



รายงานฉบับสมบูรณ์

Final Report

วงจรเชื่อมต่อสำหรับเซ็นเซอร์ ISFET ใช้กำลังงานต่ำ
Low-Power ISFET Sensor Interface Circuit

RCH
TK

4844.054
๑๒๕๔๖

รศ. ดร. อภินันท์ ธนชยานนท์ (Assoc. Prof. Dr. Apinunt Thanachayanont)
รศ. ดร. ศิลา ศิริมาสกุล (Acting SUB LT. Silar Sirimasakul)

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 116965
ปี 21 ส.อ. 2554

ห้องปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์
สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ธันวาคม พ.ศ. 2551

Microelectronic Device R&D Laboratory
Research Center for Communications and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

December 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b. 12630 595
i.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (Research Center for Communications and Information Technology: ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 วงเงินงบประมาณ 50,000 บาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษา วิจัยออกแบบ และพัฒนาวงจรรวมอนาลอกโดยการใช้งาน ด้วยเทคโนโลยีซีมอสที่ใช้แรงดันต่ำสำหรับส่วนหน้า (Analog Front-end) ของวงจรถ่ายทอดสำหรับเซ็นเซอร์ ISFET ที่ใช้กำลังงานต่ำ เนื่องจาก ISFET เซ็นเซอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้มากมายและสามารถผลิตได้ภายในประเทศ แต่การนำมาใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีวงจรรอ่านค่า ISFET ซึ่งวงจรรอ่านค่านี้มีขนาดใหญ่และใช้กำลังงานมากไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีการพกพาไปใช้งานในที่ต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและออกแบบวงจรรวมที่ใช้ร่วมกับ ISFET เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานในที่ต่าง ๆ และใช้กำลังงานต่ำเพื่อเป็นการประหยัดกำลังงานให้ใช้ได้ยาวนานขึ้น โดยวงจรรอ่านค่า ISFET นี้สามารถสร้างร่วมกับ ISFET ได้ภายในแผ่นเวเฟอร์เดียวกันจึงทำให้มีความสะดวกมากขึ้นสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยในการออกแบบอาศัยคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Cadence Spectre™ 0.35 μm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษา วิจัยออกแบบ และพัฒนาวงจรรวมอนาล็อกโดยการใช้งานด้วยเทคโนโลยีซีมอสที่ใช้แรงดันต่ำสำหรับส่วนหน้า (Analog Front-end) ของวงจรเชื่อมต่อสำหรับเซ็นเซอร์ ISFET ที่ใช้กำลังงานต่ำ เนื่องจาก ISFET เซ็นเซอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้มากมายและสามารถผลิตได้ภายในประเทศ แต่การนำมาใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีวงจรรอ่านค่า ISFET ซึ่งวงจรรอ่านค่านี้มีขนาดใหญ่และใช้กำลังงานมากไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีการพกพาไปใช้งานในที่ต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและออกแบบวงจรรวมที่ใช้ร่วมกับ ISFET เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานในที่ต่าง ๆ และใช้กำลังงานต่ำเพื่อเป็นการประหยัดกำลังงานให้ใช้ได้ยาวนานขึ้น โดยวงจรรอ่านค่า ISFET นี้สามารถสร้างร่วมกับ ISFET ได้ภายในแผ่นเวเฟอร์เดียวกันจึงทำให้มีความสะดวกมากขึ้นสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยในการออกแบบอาศัยคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Cadence Spectre™ 0.35 μm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

The propose of this project is concerned with the design and implementation of low-voltage CMOS analog front-end for Low-Power ISFET Sensor Interface Circuit. ISFET sensor is designed and simulated by using Cadence Spectre with process parameters from a 0.35- μ m CMOS process.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทสรุปย่อ	II
บทคัดย่อ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของ Ion-Sensitive Field-Effect Transistor (ISFET) Sensor	2
บทที่ 3 วงจรเชื่อมต่อสำหรับเซ็นเซอร์ ISFET ใช้กำลังงานต่ำ.....	10
บทที่ 4 เอกสารอ้างอิง	14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

HTML	Hyper Text Markup Language
HTML	Hyper Text Markup Language
HTML	Hyper Text Markup Language
HTML	Hyper Text Markup Language
σ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ความสำเร็จเมื่อเร็ว ๆ นี้ของ Ion-Sensitive Field-Effect Transistor (ISFET) คือสามารถสร้างด้วยเทคโนโลยี CMOS [1] มีความพยายามอย่างมากที่จะหาวิธีการรวมเอา ISFET-based chemical, biochemical sensor และ วงจรประมวลผลสัญญาณ CMOS รวมเข้าด้วยกันไว้ในชิพเพียงตัวเดียว [2] นอกจากนี้ subthreshold region มีการแสดงให้เห็นถึงการดำรงอยู่ใน CMOS-compatible ISFET และมีพฤติกรรมเหมือนกับ translinear principle ของ weak-inversion MOSFETs ทำให้มีความเป็นไปได้สำหรับ วงจรอ่านค่าที่เป็น ultra low-power current-mode [3] ดังนั้น single-chip smart sensor สุดท้ายสิ้นเปลืองกำลังงานต่ำมีความเป็นไปได้มากสำหรับ real-time biochemical sensing สำหรับ implantable biomedical systems



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีของ Ion-Sensitive Field-Effect Transistor (ISFET) Sensor

ความเจริญก้าวหน้าทางด้าน IT สร้างความต้องการเซนเซอร์หลายชนิดสำหรับทำให้เครื่องจักรทำงานอัตโนมัติตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมและมนุษย์ เซนเซอร์เป็นทางเลือกสำหรับปัญหาการตรวจจับแสง แรงและเสียงเนื่องจากราคาไม่แพงและหาได้ง่าย สิ่งที่จะทำให้การใช้งานเซนเซอร์มีต้นทุนต่ำลงนั้นก็คือนำเซนเซอร์ตัวเดี่ยว ๆ มาใช้งานกับคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เลย ซึ่งนั่นก็หมายความว่าในตัวเซนเซอร์จะต้องมีการแปลงสัญญาณที่ทำการตรวจวัดมาเป็นสัญญาณดิจิทัล ที่พร้อมจะนำไปใช้งานได้เลย ซึ่งเทคโนโลยีนี้คือ MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) ซึ่งเป็นกรวม ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องจักร, เซนเซอร์, เครื่องกระตุ้น และอิเล็กทรอนิกส์ รวมอยู่บนฐานรองซิลิกอนด้วยเทคโนโลยีระดับไมโคร เซนเซอร์ที่สร้างด้วยเทคโนโลยี MEMS มีมากมายเช่น เซนเซอร์วัดความดัน, แมกนีติก เซนเซอร์, เซนเซอร์วัดค่า pH, ไฟโต ดีเทคเตอร์, เซนเซอร์วัดความเค้น, เคมี เซนเซอร์ ฯลฯ

