

การศึกษาคณะสมบัติของตัวตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างแบบโครงสร้างอ็ิสเฟต
ที่มีฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นเมมเบรน

STUDY ON CHARACTERISTICS OF ISFET pH-SENSOR
WITH SILICON NITRIDE

อวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ
AWIRUT SRISUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-043-156

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างแบบโครงสร้างอ็ิสเฟท
ที่มีฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์เป็นเมมเบรน

STUDY ON CHARACTERISTICS OF ISFET pH-SENSOR
WITH SILICON NITRIDE

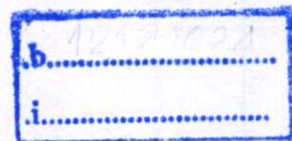


T105537

อวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ

AWIRUT SRISUWAN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105537
วัน,เดือน,ปี..... 26 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-043-156

**STUDY ON CHARACTERISTICS OF ISFET pH-SENSOR
WITH SILICON NITRIDE**

AWIRUT SRISUWAN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-043-156

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างแบบโครงสร้างอ็ิสเพทที่มีฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์เป็นเมมเบรน

Thesis Title Study on Characteristics of ISFET pH-Sensor with Silicon Nitride

นักศึกษา นายอวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ

รหัสประจำตัว 50061309

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-043-156

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ ศุกเดช	ศุกเดช	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	เนียมเจริญ	
ดร.โยธิน วงศ์ประเสริฐ	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร โพธิ์ไธ	โพธิ์ไธ	
รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง	จูติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 2 ห้องประชุม 6

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ 28 เดือน ต.ค. พ.ศ. 2552
ลงชื่อ 

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างแบบ โครงสร้างออสเฟทที่มีฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์เป็นเมมเบรน
นักศึกษา	นายอวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ
รหัสประจำตัว	50061309
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การสร้างและศึกษาคุณสมบัติตัวตรวจวัดความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้โครงสร้างออสเฟทที่มีฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ซึ่งสร้างด้วยเทคนิค LPCVD เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน เมื่อสร้างตัวตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างโครงสร้างออสเฟทบนแผ่นฐานรองซิลิกอนเวเฟอร์ชนิดพี ระนาบ (100) สภาพต้านทานไฟฟ้า $5 \Omega\text{-cm}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว โดยมีฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์หนา 30 nm เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน โดยมีขนาดความกว้างแขนแนล (W) 500, 2000 และ 4000 μm ส่วนความยาว (L) เท่ากับ 5 μm พบว่าแรงดันจลเริ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า pH ของสารละลายตัวอย่าง เมื่อความกว้างแขนแนลเท่ากับ 4000 μm หัวตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง สามารถตอบสนองช่วงค่า pH 1-13 ได้ดี และที่อุณหภูมิ 25 °C มีการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 47.48-48.35 mV/pH อัตราการครีฟท์ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ 0.162 mV/hr ค่าฮิสเตอร์รีซิสในสารละลายตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 1.052 mV เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 1 วินาที นอกจากนี้ผลการทดลองยังได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ที่อุณหภูมิเท่ากับ 25, 35, 45 และ 55 °C ได้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิอยู่ในช่วง -2.15 ถึง -1.29 mV/°C และได้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 0.322 mV/pH°C

Thesis Title	Study on characteristics of ISFET pH-sensor with silicon nitride
Student	Mr. Awirut Srisuwan
Student ID.	50061309
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

The thesis presents the fabrication and characteristics of pH-ISFETs with LPCVD silicon nitride (Si_3N_4) as an ion sensing membrane. The 30-nm Si_3N_4 sensing gate pH-ISFETs were fabricated on 6-inch p-type silicon (100) with resistivity of $5 \Omega\text{-cm}$. The channel width (W) was varied (500, 2000, and 4000 μm) whereas the channel length (L) was fixed at 5 μm . It was found that the threshold voltage is directly proportional to the pH value of the buffer solution. The Si_3N_4 -gate pH-ISFET with the channel width of 40 μm shows good pH response over the pH range of 1-13. The pH sensitivity is in the range of 47.48-48.35 mV/pH at 25 °C. The drift rate measured in pH 7 buffer solution is 0.162 mV/hr, and the hysteresis value measured in the change in the pH value of the buffer solution is 1.052 mV. The response time is less than 1 second. The temperature effect was also investigated in various pH buffer solutions (pH 4, 7 and 10) at different ambient temperatures (25, 35, 45 and 55 °C). The temperature coefficient is ranged between -2.15 and -1.29 mV/°C, and the temperature coefficient of sensitivity is 0.322 mV/pH°C.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุม วิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือทุกด้าน ตั้งแต่ความรู้ในการวิจัยที่สัมพันธ์กับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหา ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย และ คุณชาญเดช หรูนันต์ ที่คอยถามถึงความก้าวหน้าของ งานวิจัยอยู่เสมอ

