12, 2025