Ion-Sensitive Field-Effect Transistor (ISFET) ก็เป็นเซ็นเซอร์อีกชนิดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้มากมายและสามารถผลิตได้ภายในประเทศ แต่การนำมาใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีวงจรรอ่านค่า ISFET ซึ่งวงจรรอ่านค่านี้มีขนาดใหญ่และใช้กำลังงานมากไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีการพกพาไปใช้งานในที่ต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและออกแบบวงจรรวมที่ใช้ร่วมกับ ISFET เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานในที่ต่าง ๆ และใช้กำลังงานต่ำเพื่อเป็นการประหยัดกำลังงานให้ใช้ได้ยาวนาน โดยวงจรรอ่านค่า ISFET นี้สามารถสร้างร่วมกับ ISFET ได้ภายในแผ่นเวเฟอร์เดียวกันจึงทำให้มีความสะดวกมากขึ้นสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งาน

ISFET ค้นพบครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Piet Berveld ใน คศ. 1970[4] เป็นการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) โดยการลอกชั้นฟิล์มเกตโลหะออกให้ขั้วเกตสัมผัสกับสารละลาย พบว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแต่ละชนิด ด้วยปรากฏการณ์ดังกล่าวปัจจุบันจึงใช้อุปกรณ์ ISFET เป็นหัววัดความเป็นกรด-เบส แบบ ISFET

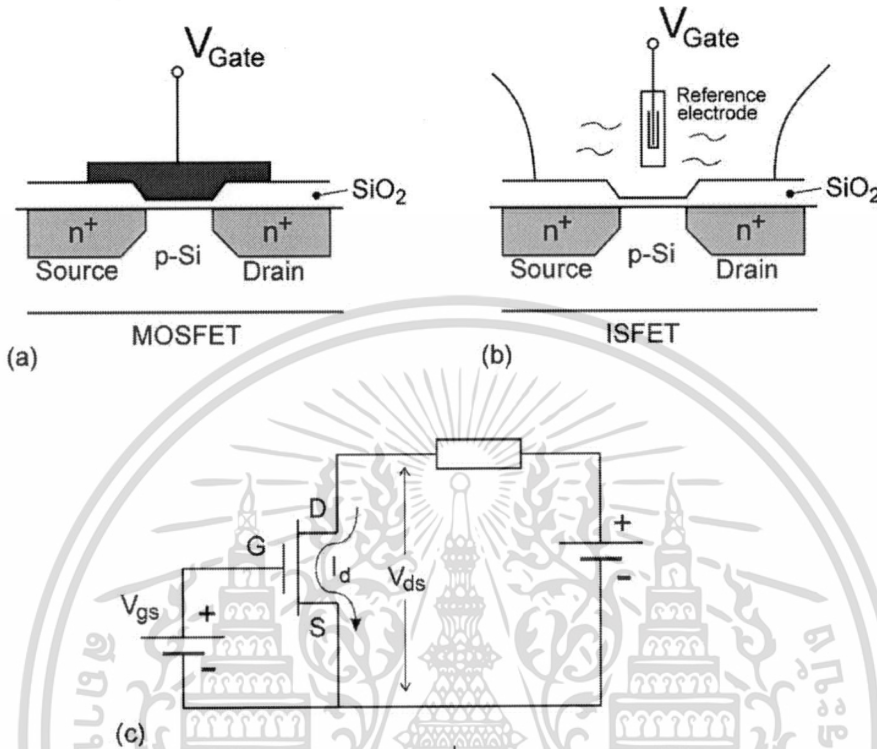
ข้อได้เปรียบของหัววัดค่าความเป็นกรด-เบสแบบ ISFET

1. ใช้เทคโนโลยีในการผลิตแบบเดียวกับ CMOS จึงสามารถทำได้ทีละจำนวนมากและสามารถผลิตรวมเข้ากับตัวตรวจจับชนิดต่าง ๆ ได้ง่าย
2. มีขนาดเล็กมาก 1 mm^2
3. มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง pH ที่รวดเร็ว
4. ทนทานต่อการวัดในสภาวะความดันและอุณหภูมิสูง (-15 ถึง 130 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาและเก็บรักษาไว้ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อายุการทำงานยาวนานกว่าหัววัดแบบกระเปาะแก้ว

2.1 The ISFET concept



รูปที่ 1

จากรูปที่ 1 [5] แสดงความเหมือนและความแตกต่างระหว่าง MOSFET และ ISFET เกตโลหะของ MOSFET จากรูปที่ 1 (a) ทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง ในรูปที่ 1 (b) เป็นของเหลวที่ขั้วเชื่อมต่อกับ bare gate insulator อุปกรณ์ทั้งสองมีวงจรการเชื่อมต่อดังรูปที่ 1 (c) ส่วนที่แตกต่างอีกคือ MOSFET สามารถห่อหุ้มได้เรียบร้อย ส่วน ISFET ซอสและเดรน ถูกห่อหุ้มส่วนพื้นที่ของเกตเปิดสำหรับเชื่อมต่อกับของเหลว สำหรับอุปกรณ์ทั้งสองมีสมการในช่วง non-saturated : [6]

$$I_d = \beta (V_{gs} - V_T - \frac{1}{2} V_{ds}) V_{ds} \quad (1)$$

ซึ่ง β คือพารามิเตอร์คงที่

$$\beta = \mu C_{ox} W/L \quad (2)$$

μ คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนใน inversion layer

C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าของ gate insulator ต่อหน่วยพื้นที่