ขอขอบคุณ คุณวิน บรรจงปรุ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาการทำงานในทุกๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวทางการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบคุณ ดร.โอภาส ตริทวิศักดิ์ ดร.นิภาพรรณ กลั่นเงิน และ ดร.วุฒินันท์ เจียมศักดิ์ศิริ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัย ในทุกๆด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องจักรในกระบวนการผลิต เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลตลอดการวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 โครงสร้าง MIS.....	5
2.2.1 แถบพลังงานของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ.....	6
2.2.2 คุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน.....	8
2.3 โครงสร้าง EIS.....	14
2.4 ทรานซิสเตอร์แบบมอส.....	15
2.4.1 โครงสร้าง และสัญลักษณ์.....	16
2.4.2 คุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต.....	18
2.5 อุปกรณ์ฮีสเฟต.....	21
2.5.1 โครงสร้างอุปกรณ์ฮีสเฟต.....	21
2.5.2 คุณสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์ฮีสเฟต.....	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 การวัดคุณลักษณะความจุไฟฟ้า - แรงดันของโครงสร้าง MIS และ EIS.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 โครงสร้าง MIS	25
3.1.1.1 การสร้างโครงสร้าง MIS	25
3.1.1.2 การวัดคุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน	26
3.1.2 โครงสร้าง EIS	26
3.1.2.1 การสร้างโครงสร้าง EIS	26
3.1.2.2 การวัดคุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน	27
3.2 การออกแบบลวดลายสำหรับการสร้างอุปกรณ์ไอส์เฟท.....	28
3.3 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ ISFET.....	29
3.4 กระบวนการบรรจุภัณฑ์.....	36
3.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET	38
3.5.1 การทดสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิง.....	38
3.5.2 การวัดกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์ ISFET.....	39
3.5.3 การศึกษาย่านการทำงาน	40
3.5.4 การวัดคุณสมบัติเฉพาะของตัวอุปกรณ์ ISFET	40
3.5.4.1 การวัดการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Sensitivity)	41
3.5.4.2 การทดสอบช่วงการทำงาน (pH range).....	41
3.5.4.3 การทดสอบอัตราการครีฟท์ (Drift rate)	41
3.5.4.4 การวัดฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis).....	43
3.5.4.5 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (Response time)....	43
3.5.5 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	46
4.1 การวัดคุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน.....	46
4.1.1 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	46
4.1.2 การตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง	48
4.2 การทดสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิง.....	50
4.3 กระแสรั่วในตัวอุปกรณ์	51
4.4 ย่านการทำงาน	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1 การทำงานในย่านไม่อิ่มตัว.....	54
4.4.2 การทำงานในย่านอิ่มตัว	57
4.5 การวัดคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ ISFET.....	60
4.5.1 การวัดการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Sensitivity).....	60
4.5.2 การทดสอบช่วงการทำงาน (pH range).....	65
4.5.3 การทดสอบอัตราการครีฟท์ (Drift rate).....	65
4.5.4 ฮีสเทอริซิส (Hysteresis).....	66
4.5.5 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (Response time).....	67
4.6 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก ก. องค์ประกอบของสารละลายตัวอย่างค่า pH	81
ประวัติผู้เขียน.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วัสดุที่ได้รับความนิยมสำหรับการใช้งานเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน	2
4.1 ค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอกคิวเมชันและค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์ม Si_3N_4	46
4.2 สารละลายตัวอย่างค่า pH ที่อุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55 °C.....	71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้าง MIS พื้นฐาน.....	6
2.2 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำก่อนเป็นโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ.....	7
2.3 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำเมื่อเป็นโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ.....	7
2.4 แผนผังแท่งประจุของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติขณะได้รับแรงดันไฟฟ้า.....	8
2.5 กราฟคุณลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในอุดมคติที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	9
2.6 แถบพลังงาน โครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะแอกคิวมูลชัน.....	10
2.7 แผนผังแท่งประจุใน โครงสร้าง MIS ในภาวะแอกคิวมูลชัน.....	10
2.8 แถบพลังงานใน โครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะดีพลีชัน.....	11
2.9 แผนผังแท่งประจุใน โครงสร้าง MIS ในภาวะดีพลีชัน.....	11
2.10 แถบพลังงานใน โครงสร้าง MIS ในขณะเริ่มเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน.....	13
2.11 แผนผังแท่งประจุใน โครงสร้าง MIS ขณะเริ่มเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน.....	13
2.12 แถบพลังงานใน โครงสร้าง MIS ในขณะเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน.....	14
2.13 โครงสร้าง EIS พื้นฐาน.....	14
2.14 สมดุลระหว่างผิวที่เป็นได้ทั้งกรดและด่างของ SiOH.....	15
2.15 ก) ลักษณะ โครงสร้าง และ ข) สัญลักษณ์ ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล แบบเอ็นฮานซ์เมนต์.....	17
2.16 คุณสมบัติ $I_{DS}-V_{DS}$ ที่แรงดัน V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ ของมอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล.....	19
2.17 คุณสมบัติ $I_{DS}-V_{GS}$ ของมอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล.....	19
2.18 แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์ฮีสเฟท.....	21
2.19 ลักษณะแถบพลังงานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ.....	22
2.20 คุณสมบัติ $I_{DS}-V_{DS}$ ที่แรงดัน V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ.....	23
2.21 คุณสมบัติ $I_{DS}-V_{GS}$ ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ที่ V_{DS} มีค่าคงที่.....	24
3.1 โครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นฉนวน.....	25
3.2 โครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นฉนวน.....	27
3.3 โครงสร้าง EIS หลังจากการบรรจุภัณฑ์เรียบร้อยแล้ว.....	27
3.4 ระบบการวัดคุณสมบัติ C-V ของ โครงสร้าง EIS.....	28
3.5 ลวดลายต้นแบบสำหรับสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ ISFET.....	29
3.6 ภาพจำลองการปลูกฟิล์ม SiO_2 และ Si_3N_4 บนแผ่นผลึกซิลิคอนตามลำดับ.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ภาพจำลองการฉายแสงผ่านกระจกโฟโตนิกส์ในกระบวนการ โฟโวลิตี โครราฟี เพื่อสร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง	30
3.8 ภาพจำลองหลังจากการล้างน้ำยาไวแสงในกระบวนการ โฟโวลิตี โครราฟี	30
3.9 ภาพจำลองหลังจากกระบวนการกัดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้วยวิธีการ Dry etching	31
3.10 ภาพจำลองหลังจากกระบวนการลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง	31
3.11 ภาพจำลองชั้น Field oxide ที่สร้างด้วยเทคนิค Local Oxidation (LOCOS)	31
3.12 ภาพจำลองชั้น Field oxide หลังจากลอกชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้วยวิธีการ Wet etching	31
3.13 ภาพจำลองกระบวนการยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็นอย่างเข้มข้น (n^+) บริเวณขั้วซอส และเดรนของอุปกรณ์อีสเฟท	32
3.14 ภาพจำลองกระบวนการยิงฝังประจุสารเจือชนิดพีเข้มข้น (p^+) เพื่อสร้างรอยสัมผัส โอห์มิกกับเนื้อซิลิคอน	32
3.15 ภาพจำลองกระบวนการลอกชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์	33
3.16 ภาพจำลองชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนที่สร้างขึ้นจากฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ หนา 30 nm เหนือฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์หนา 10 nm	33
3.17 ภาพจำลองกระบวนการสร้างฟิล์มฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 nm	34
3.18 ภาพจำลองกระบวนการกัดพื้นที่บริเวณช่องสัมผัส (Contact hole)	34
3.19 ภาพจำลองชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมเคลือบอยู่ทั่วผิวของแผ่นผลึกและถูกเติมอยู่ในพื้นที่ บริเวณช่องสัมผัสซึ่งเชื่อมต่อกับตัวอุปกรณ์	34
3.20 ภาพจำลองขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมหลังจากกระบวนการกัด	35
3.21 ภาพจำลองชั้นป้องกันผิวหน้าของแผ่นผลึก	35
3.22 ภาพจำลองอุปกรณ์ ISFET หลังจากเปิดชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน	36
3.23 ภาพจำลองอุปกรณ์ ISFET หลังจากกระบวนการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว	36
3.24 แสดงชิ้นงานที่ตัดแยกเป็นชิพ และเชื่อมต่อลวดทองเรียบร้อยแล้ว	37
3.25 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการหุ้มด้วย อีพ็อกซี เรียบร้อยแล้ว	37
3.26 ระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET	38
3.27 ย่านการทำงานของอุปกรณ์ ISFET ที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆ	40
3.28 ระบบวัดอัตราการครีฟท์และอีสเคอร์รี่ซิสของอุปกรณ์อีสเฟท	42
3.29 วงจรอ่านค่า pH สำหรับตัวอุปกรณ์ อีสเฟท	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลา.....	43
3.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทกับเวลา.....	44
3.32 ระบบการวัดผลกระทบของอุณหภูมิต่อตัวอุปกรณ์ไอส์เฟท.....	45
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{Si_3N_4} / \epsilon_0$ กับ $1/t_{Si_3N_4}$	47
4.2 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของ โครงสร้าง EIS.....	48
4.3 การตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ของ โครงสร้าง EIS ที่ความหนาฟิล์ม ซิลิคอน ไนไตร์เท่ากับ 30 , 50 และ 70 nm	49
4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ	50
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่ว I_{GS} กับแรงดันเกต เมื่อขนาดของ $W/L = 500/5$	51
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่ว I_{GS} กับแรงดันเกต เมื่อขนาดของ $W/L = 2000/5$	52
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่ว I_{GS} กับแรงดันเกต เมื่อขนาดของ $W/L = 4000/5$	52
4.8 คุณสมบัติกระแสเดรน-แรงดันเดรนเมื่อแรงดันเกต V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ.....	53
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม V_T กับสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10.....	55
4.10 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน $I_{DS}-V_{GS}$ สำหรับการทำงานในย่านไม่อิ่มตัว	55
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} กับการตอบสนองต่อค่า pH สำหรับการทำงานในย่านไม่อิ่มตัว	56
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม V_T กับสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 สำหรับการทำงานในย่านอิ่มตัว.....	57
4.13 คุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเกตสำหรับการทำงานในย่านอิ่มตัว.....	58
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับผลการตอบสนองต่อค่า pH สำหรับการทำงานในย่านอิ่มตัว.....	59
4.15 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของอุปกรณ์ ISFET ที่มีขนาด $W/L=500/5$	61
4.16 การตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของอุปกรณ์ไอส์เฟทที่มีขนาด $W/L=500/5$	61
4.17 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของอุปกรณ์ ISFET ที่มีขนาด $W/L=2000/5$	62
4.18 การตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของอุปกรณ์ไอส์เฟทที่มีขนาด $W/L=2000/5$	62
4.19 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของอุปกรณ์ ISFET ที่มีขนาด $W/L=4000/5$	63
4.20 การตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของอุปกรณ์ไอส์เฟทที่มีขนาด $W/L=4000/5$	63
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับขนาดความกว้างของแซนแนล	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 การทดสอบช่วงการทำงานของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่าต่างๆ.....	65
4.23 ลักษณะอัตราการครีฟท์ของตัวอุปกรณ์ไอสเฟท	66
4.24 ลักษณะฮิสเตอร์รีซิสของรอบการวัดเริ่มจากสารละลายตัวอย่างค่า pH 7-10-7-4-7	67
4.25 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของค่า pH 7 ไปยัง pH 4.....	68
4.26 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของค่า pH 7 ไปยัง pH 10.....	68
4.27 คุณสมบัติเฉพาะกระแส-แรงดัน ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 ที่อุณหภูมิ 25-55 °C.....	70
4.28 คุณสมบัติเฉพาะกระแส-แรงดัน $I_{DS}-V_{GS}$ ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ที่อุณหภูมิ 25 และ 55 °C.....	72
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขั้วเริ่มกับอุณหภูมิในสารละลายตัวอย่าง	72
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอุณหภูมิ	73

บทที่ 1

บทนำ

อุปกรณ์โครงสร้างอ็ิสเฟท (Ion Sensitive Field Effect Transistor: ISFET) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานทางด้านการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือ มีขนาดเล็ก การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดี ทำความสะอาดและเก็บรักษาง่าย อายุการใช้งานยาวนาน และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย [1-4] เนื่องจากใช้เทคโนโลยีแบบเดียวกับการผลิตมอสเฟท [5-6] (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: MOSFET) จึงเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความสนใจ และมีบทบาทต่ออุตสาหกรรมอย่างมาก

ในบทนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐาน แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย และขอบเขตของการวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมด้านเคมี (chemical) และชีวเคมี (Biochemical) เช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมเครื่องสำอางและยา ตลอดจนอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เนื่องจากการวัดและควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นกระบวนการขั้นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต

วิธีการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ในปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้กระดาษลิตมัส การใช้พีเอชมิเตอร์แบบกระดาษ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเพราะสามารถตรวจวัดได้ง่าย แต่ไม่เหมาะที่จะใช้ในอุตสาหกรรมบางประเภทเนื่องจากมีขนาดใหญ่ และไม่ทนทาน อาจเกิดการแตกร้าวได้ เช่นในอุตสาหกรรมอาหาร ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ ISFET เพื่อใช้ในการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

อุปกรณ์ ISFET เริ่มต้นศึกษาในช่วงต้นของทศวรรษที่ 70 โดยในปี ค.ศ. 1970 Piet Bergveld [7] นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับการทดลองนำอุปกรณ์มอสเฟทมาลอกชั้นเกตโลหะออก จากนั้นนำอุปกรณ์จุ่มในสารละลายและวัดสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลง ขึ้นกับความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย ค่ากระแสในเซนแนล มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย หรือความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้น ๆ Piet Bergveld ให้คำอธิบายว่า ชั้นออกไซด์บริเวณเกตทำหน้าที่เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน (Ion Sensing Membrane: ISM) การนำ

อุปกรณ์อิสเฟทไปใช้งานต้องต่อขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในสารละลายที่ต้องการวัด เพื่อทำหน้าที่แทนขั้วเกดโลหะทำให้ช่วยลดสัญญาณรบกวน [8]

สิ่งสำคัญที่ทำให้อุปกรณ์อิสเฟทมีความสามารถในการตอบสนองต่อชนิด และความเข้มข้นของปริมาณไอออนนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชั้นฉนวนซึ่งทำหน้าที่เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ที่สร้างขึ้นบนเกตออกไซด์ คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนนั้นจะต้องเป็นฉนวนที่ตอบสนองต่อไฮโดรเจนไอออน และต้องไม่เกิดฟิล์มชนิดอื่นขึ้นระหว่างการใช้งานเพื่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดได้มีความถูกต้อง นอกจากนี้เมมเบรนที่ไวต่อไอออนยังต้องสามารถทนต่อการกัดกร่อนที่สภาวะความเป็นกรดและด่างได้ดี จากตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงคุณสมบัติพื้นฐานและประสิทธิภาพของชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ที่ทำงานด้วยโครงสร้างอิสเฟท

ตารางที่ 1.1 วัสดุที่ได้รับความสนใจสำหรับการใช้งานเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

Sensing Membrane	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	SnO ₂	PbTiO ₃
Sensitivity [mV/pH]	25-48	46-56	53-56	55-57	55-58	56-59
Available pH rang	4-10	1-13	1-13	2.5-13	2-10	2-12
Drift [mV/h]	unstable	0.83-1	0.83	0.5	1.65	0.5-1
Hysteresis (mV)	unstable	2	3-6	1.68-4	2.5	3-5
Temperature coefficient (mV/pH °C)	unstable	0.307	0.315	0.134	0.166	0.101
Response time (s)	60	< 1	< 1	< 1	-	-
Paper reference	[9-10]	[11-12]	[13]	[14-15]	[16-18]	[19-20]

สำหรับวัสดุที่นำมาใช้งานเป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนคือ ซิลิคอนไนไตรด์ (Si₃N₄) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน และเป็นชั้นฟิล์มที่มีใช้ในกระบวนการผลิตชิโมส (Complementary Metal Oxide Semiconductor: CMOS) ซึ่งสามารถที่จะพัฒนาเป็นการสร้างวงจรรวมสำหรับอ่านค่าลงในชิพเดียวได้ต่อไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์อิสเฟท ที่ใช้ชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอุปกรณ์ตัวตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างแบบโครงสร้างฮิสเฟท ที่ใช้ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮิสเฟท ซึ่งใช้เทคโนโลยีที่มีกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างซิมอส เพื่อที่จะสามารถพัฒนาสร้างเป็นวงจรรวมได้ในอนาคต
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮิสเฟทที่ใช้ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน
4. เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง จากการควบคุมความหนาของชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ขนาดความกว้างของแซนแนล การเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส และ อุณหภูมิ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

อุปกรณ์ตัวตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง โครงสร้างฮิสเฟทที่ใช้ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน น่าจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน และตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดี ความหนาของชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนที่แตกต่างกัน น่าจะมีการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกัน เนื่องจากความหนาที่แตกต่างกันจะมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าและการเหนี่ยวนำประจุที่รอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลาย และขนาดของเมมเบรนที่ไวต่อไอออนน่าจะมีผลต่อช่องทางเดินของกระแสในแซนแนลเหมือนกับหลักการทำงานของมอสเฟททั่วไป จากสมมติฐานของการศึกษาดังกล่าว ทำให้เราสร้างตัวอุปกรณ์โครงสร้างแบบต่างๆ ขึ้นเพื่ออธิบายการทำงาน และการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ฮิสเฟทที่ใช้เป็นตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง แล้วจึงเลือกฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม และการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง จากการควบคุมความหนาของชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเท่ากับ 30, 50 และ 70 nm ด้วยโครงสร้าง Metal Insulator Semiconductor (MIS) และ Electrolyte Insulator Semiconductor (EIS) ตามลำดับ แล้วจึงทำการสร้างตัวอุปกรณ์โครงสร้างฮิสเฟทขึ้นบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ขนาด 6 นิ้ว โดยออกแบบให้ส่วนความกว้างของแซนแนล W เท่ากับ 500, 2000 และ 4000 μm ส่วนความยาว L เท่ากับ 5 μm จากนั้น

นำมาทำการตัดแยกและบรรจุภัณฑ์ และเมื่อได้ตัวอุปกรณ์อีสเฟทแล้วจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอุปกรณ์

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์อีสเฟท โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของโครงสร้าง MIS โครงสร้าง EIS ทรานซิสเตอร์ชนิดมอส และอุปกรณ์อีสเฟท

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวัดคุณสมบัติเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ลวดลายสำหรับการสร้างชิ้นงาน กระบวนการสร้าง การบรรจุภัณฑ์ และการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

บทที่ 4 เป็นผลการทดลองและวิเคราะห์ผล โดยช่วงแรกจะกล่าวถึงผลการวัดคุณสมบัติของฟิล์มที่ใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน จากตัวอุปกรณ์โครงสร้าง MIS และ EIS จากนั้นเป็นผลการทดสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ปริมาณกระแสรั่ว ย่านการทำงาน การวัดคุณสมบัติเฉพาะ และสุดท้ายเป็นผลการผลกระทบของอุณหภูมิ จากตัวอุปกรณ์โครงสร้างอีสเฟท

บทที่ 5 เป็นบทสรุป และข้อเสนอแนะทั้งหมดของงานวิจัยทั้งหมด

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

2.1 บทนำ

อุปกรณ์ไอส์เฟท (Ion Sensitive Field Effect Transistor: ISFET) ถูกพัฒนามาจากอุปกรณ์มอสเฟท (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: MOSFET) โดยเกิดจากการแยกชั้นเกตโลหะออกจากอุปกรณ์มอสเฟทเพื่อให้ชั้นฉนวนบริเวณเกตออกไซด์สัมผัสกับสารละลายและวัดสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายและค่ากระแสในช่องทางเดินของกระแส (Channel) จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย หรือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้นๆ [21] ดังนั้นหลักการของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง อธิบายได้ด้วยโครงสร้าง MIS และ EIS ส่วนการทำงานของอุปกรณ์ ISFET สามารถอธิบายได้โดยการดัดแปลงแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มอสเฟท ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