W/L คืออัตราส่วนของความกว้างและความยาวของ channel

$$\text{Threshold Voltage } (V_T) = V_{FB} - \frac{Q_B}{C_{ox}} + 2\phi_F \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า V_{FB} คือ flatband voltage
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q_B คือ depletion charge ในซิลิกอน

ϕ_F คือ Fermi-potential

$$V_{BF} = \frac{\Phi_M - \Phi_{si}}{q} - \frac{Q_{ss} + Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (4)$$

Φ_{si} คือ silicon work function

Φ_M คือ work function of gate metal

Q_{ss} คือ surface state density at the silicon surface

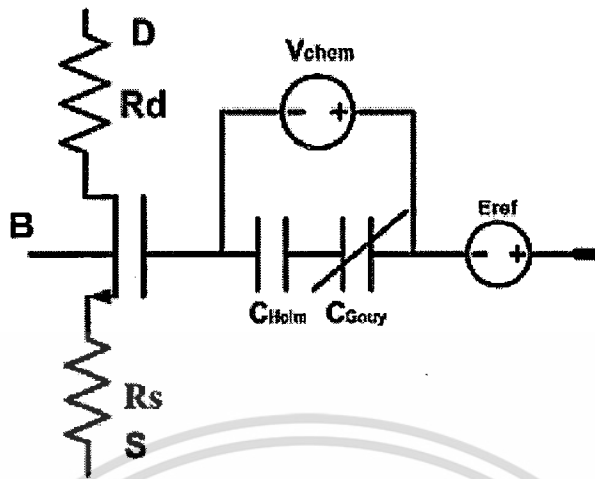
Q_{ox} คือ fixed oxide charge

จากสมการที่ (3) และ (4) สามารถกำหนด threshold voltage ของ MOSFET ได้โดยคุณสมบัติของวัสดุ เช่น work function และประจุสะสม สำหรับการดำเนินงานของ MOSFET แบบ stable กำหนดให้ threshold voltage ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดที่ MOS process เช่น ion implantation สมการที่ (1) แสดง drain current เป็นฟังก์ชันของ gate voltage ใช้ drain-source voltage คงที่

ในกรณีของ ISFET แรงดันที่เกิดเป็นแรงดันที่ขั้วอ้างอิง โดยปกติ 0 โวลต์ แต่ threshold voltage จำกัดด้วยหลายเทอมซึ่งเชื่อมต่อระหว่างของเหลวและ gate oxide เทอมสุดท้ายเป็นความต่างศักย์ขั้วอ้างอิงเกี่ยวข้องกับ vacuum E_{ref} ซึ่งประกอบด้วย Φ_M ความต่างศักย์ที่ gate oxide – electrolyte เป็นการกำหนดโดย surface dipole potential of the solution χ_{sol} ซึ่งเป็นค่าคงที่และ surface potential ψ_0 ซึ่งผลจากการกระทำทางเคมี โดยปกติบังคับโดย การแยกออกของ oxide surface groups สมการสำหรับ flatband voltage ของ ISFET คือ

$$V_{FB} = E_{ref} - \psi_0 + \chi_{sol} - \frac{\Phi_{si}}{q} - \frac{Q_{ss} + Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (5)$$

เพราะว่าทุกเทอมเป็นค่าคงที่เว้นแต่ ψ_0 เป็นเทอมซึ่งทำ ISFET sensitive ต่อ electrolyte pH ซึ่งควบคุมการแยกตัวของ oxide surface groups การออกแบบ ISFET ให้ sensitive ต่อ pH กับ maximum sensitivity และ selectivity เป็นความจำเป็น นอกจากนั้นต้องศึกษารายละเอียดของ oxide-electrolyte interface ในชั้นความสามารถของ oxide



รูปที่ 2. ส่วนประกอบแบบจำลอง ISFET

ISFET สามารถแสดงได้โดยแบบจำลองในรูปที่ 2. [7] ซึ่งประกอบด้วยส่วนเคมี และส่วนมอสทรานซิสเตอร์ ในส่วนเคมี, ตัวเก็บประจุสองตัวที่อนุกรม C_{Helm} และ C_{Gouy} มีค่าเท่ากับ Gouy-Chapman และ Helmholtz capacitance ซึ่งมีอยู่แล้วโดยทฤษฎี site-binding และทฤษฎี electrical double-layer แหล่งจ่ายแรงดัน E_{Ref} และ V_{chem} เป็นการต่อตามลำดับใช้แทนส่วนประกอบแรงดันของแรงดันขั้วเริ่มเคมีของ ISFET ใน (5) V_{chem} ประกอบด้วยสองความต่างศักย์ $-\psi_{eo} + \chi^{sol}$ ซึ่ง χ^{sol} เป็นค่าคงที่เกี่ยวข้อกับค่า pH และ ψ_{eo} เป็นตัวแปรเพียงตัวเดียวที่รับผิดชอบสำหรับความไว ISFET pH

ความไว pH ของ ψ_{eo} ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลาย $\frac{\partial \psi_{eo}}{\partial pH}$, มีมาแล้วโดยทฤษฎีของ Hal และ Eijkel มีรายละเอียดใช้ยอมรับทั่วไป แบบจำลอง site-binding และแบบจำลอง Gouy-Chapman-Stern ตรงกับ

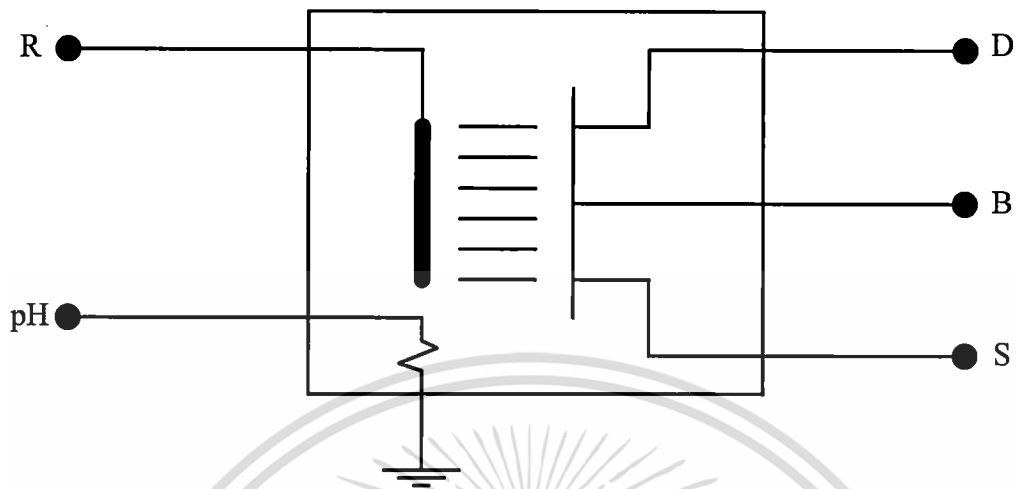
$$\frac{\partial \psi_{eo}}{\partial pH} = -2.303 \frac{kT}{q} \alpha \quad (6)$$