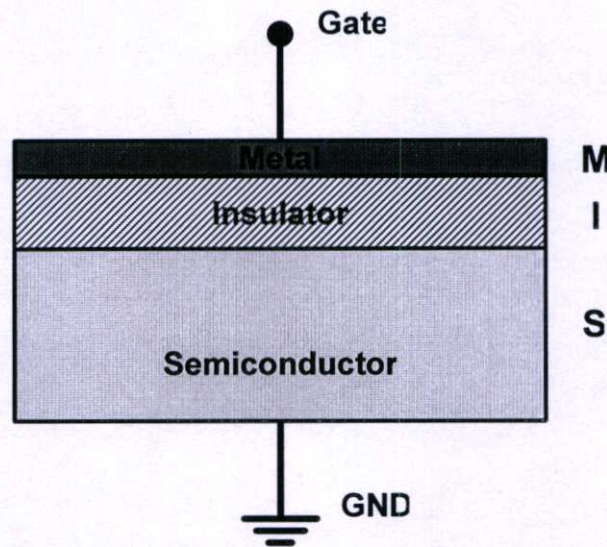
2.2 โครงสร้าง MIS

โครงสร้าง MIS เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ โดยชั้นของฉนวนอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของโลหะและชั้นของสารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปชั้นของโลหะนิยมใช้เป็นอะลูมิเนียม ชั้นของฉนวนสามารถใช้วัสดุฉนวนได้ทุกชนิด ส่วนชั้นของสารกึ่งตัวนำนิยมใช้ซิลิคอนซึ่งใช้ได้ทั้งซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type) และชนิดพี (p-type) [22]

โครงสร้าง MIS อาจเรียกได้ว่าโครงสร้าง MOS (Metal Oxide Semiconductor) เนื่องจากโดยพื้นฐานฉนวนที่ใช้จะเป็นฟิล์มออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าด้านโลหะถูกเรียกว่า เกต ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นฐานรอง มักจะทำหน้าที่เป็นกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โครงสร้าง MIS ในอุดมคติมีลักษณะดังนี้

1. ชั้นโลหะมีความหนาแน่นเพียงพอเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าจึงมีศักย์ไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ความต้านทานภายในชั้นโลหะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์
2. ชั้นฉนวนมีความเป็นฉนวนที่สมบูรณ์ ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแม้ว่าจะได้รับแรงดันไฟฟ้า ชั้นฉนวนต้องมีความต้านทานสูงเป็นอนันต์
3. ชั้นสารกึ่งตัวนำถูกเติมสารเจืออย่างสม่ำเสมอ และมีความหนาแน่นพอที่จะทำให้เกิดบริเวณปลอดสนามไฟฟ้า

4. ไม่มีประจุไฟฟ้าใดๆ สะสมอยู่ภายในฉนวนหรือที่ผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ
5. ประจุไฟฟ้าใดๆ ที่มี จะสะสมอยู่ที่สารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ และที่โลหะด้านที่สัมผัสกับฉนวน
6. ขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านของ โครงสร้างต้องมีสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก
7. ในการวิเคราะห์จะพิจารณา 1 มิติ
8. ค่าฟังก์ชันงานของ โลหะและของสารกึ่งตัวนำถูกพิจารณาว่ามีค่าเท่ากัน

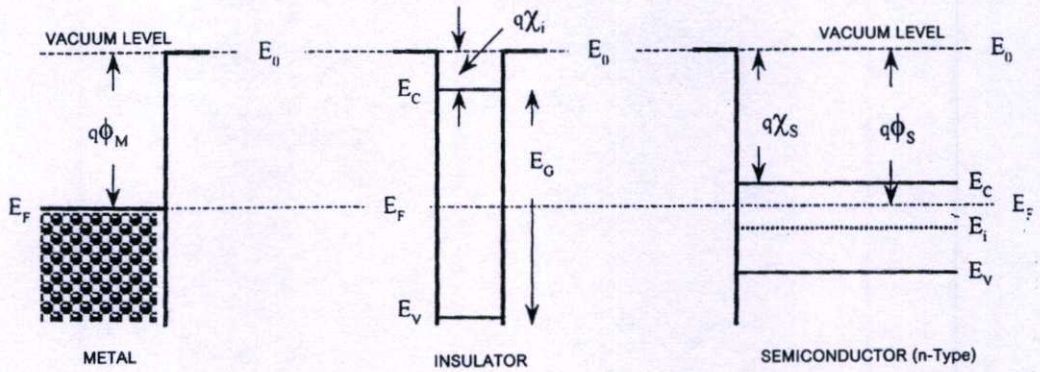


รูปที่ 2.1 โครงสร้าง MIS พื้นฐาน

2.2.1 แถบพลังงานของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ

แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ ก่อนประกอบกันเป็นโครงสร้าง MIS แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 เส้นทึบในแนวดิ่งแสดงถึงขอบของผิววัสดุ โดยระดับพลังงานสุญญากาศ (Vacuum level: E_0) คือพลังงานที่น้อยที่สุดที่อิเล็กตรอนต้องใช้เพื่อให้หลุดออกไปอยู่นอกวัสดุ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level: E_F) คือพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ ฟังก์ชันงาน (Work function: ϕ) คือความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานสุญญากาศกับพลังงานเฟอร์มี ฟังก์ชันงานของโลหะเขียนแทนด้วย $q\phi_M$ ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย $q\phi_S$

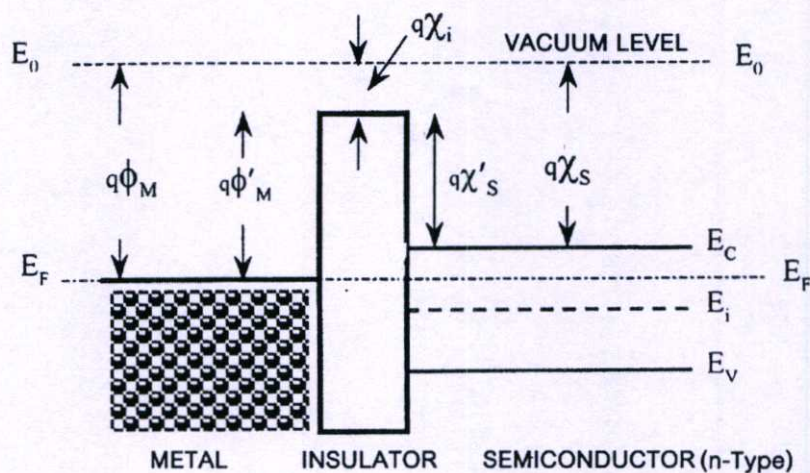
ความสูงของกำแพงศักย์ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (Surface energy barrier) คือความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานสุญญากาศ และระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (Conduction level: E_C) ถูกกำหนดด้วยค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity: χ) และเขียนแทนด้วย $q\chi_S$



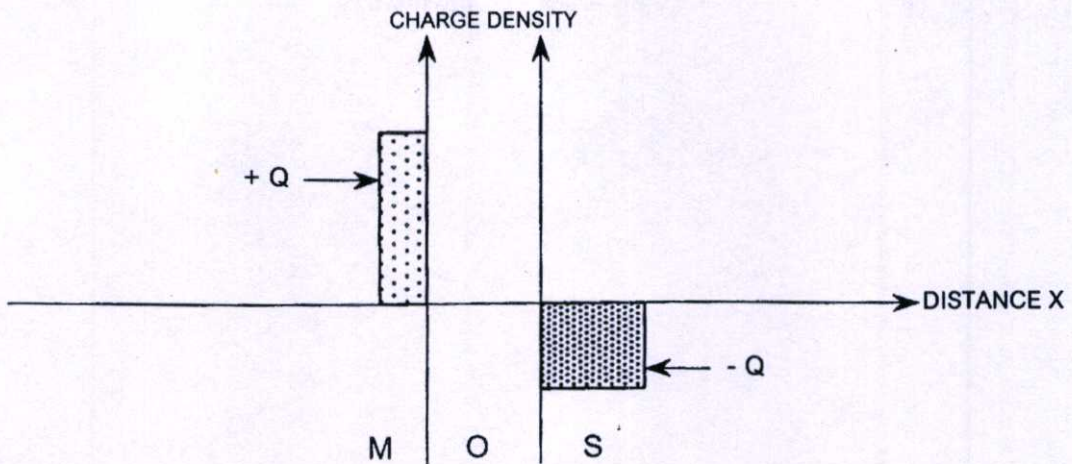
รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำก่อนเป็นโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ

แถบพลังงานของฉนวนจะคล้ายกับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แต่จะมีช่องว่างพลังงาน (Energy gap: E_G) ที่กว้างมาก ความสูงของกำแพงพลังงานที่ผิวของฉนวนถูกกำหนดด้วยค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเช่นเดียวกันและเขียนแทนด้วย $q\chi_s$

โครงสร้าง MIS ในอุดมคติจะพิจารณาว่าค่าฟังก์ชันงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากัน รูปที่ 2.3 แสดงระดับพลังงานเมื่อนำโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ มาประกอบกันเกิดเป็นโครงสร้าง MIS พบว่าระดับพลังงานต่างๆ อยู่ในระดัเดิมแม้ที่บริเวณสารกึ่งตัวนำ ซึ่งลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดเป็นแถบเรียบ (Flat band) นั่นคือระดับพลังงานเฟอร์มีของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะอยู่ในระดับเดียวกัน และทำให้ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าและระดับพลังงานสูงสุดของแถบเวเลนซ์เป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าในภาวะสมดุลจะไม่มีประจุไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าใดๆ เกิดขึ้นในโครงสร้างของ MIS แบบอุดมคติ