เมื่อ α เป็นตัวแปรความไวที่ไม่มีขนาดซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 โดยรวม (6) ψ_{eo} สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\psi_{eo} = -2.303 \frac{kT}{q} \alpha \cdot pH + C \quad (7)$$

ซึ่ง C เป็นค่าคงที่

2.2 ISFET macromodel

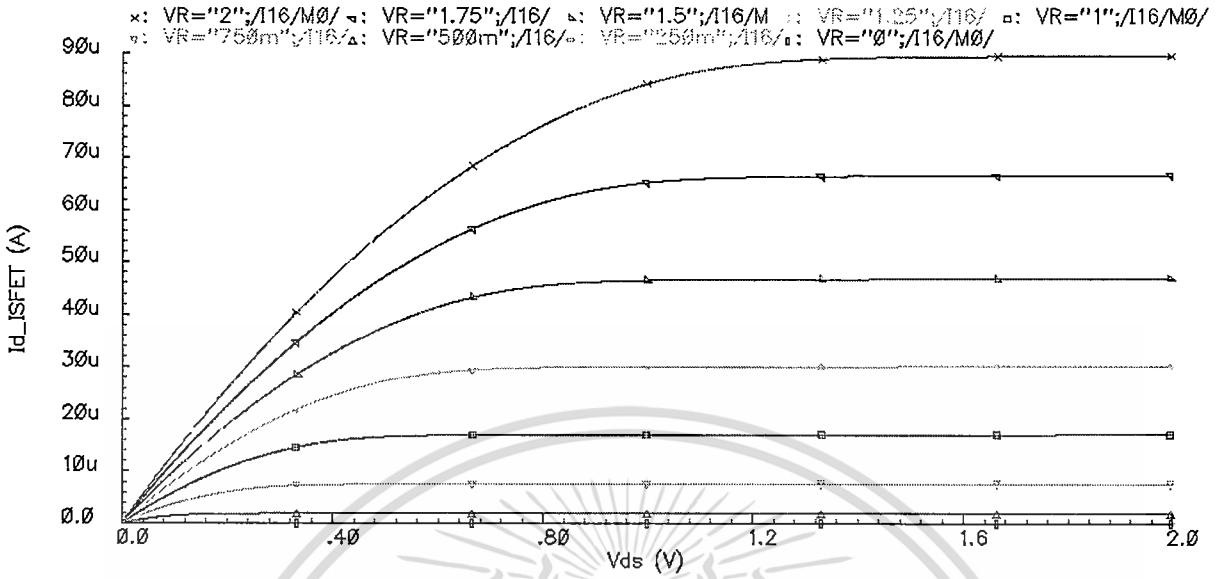


รูปที่ 3 ISFET macromodel

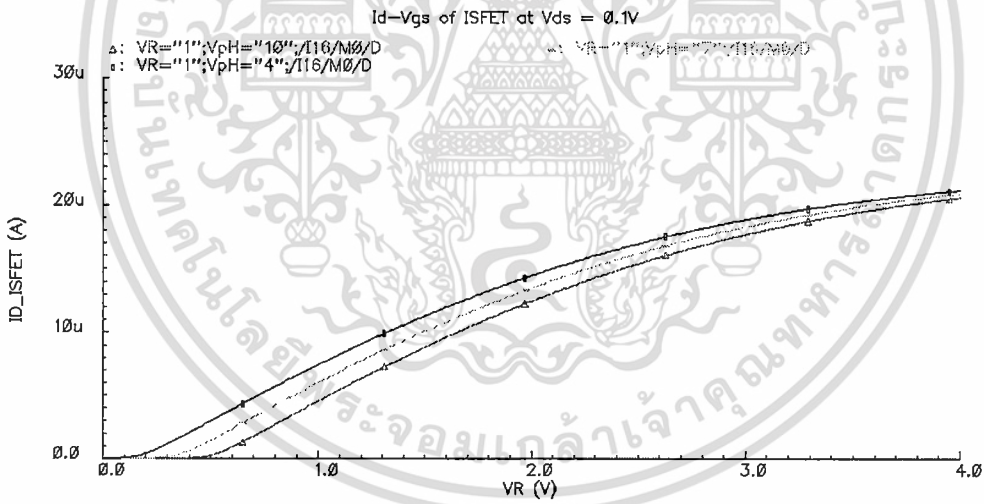
สำหรับ แบบจำลองของ ISFET ที่ได้สร้างใน โปรแกรม cadence แสดงในรูปที่ 3 [8] ซึ่งจุดเชื่อมต่อ R คือ reference electrode, D คือ drain, S คือ source, B คือ bulk และ pH คือค่า pH ของสารละลาย ที่ต้องการทำการวัด

ผลการทดลองของ ISFET macromodel แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงคุณสมบัติ $I_d - V_{ds}$ ของ ISFET ที่แรงดัน V_R ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 – 2 V โดยเปลี่ยนแปลงทีละ 0.25 V โดยบ่อนแรงดัน V_{ds} ตั้งแต่ 0 – 2 V และกำหนดให้แรงดันที่ ขั้ว pH มีค่าเท่ากับ pH7 คือ 7 V รูปที่ 5 (ก) – (ค) แสดงคุณสมบัติ $I_d - V_{gs}$ ของ ISFET ที่ V_{ds} เท่ากับ 0.1 V, 0.3 V และ 0.5 V ตามลำดับ รูปที่ 6 แสดงคุณสมบัติ $I_d - V_{pH}$ ของ ISFET ที่แรงดัน V_R ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 – 1.4 V เปลี่ยนแปลงทีละ 0.2 V และใช้ $V_{ds} = 0.3$ V ซึ่งจากกราฟ จะเห็นได้ว่า ที่แรงดัน $V_R = 1$ V เป็นค่าของแรงดันที่น้อยที่สุดที่ยังคงให้กระแสเดรนของ ISFET มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ และรูปที่ 7 แสดงคุณสมบัติ $I_d - V_{pH}$ ของ ISFET ที่ $V_{ds} = 0.3$ V และ $V_R = 1$ V จากกราฟ สามารถหาค่า sensitivity ได้เท่ากับ $-1.39 \mu A/pH$

Id-Vds of ISFET at pH7

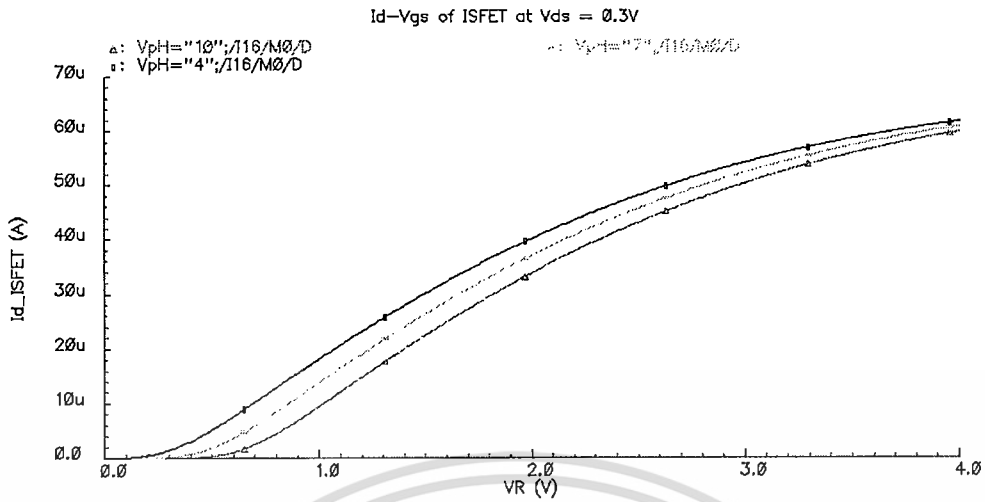


รูปที่ 4 แสดงคุณสมบัติ Id - Vds ของ ISFET ที่ pH7

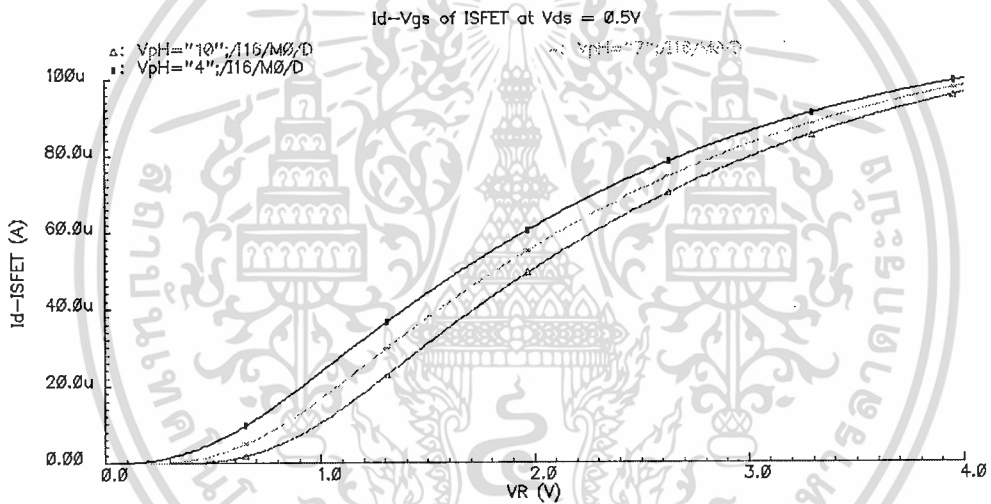


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

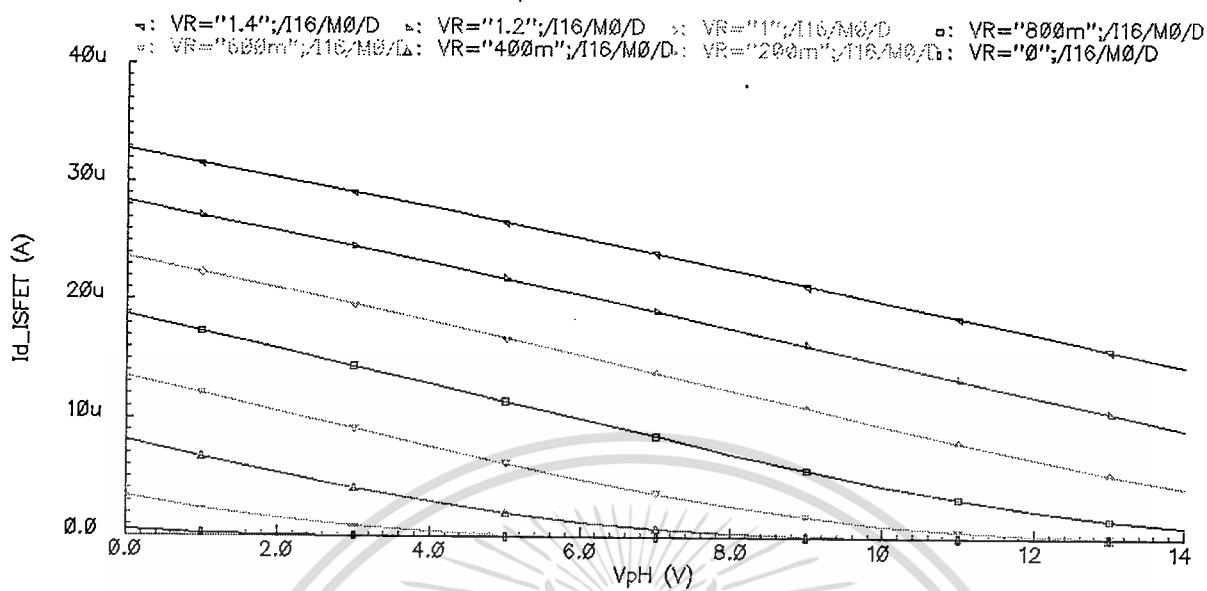


(ค)