รูปที่ 2.3 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำเมื่อเป็นโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ



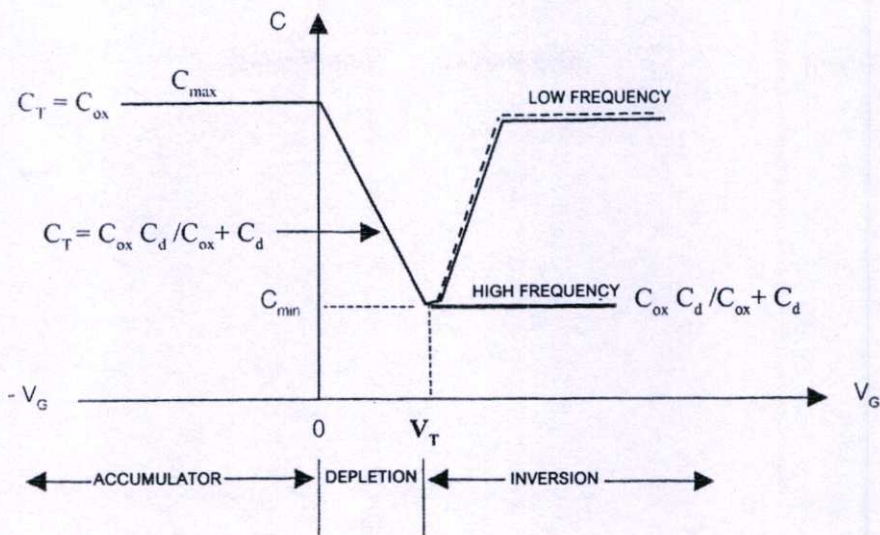
รูปที่ 2.4 แผนผังแท่งประจุของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติขณะได้รับแรงดันไฟฟ้า

2.2.2 คุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน

โครงสร้าง MIS มีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ โดยค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เรียกว่า “C-V Characteristic” ความสัมพันธ์นี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของโครงสร้าง MIS ได้

คุณลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้เช่น ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage: V_T) ซึ่งเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าที่โลหะที่ทำให้ความหนาแน่นของความจุไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด และค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดขณะที่อยู่ในภาวะแอกคิวมูลชันคือค่าความจุไฟฟ้าของฉนวน (Oxide capacitance: C_{ox}) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาความหนาของชั้นฉนวนได้

หลักการของการวัดคุณลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน คือป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับซ้อนให้แก่โครงสร้าง MIS แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ แรงดันกระแสตรงจะถูกเปลี่ยนไปอย่างช้าๆ ซึ่งจะทำให้ MIS มีการทำงานเข้าสู่ภาวะต่างๆ ดังนี้คือ แอควิวมูลชัน ดิฟฟิวชัน และ อินเวอร์ชัน ซึ่งในภาวะที่แตกต่างกันนี้จะมีการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าในโครงสร้าง MIS แตกต่างกัน ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าต่างกัน กราฟคุณลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของโครงสร้าง MIS แบบอุดมคติเมื่อมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นดังรูปที่ 2.5



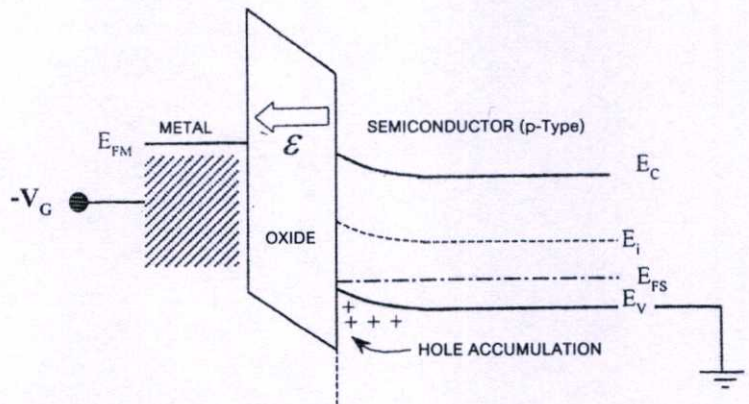
รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในอุดมคติที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ภาวะที่แตกต่างกันเนื่องจากการกระจายตัวของประจุอธิบายได้ดังนี้

1. ภาวะแอคคิวมูเลชัน (Accumulation)

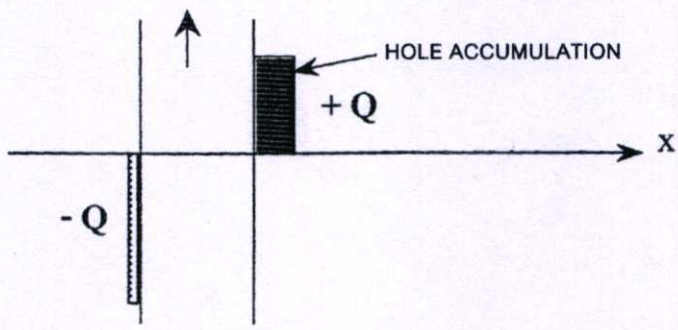
เมื่อโลหะได้รับแรงดันไฟฟ้าค่าลบ จะทำให้มีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้นที่โลหะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับฉนวน ประจุไฟฟ้าลบจะกระจายอยู่ในช่วงแคบๆ มีลักษณะเหมือนเป็นแผ่นประจุ ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก (Majority carrier) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเข้าไปสะสมที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ผิวสัมผัส ภาวะนี้จึงถูกเรียกว่า ภาวะการสะสม หรือ ภาวะแอคคิวมูเลชัน ประจุไฟฟ้าบวกและลบที่ขอบทั้งสองด้านของฉนวนจะมีค่าเท่ากันเพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า ความจุไฟฟ้ารวมของโครงสร้าง MIS ในภาวะนี้จะเหมือนกับความจุไฟฟ้าแบบแผ่นขนานของชั้นฉนวนเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าคงที่

พิจารณาแถบพลังงานเมื่อฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี พบว่าในภาวะแอคคิวมูเลชัน เมื่อโลหะได้รับแรงดันไฟฟ้าเป็นลบ ระดับพลังงานเฟอร์มิดีนโลหะจะสูงขึ้นและสูงกว่าด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานในฉนวนและในสารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับฉนวนมีการโค้งงอ ดังแสดงในผังรูปที่ 2.6 ความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ผิวสัมผัสและเมื่อห่างออกไปจากผิวสัมผัสความหนาแน่นจะมีค่าลดลง และในที่สุดความหนาแน่นโฮลจะมีค่าเท่ากับค่าเดิมก่อนได้รับแรงดันไฟฟ้า แสดงว่าความหนาแน่นของพาหะส่วนมากที่บริเวณผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่ามากกว่าในเนื้อสาร คล้ายกับมีโฮลเข้ามาสะสมอยู่ในบริเวณนี้



รูปที่ 2.6 แถบพลังงาน โครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะแอกคิวมูเลชัน

เมื่อพิจารณาการกระจายของประจุไฟฟ้าจะพบว่า ด้านโลหะจะมีประจุไฟฟ้าลบอยู่ที่ผิวที่สัมผัสกับฉนวน ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขนาดเท่ากันที่สารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับฉนวน ลักษณะการกระจายของประจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงได้ รูปที่ 2.7



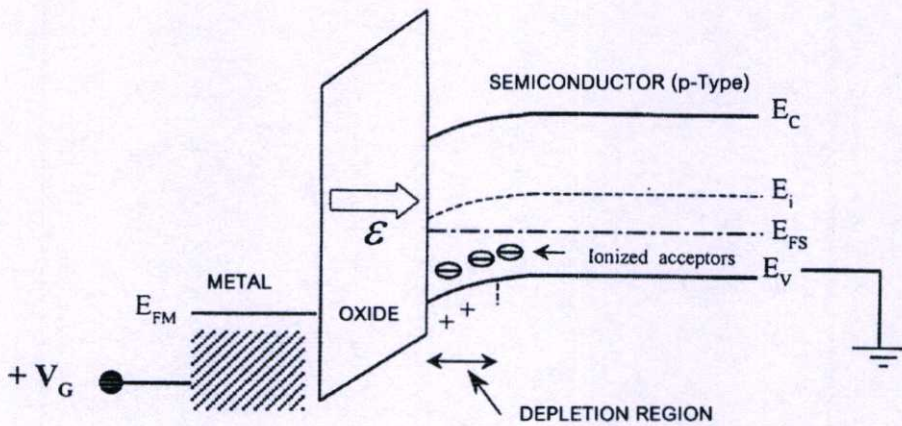
รูปที่ 2.7 แผนผังแท่งประจุในโครงสร้าง MIS ในภาวะแอกคิวมูเลชัน

2. ภาวะดีพลีทชัน (Depletion)

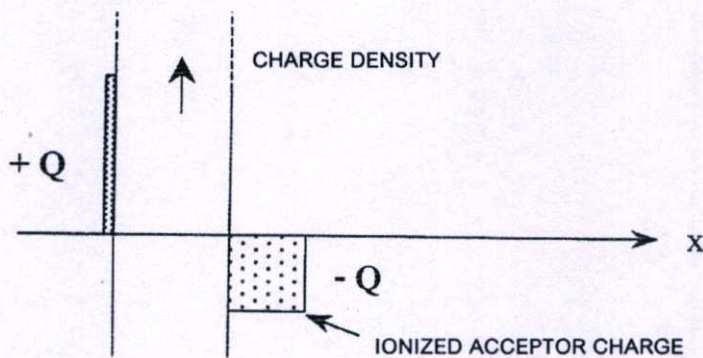
เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นบวก โดยมีค่าไม่สูงนักจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกที่โลหะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับฉนวน ซึ่งส่งผลให้โฮลถูกผลักออกจากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นบริเวณปลอดพาหะขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ในบริเวณนี้จะประกอบไปด้วยประจุไฟฟ้าลบของอะตอมสารเจือผู้รับ (Ionized acceptor) และเนื่องจากความหนาแน่นของโฮลลดลงจึงเรียกภาวะนี้ว่า ภาวะลดลง หรือ ภาวะดีพลีทชัน ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในภาวะนี้จะประกอบไปด้วยความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวน (C_{ox}) และความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะ (C_D) ซึ่งต่อรวมกันแบบอนุกรม

การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่โลหะจะทำให้ความหนาแน่นของประจุ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะเพิ่มขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะกว้างขึ้น ทำให้ความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะลดลง ดังนั้นความจุไฟฟ้ารวมจึงลดลง และลดลงจนต่ำที่สุดเมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิดภาวะอินเวอร์ชัน

เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะจะลดลง และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำเพียงเล็กน้อย ดังนั้นแถบพลังงานในชั้นฉนวนจะเอียงโดยมีความชันบวก ส่วนแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับฉนวนจะมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อยดังรูปที่ 2.8 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะดีพลีชัน นั่นคือความหนาแน่นของโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำจะมีค่าน้อยกว่าภายในสารกึ่งตัวนำ ในช่วงนี้จะมีประจุบวกเกิดขึ้นที่ด้านโลหะและทำให้โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำถูกผลักให้ห่างออกไป ซึ่งทำให้ไอออนลบของอะตอมสารเจือแสดงอำนาจไฟฟ้าลบบอกมา ลักษณะการกระจายตัวของประจุในภาวะนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานใน โครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะดีพลีชัน



รูปที่ 2.9 แผนผังแท่งประจุใน โครงสร้าง MIS ในภาวะดีพลีชัน

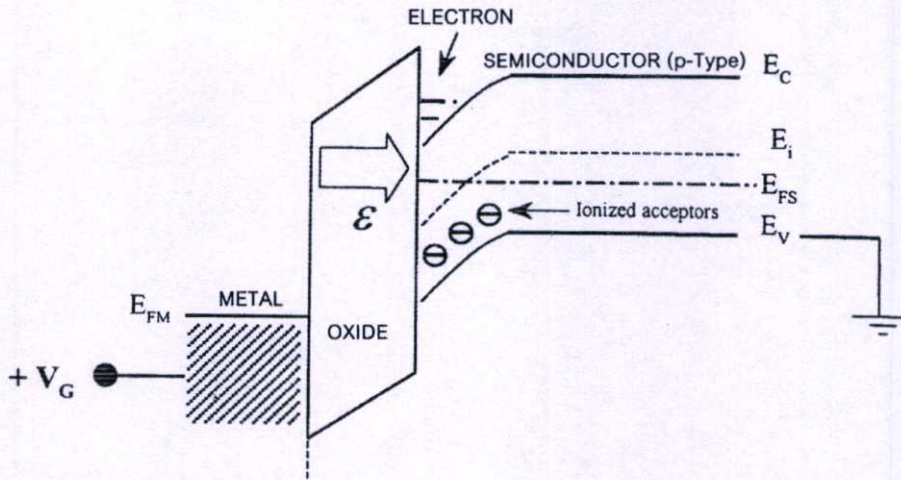
3. ภาวะอินเวอร์ชัน (Inversion)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ภาวะอินเวอร์ชัน บริเวณปลอดพาหะจะมีความกว้างสูงสุดและไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป แต่จะมีอิเล็กตรอนเข้ามาอยู่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำเป็นจำนวนมากและเกิดเป็นชั้นกลับ (Inversion layer) ที่จุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารกึ่งตัวนำอย่างสมบูรณ์ โดยเปลี่ยนจากสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นชนิดเอ็น จึงเรียกภาวะนี้ว่า ภาวะเปลี่ยนกลับ หรือ ภาวะอินเวอร์ชันความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ผิว จะเปลี่ยนแปลงตามความต่างศักย์ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำแบบเอกซ์โปเนนเชียล ดังนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะมีเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จะทำให้ประจุไฟฟ้าในชั้นกลับเปลี่ยนแปลงอย่างมาก

ในกรณีที่สัญญาณกระแสลบมีความถี่ต่ำ อิเล็กตรอนในชั้นกลับสามารถตอบสนองได้ทันต่อการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าของฉนวนซึ่งต่ออนุกรมกับความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่าสูงมาก การเปลี่ยนแปลงประจุในสารกึ่งตัวนำจะเป็นการเปลี่ยนแปลงในชั้นกลับเท่านั้น ดังนั้นโครงสร้าง MIS จะเป็นเหมือนตัวเก็บประจุแบบธรรมดา โดยค่าความจุไฟฟ้ารวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าเข้าสู่ค่า C_{ox} อีกครั้ง

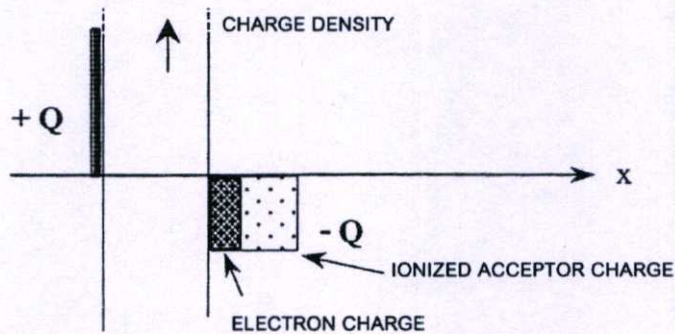
ในกรณีที่สัญญาณกระแสลบมีความถี่สูง อิเล็กตรอนจะไม่สามารถตอบสนองได้ทันตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่ ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ผิวจะมีค่าคงที่ ทำให้ความหนาแน่นของความจุไฟฟ้ารวมเกิดจากความจุไฟฟ้าของฉนวนซึ่งต่ออนุกรม กับความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะนี้จะมีค่าต่ำสุดเพราะเกิดขึ้นขณะที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าสูงสุดเช่นเดียวกับที่ภาวะดีพลิตชัน

เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่าเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้วยค่าบวกที่มากขึ้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะจะต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำมากยิ่งขึ้น ความชันของการโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามากขึ้น แสดงว่าค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ในที่สุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะมีค่าสูงเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม แถบพลังงานจะโค้งงอ ดังรูปที่ 2.10



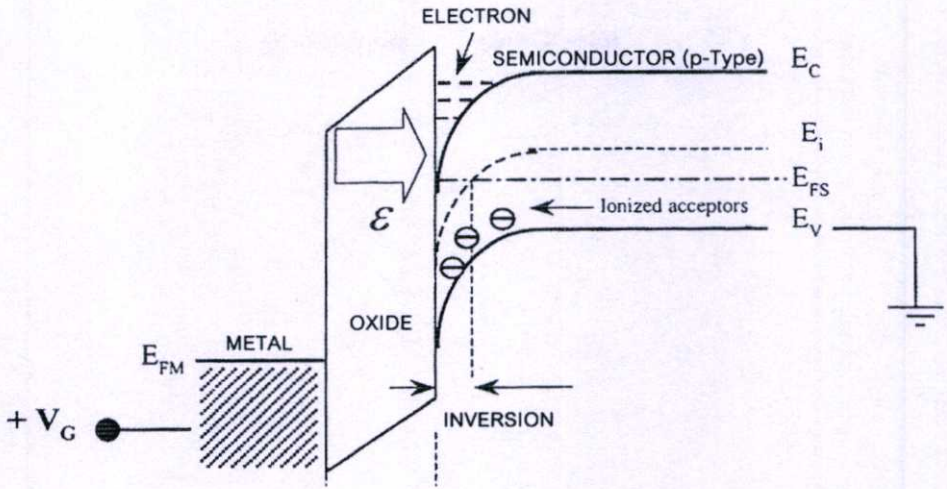
รูปที่ 2.10 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ในขณะเริ่มเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน

ภาวะนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารกึ่งตัวนำอย่างสมบูรณ์ หรือเป็นจุดเริ่มของการเกิด ภาวะสตรองอินเวอร์ชัน (Onset of strong inversion) ลักษณะการกระจายของประจุไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนผังแท่งประจุในโครงสร้าง MIS ขณะเริ่มเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน

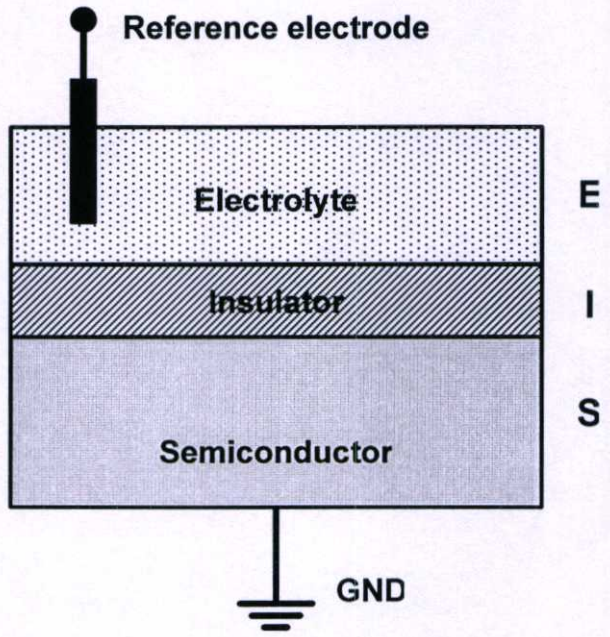
ถ้าให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นการ โค้งงอของแถบพลังงานจะมากขึ้นดังรูปที่ 2.12 สมบัติของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณผิวสัมผัสของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนกลับจากสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังนั้นภาวะนี้จึงถูกเรียกเป็น ภาวะเปลี่ยนกลับอย่างเต็มที่ หรือภาวะสตรองอินเวอร์ชัน (Strong inversion) ของโครงสร้าง MIS ชนิดพี



รูปที่ 2.12 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ในขณะเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน

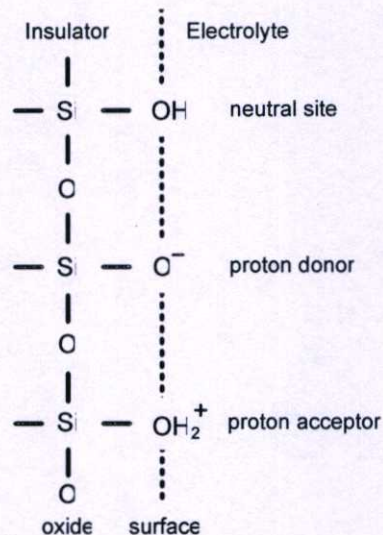
2.3 โครงสร้าง EIS

โครงสร้าง EIS เป็นโครงสร้างที่ปรับปรุงมาจากโครงสร้าง MIS โดยโลหะจะถูกแทนที่ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) รูปที่ 2.13 วัตถุประสงค์ของโครงสร้างนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนกับสารละลาย ซึ่งสามารถใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของประจุในกระบวนการเคมีและชีววิทยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.13 โครงสร้าง EIS พื้นฐาน

ที่ผิวของฉนวนจะประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ไฮดรอกซิลคือ หมู่ของอะตอมที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจนอย่างละหนึ่งอะตอม เขียนแทนด้วย -OH) ซึ่งโดยปกติจะมีความสมดุลทางเคมีเพราะจะจับกับไอออนของสารละลายที่มาสัมผัส ตัวอย่างเช่นในกรณีของฉนวนที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์จะมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็น SiOH โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของฉนวนเหล่านี้สามารถที่จะรับหรือปล่อยโปรตอนกับสารละลายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าปฏิกิริยาสมดุลสามารถเกิดขึ้นระหว่างโปรตอนในสารละลาย และหมู่ไฮดรอกซิลที่รวมตัวกันที่รอยต่อของซิลิกอนไดออกไซด์กับสารละลาย และกลไกการตอบสนองของประจุออกไซด์ที่ผิวสามารถอธิบายได้จากสมดุลทางเคมีที่ผิวของ SiOH ซึ่งเป็นได้ทั้งกรดและด่าง (Amphoteric) และไอออนของไฮโดรเจนในสารละลาย เมื่อฉนวนเชื่อมต่อกับสารละลาย การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ผิว [24]



รูปที่ 2.14 สมดุลระหว่างผิวที่เป็นได้ทั้งกรดและด่างของ SiOH

2.4 ทรานซิสเตอร์แบบมอส

มอสทรานซิสเตอร์ หรือมอสเฟต เป็นทรานซิสเตอร์ที่นำเอาโครงสร้างมอส (Metal Oxide Semiconductor: MOS) มาประยุกต์ใช้งาน โดยใช้เป็นส่วนเกตของทรานซิสเตอร์ เพื่ออาศัยผลของสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำประจุในสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดเป็นชั้นกลับ (Inversion layer) หรือที่เรียกว่า “แชนแนล” (Channel) ซึ่งเป็นช่องทางเดินของกระแสระหว่างขั้วซอส (Source) และเดรน (Drain) ความหนาแน่นของประจุที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาในแชนแนล จะขึ้นกับแรงดันที่เกต ดังนั้นแรงดันที่เกตซึ่งเป็นแรงดันด้านอินพุท จึงสามารถควบคุมการนำกระแสระหว่างซอส-เดรนซึ่งเป็น

กระแสด้านเอาท์พุทได้ การทำงานของทรานซิสเตอร์นี้เกิดจาก ผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดในแนวตั้ง (Vertical electric field) จะเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนล และผลของสนามไฟฟ้าระหว่างซอส-เดรนในแนวนอน (Horizontal electric field) จะทำให้พาหะในแชนแนลเคลื่อนที่ จึงทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จึงอาจถูกเรียกว่า “ทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้า” หรือ Field Effect Transistor และเขียนเป็นตัวย่อคือ FET ซึ่งเรานิยมเรียกว่า “เฟท” และเรียกชื่อเต็มว่า MOSFET หรือ มอสเฟท เพื่อให้รู้ว่าส่วนเกตมีโครงสร้างแบบมอสมันเอง และเนื่องจากส่วนของชั้นออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวน

2.4.1 โครงสร้าง และสัญลักษณ์

เมื่อพิจารณาจากลักษณะคุณสมบัติและโหมคการทำงาน เราอาจจัดแบ่งมอสเฟท ได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. มอสเฟทชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์ (Enhancement MOSFET) หรือมอสเฟทชนิดแชนแนลเกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced channel MOSFET) หมายถึง มอสทรานซิสเตอร์ซึ่งเมื่อแรงดันที่เกตเป็นศูนย์โวลต์ จะไม่มีแชนแนลเกิดขึ้น กระแสเดรนไม่ไหล ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะ OFF แต่เมื่อเกต ได้รับแรงดันที่เหมาะสมและมากพอ สนามไฟฟ้าที่เกตจะเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนลขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีกระแสเดรนไหลได้

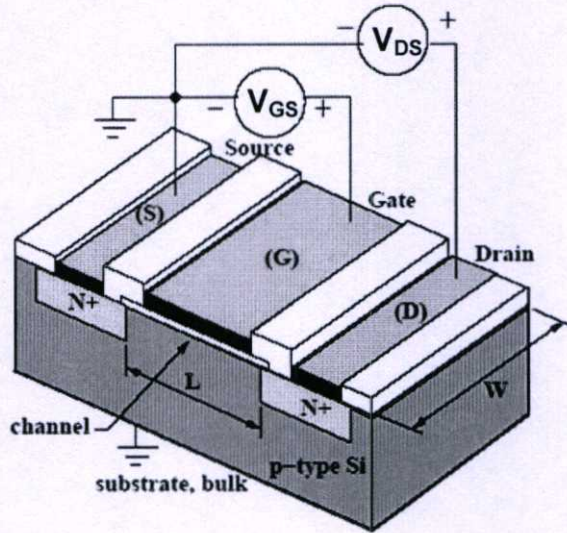
2. มอสเฟทชนิดดีพลีชัน (Depletion MOSFET) หรือมอสเฟทชนิดแชนแนลเกิดจากการแพร่สารเจือ (Diffused channel MOSFET) หมายถึงมอสทรานซิสเตอร์ซึ่งแม้แรงดันที่เกตเป็นศูนย์โวลต์ ก็มีแชนแนลเกิดขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการแพร่อะตอมสารเจือเพื่อให้เกิดเป็นแชนแนลดังนั้น กระแสเดรนสามารถไหลได้ แม้แรงดันที่เกตเป็นศูนย์