รูปที่ 5. แสดงคุณสมบัติ Id - Vgs ของ ISFET (ก) Vds = 0.1 V, (ข) Vds = 0.3 V และ (ค) Vds = 0.5 V

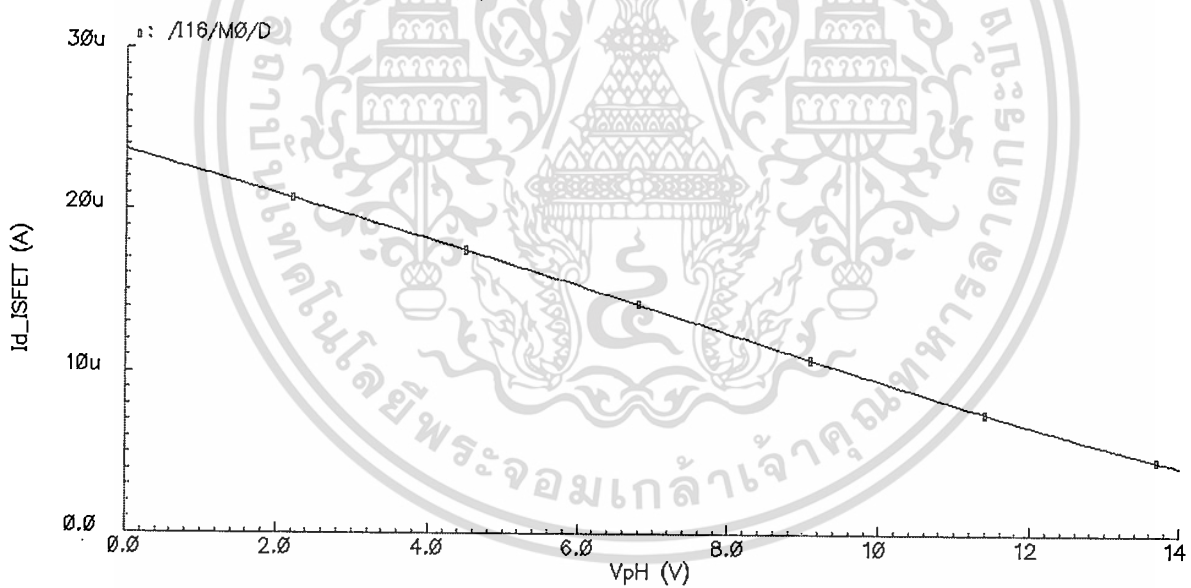
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Id-VpH of ISFET at Vds=0.3V



รูปที่ 6 แสดงคุณสมบัติ Id - VpH ของ ISFET ที่ Vds = 0.3 V

Id-VpH of ISFET at Vds=0.3V,VR=1V



รูปที่ 7 แสดงคุณสมบัติ Id - VpH ของ ISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{D,ISFET} = 2I_O \cdot \frac{e^{(-2.3\alpha U_T \Delta pH/nU_T)}}{1 + e^{(-2.3\alpha U_T \Delta pH/nU_T)}} \quad (8)$$

$$i_{D,REFET} = 2I_O - i_{D,ISFET} = 2I_O \cdot \frac{1}{1 + e^{(-2.3\alpha U_T \Delta pH/nU_T)}} \quad (9)$$

เมื่อ I_O เป็นกระแสเดรนคงที่ของ ISFET และ REFET ที่ pH อ้างอิง (pH = 7), α คือ dimensionless sensitivity parameter of ISFET, $U_T = kT/q$ คือ thermal voltage, n คือ subthreshold slope parameter และ ΔpH คือ ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงค่า pH ดังนั้น $i_{D,ISFET}$ เท่ากับ $2I_O$ และ $i_{D,REFET}$ เป็นศูนย์สำหรับ ค่า ΔpH เป็นลบมาก ๆ และมีผลตรงกันข้ามกันสำหรับค่า ΔpH เป็นบวกมาก ๆ นี่เป็นไปในทำนองเดียวกันกับของ conventional MOSFET differential pair

ส่วนที่เกี่ยวข้องกับ translinear principle ของ M1-M4, กระแสเอาต์พุต I_{OUT} สามารถคำนวณได้ในสมการที่ (10) กระแส I_{OUT} สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังสมการที่ (11) และ(12) โดยที่ $\Delta pH = -\log_{10} \Delta[H^+]$, เมื่อ $\Delta[H^+]$ เป็นการเปลี่ยนแปลงใน hydrogen ion concentration โดยที่ $0 < \alpha > 1$ และ $n > 1$ โดย α/n มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 เพราะฉะนั้นถ้า ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง I_{OUT} และ $\Delta[H^+]$ เป็นไปตามต้องการ I_{OUT} สามารถถือว่าเกี่ยวข้องกับ translinear circuit

$$i_{OUT} = \frac{i_{D1} \cdot i_{D2}}{i_{D3}} = \frac{i_{D,ISFET} \cdot I_O}{i_{D,REFET}} = I_O \cdot e^{(-2.3\alpha U_T \Delta pH/nU_T)} \quad (10)$$

$$i_{OUT} = I_O \cdot \Delta[H^+]^{\alpha/n} \quad (11)$$

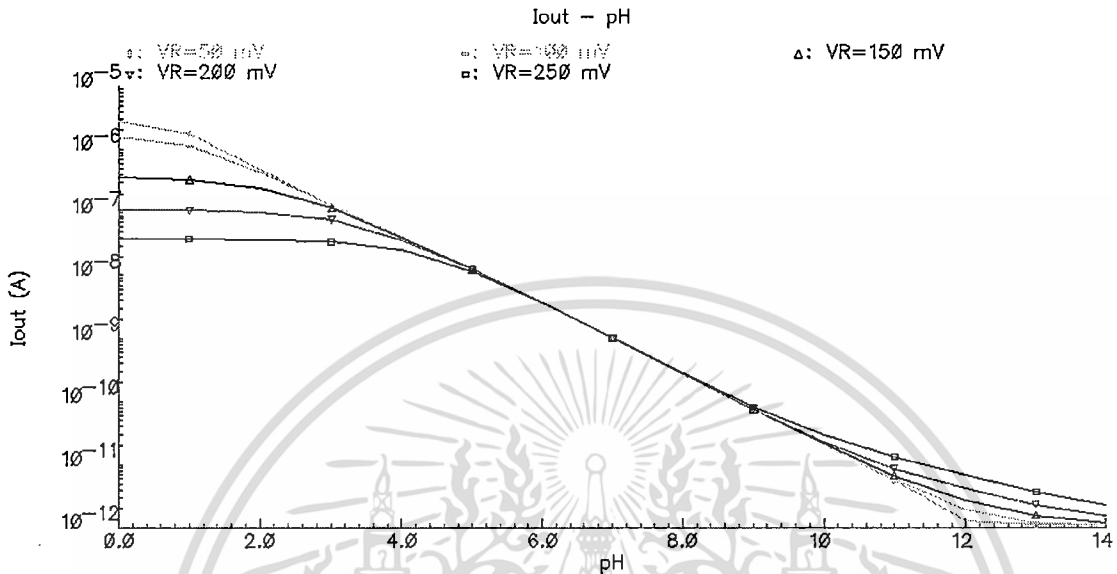
$$\log_{10} i_{OUT} = \log_{10} I_O - \frac{\alpha}{n} \Delta pH \quad (12)$$

สมมติให้อุปกรณ์ทุกตัวอยู่ใกล้กันและอุณหภูมิเหมาะสม อัตราส่วนความสัมพันธ์ของ translinear principle ช่วยลด temperature dependence ของวงจรและ พร้อมกับ ISFET/REFET differential topology, body effects ของ MOSFETs, ISFET และ REFET สามารถกำจัดออกเนื่องจากมีค่าเพียงเล็กน้อยจากทฤษฎี [9] ใช้ UTAT (proportional-to-absolute temperature) current source I_O และสมมติให้ α และ n เป็น temperature-independent parameter กำหนดให้เป็น first-order, i_{OUT} ที่ได้ก็จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

3.1 ผลการทดลอง

วงจรอ่านค่า ISFET ต้องการออกแบบให้ทำงานที่แรงดันแหล่งจ่าย 1 โวลต์ ISFET และ REFET จำลองโดย behavioral macromodel described ใน [10] และวงจรจำลองการทำงานโดย Cadence และใช้เทคโนโลยี CMOS 0.35 μm . MOSFETs ทุกตัวมีขนาด 5 $\mu m/2 \mu m$, ISFET และ REFET มีขนาด 100 $\mu m/10 \mu m$ ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสม แหล่งจ่ายกระแส DC ทำให้เป็นจริงโดย simple current mirrors โดยมีความกว้างช่องสัญญาณขนาดใหญ่สำหรับความแม่นยำที่ดีและความต้านทานเอาต์พุตมาก มี α/n เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเท่ากับ 0.7, I_o มีค่าเท่ากับ 1 nA และ V_{ref} มีค่าเป็น 200 mV กระแสไบอัสและแรงดันทั้งหมดเลือกที่ตรงกลางที่วงจรถ่ายงานที่ pH อ้างอิงคือ pH7 วงจรสิ้นเปลืองกำลังงาน 4 nW

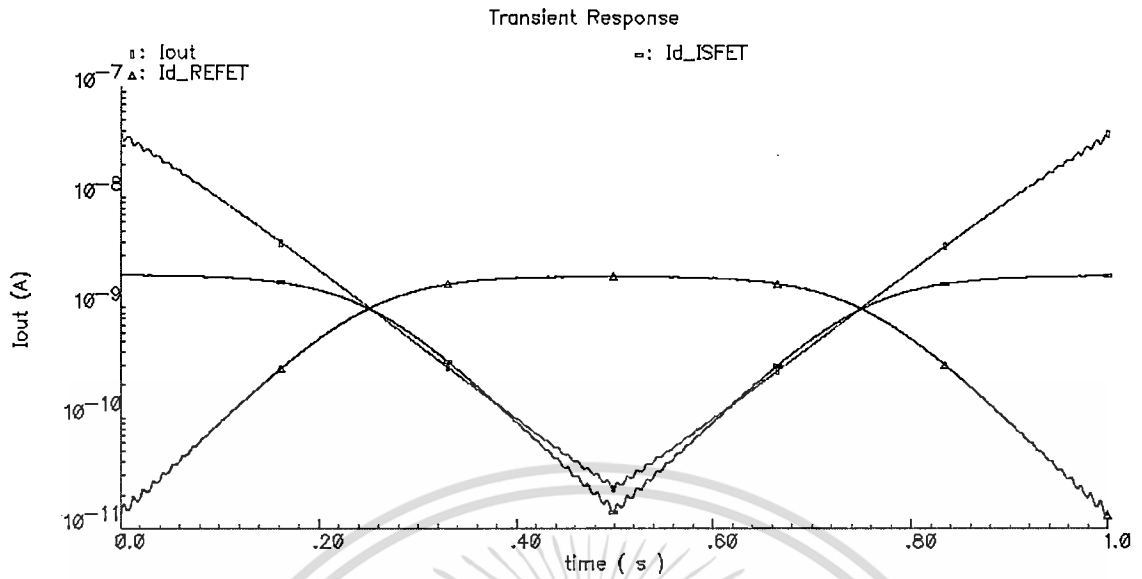


รูปที่ 9 Simulated i_{OUT} vs. pH at different values of V_{REF} .

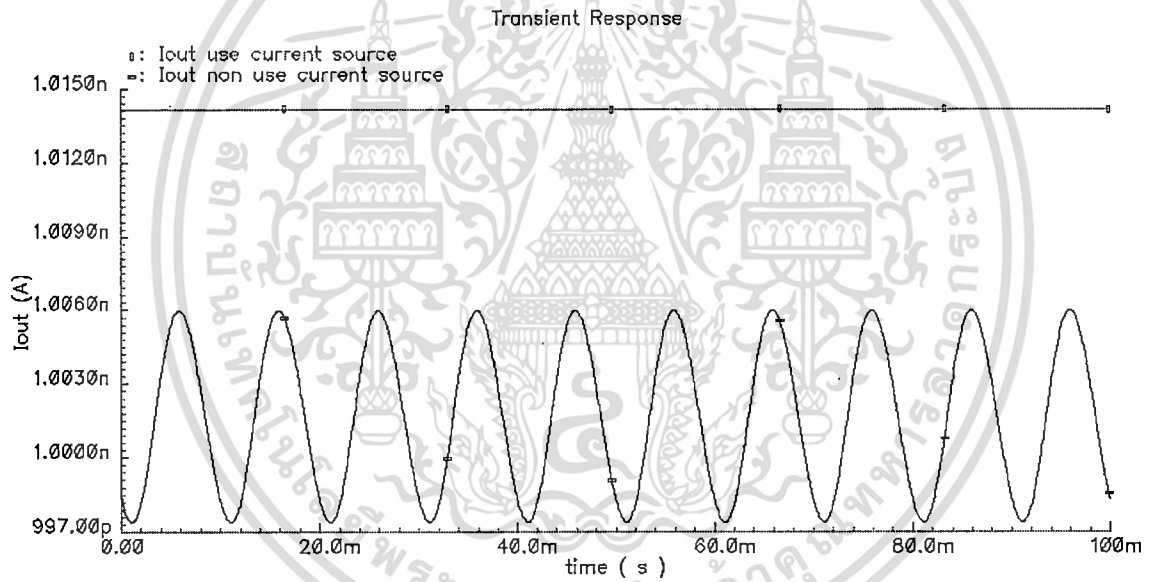
รูปที่ 9 พล็อต i_{OUT} กับ pH ที่ค่า V_{ref} ค่าต่าง ๆ ที่ค่า $V_{re} = 200$ mV มีความเป็นเชิงเส้นดีที่สุดสำหรับช่วงค่า pH4 - pH10 มีการกำหนดให้ ISFET มีการทำงานในช่วง weak-inversion [3] ซึ่งมีความกว้างของกระแสเดรอน 3-5 decades รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันขนาดใหญ่มากกว่า 200 mV ใน V_{ref} ที่เหมือนกับไม่มีผลกระทบต่อ i_{OUT} ในช่วง pH5 – pH9 ดังนั้นที่ค่า pH ต่ำ ๆ และ ค่า pH สูง ๆ จะปรากฏการแกว่งไปมาของ i_{OUT} ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ISFET/REFET differential pair อยู่ใน saturate ซึ่ง $i_{D,ISFET}$ หรือ $i_{D,REFET}$ อย่างใดอย่างหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์

รูปที่ 10 พล็อต transient response ของ $i_{D,ISFET}$, $i_{D,REFET}$ และ i_{OUT} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตพุทที่ใช้แทนค่า pH มีค่าอยู่ระหว่าง 4 และ 10 ไปยัง ISFET/REFET pair มีการใส่สัญญาณรบกวนขนาด 20 mV, 100 Hz ไปยัง common reference electrode V_{REF} กระแสทั้งหมดเป็นอิสระจาก common-mode disturbance นอกจากในย่าน pH ที่น้อยกว่า pH5 และ มากกว่า pH9 เห็นได้ชัดถึงผลกระทบในค่า pH ต่ำ ๆ และค่า pH สูง ๆ เนื่องจาก ISFET/REFET differential เป็น saturate รูปที่ 4 พล็อต transient response ของ i_{OUT} (ที่ pH = 7) ของวงจรถ่ายโดยใช้ และไม่ใช้ the tail current source เมื่อมีการใส่สัญญาณรบกวนขนาด 20 mV 100 Hz ไปยัง reference electrode ซึ่งเมื่อมีการใช้ the tail current source i_{OUT} มีค่าคงที่โดยเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 10 pA ต้องการแสดงให้เห็นเมื่อไม่มี the tail current source รูปที่ 10 และ รูปที่ 11 แสดงให้เห็นการกำจัด common-mode ที่ดีกว่าของวงจรถ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 Simulated transient response due to changes in pH.



รูปที่ 11 Simulated i_{OUT} with and without the tail current source.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bausells, J., Carrabina, J., Errachid, A., and Merlos, A., "Ion-sensitive field-effect transistors fabricated in a commercial CMOS technology," *Sens. Actuators B. Chem.*, 1999, 57, pp. 56-62.
- [2] Hammond, P. A., Ali, D., and Cumming, D. R. S., Design of a single-chip pH sensor using conventional 0.6- μ m CMOS process," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 4, no. 6, Dec. 2004, pp. 706-712.
- [3] Shepherd, L. and Toumazou, C., "Weak inversion ISFETs for ultra-low power biochemical sensing and real-time analysis," *Sens. Actuators B. Chem.*, 2005, 107, pp. 468-473.
- [4] P. Bergveld, "Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements", *IEEE Trans, Biomed Eng, BME-17*, January, 1970, pp.70-71.
- [5] P. Bergveld, "Thirty years of ISFET - what happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years", *Sensors and Actuators, B 88*, 2003, pp. 1-20.
- [6] P. Bergveld, "ISFET, theory and practice", in *IEEE Int. Conf. Sens.*, Toronto, Canada, October, 2003, pp.1-26.
- [7] P.K. Chan and D.Y. Chen, "A CMOS ISFET Interface Circuit With Dynamic Current Temperature Compensation Technique", *IEEE transactions on circuits and systems*, regular paper, VOL. 54, NO. 1, January, 2007, pp. 119-129.
- [8] S. Martinoia and G. Massobrio, "A behavioral macromodel of the ISFET in SPICE", *Sensors and Actuators, B 62*, 2000, pp. 182-189.
- [9] Shepherd, L. and Toumazou, C., "A biochemical translinear principle with weak inversion ISFETs," *IEEE Trans. Circuits Syst. – I*, 52 (12), Dec. 2005, pp. 2614-2619.
- [10] Martinoia, S. and Massobrio, G., "A behavioral macromodel of the ISFET in SPICE," *Sens. Actuators B. Chem.*, 2000, 62, pp. 182-189.