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากชนิดของพาหะที่นำกระแสในทรานซิสเตอร์ สามารถแบ่งมอสเฟท ได้ 2 ชนิด คือ มอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล (n-channel MOSFET) หรือเอ็นมอส (NMOS) หมายถึง มอสทรานซิสเตอร์ซึ่งกระแสเกิดจากการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในแชนแนลชนิดเอ็น และ มอสเฟทชนิดพีแชนแนล (p-channel MOSFET) หรือพีมอส (PMOS) หมายถึงมอสทรานซิสเตอร์ซึ่งกระแสเกิดจากการนำไฟฟ้าของโฮลในแชนแนลชนิดพี

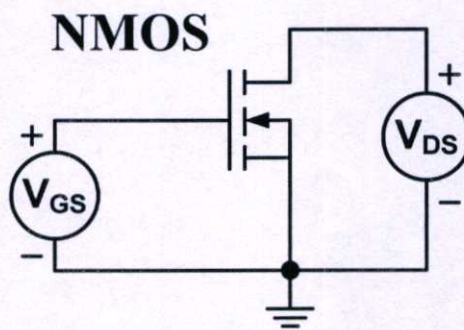
เนื่องจากพื้นฐานของตัวอุปกรณ์ออสเฟทมีลักษณะ โครงสร้างเหมือนกับมอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแชนแนล ดังนั้นในส่วนนี้จะขออธิบายเฉพาะมอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแชนแนลเท่านั้น

ลักษณะโครงสร้าง และสัญลักษณ์ของมอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแชนแนลแสดงดังในรูปที่ 2.15 โดยมีโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยชั้นฐานรอง (Substrate) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี บางครั้งชั้นฐานรองนี้ถูกเรียกว่า “บอดี” (Body: B) ส่วนซอส (source: S) และส่วนเดรน (drain: D)

ถูกสร้างขึ้นด้วยการเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นอย่างเข้มข้น (n^+) เข้าไปในฐานรองชนิดพี ระยะห่างระหว่างซอสและเดรนถูกพิจารณาว่าเป็นความยาวของแชนแนล ส่วนเกิดของทรานซิสเตอร์คือ โครงสร้างมอส (MOS) ซึ่งถูกสร้างขึ้นและอยู่ระหว่างซอสกับเดรน จากนั้นขั้วสัมผัสโอห์มิกจะถูกสร้างขึ้นบนส่วนทั้งสามของทรานซิสเตอร์ ขั้วไฟฟ้าของมอสจึงมีสามขั้วคือ ขั้วซอส เกต และเดรน [22]



ก) โครงสร้าง



ข) สัญลักษณ์

รูปที่ 2.15 ก) ลักษณะ โครงสร้าง และ ข) สัญลักษณ์ ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล แบบเอ็นฮานซ์เมนต์

2.4.2 คุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต

ในกรณีที่พิจารณาว่าไม่มีสถานะผิว (surface state) ใดๆปรากฏอยู่ที่ผิวสัมผัสระหว่าง Si-SiO₂ ดังนั้นที่แรงดันเกต $V_{GS} = 0V$ จึงไม่มีเซนแนลเกิดขึ้น และแม้จะมีแรงดันเดรน $V_{DS} > 0$ ก็ตาม กระแสเดรน $I_{DS} = 0$ ในภาวะนี้ถือว่าทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะ OFF แต่เมื่อได้รับแรงดันเกตเป็นบวก $V_{GS} > 0$ และมากพอที่จะทำให้สนามไฟฟ้าที่ชั้นออกไซด์สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดเซนแนลชนิดเอ็นได้ หรือ $V_{GS} > V_T$ เซนแนลที่เกิดขึ้นจะต่อเชื่อมระหว่างซอสและเดรน และเป็นช่องทางเดินของกระแสเดรน โดยกระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นกับแรงดันเดรนในช่วงแรก และเมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้นในที่สุด จะถึงค่าแรงดันพินช์ออฟ (Pinch off voltage: V_P) หรือแรงดันอิ่มตัว (Saturation drain voltage: $V_{DS(sat)}$) และเขียนได้ว่า [22]

$$(V_{GS} - V_{DS(sat)}) = V_T \quad (2.1)$$

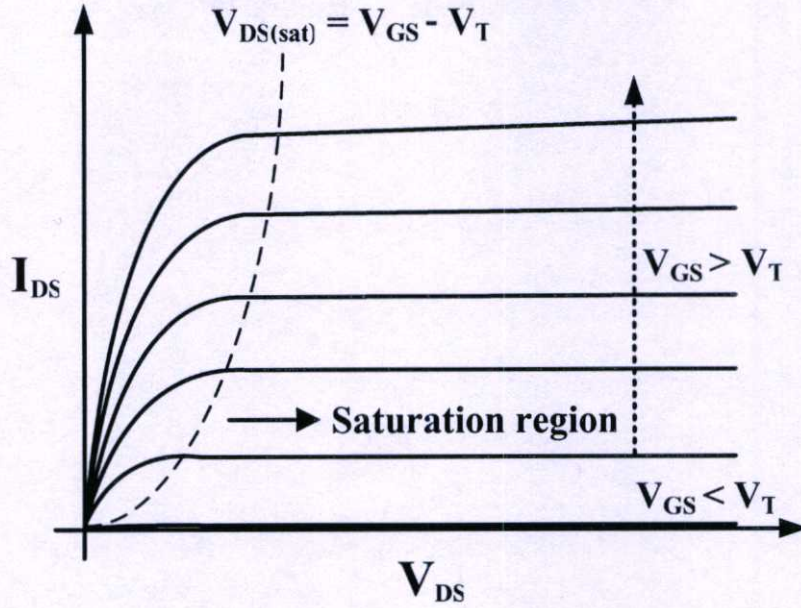
$$\text{หรือ} \quad V_P = V_{DS(sat)} = (V_{GS} - V_T) \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.1 แรงดันเดรนอิ่มตัว $V_{DS(sat)}$ จะแปรตามแรงดันเกต V_{GS} เมื่อแรงดันเกตเพิ่มขึ้น กระแสเดรนอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นด้วย และเป็นไปตามสมการ

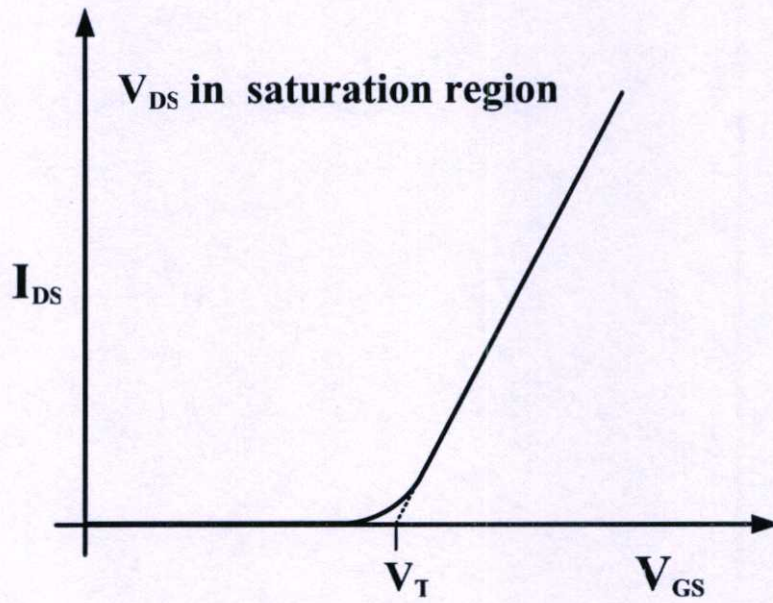
$$I_{DS(sat)} = \frac{V_{DS(sat)}}{R_{eff(n-ch)}} = \frac{V_{GS} - V_T}{R_{eff(n-ch)}} \quad (2.3)$$

ดังนั้นคุณสมบัติ $I_{DS}-V_{DS}$ ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนทชนิดเอ็นเซนแนล ที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆจึงแสดงได้ดังในรูปที่ 2.16 และกราฟความสัมพันธ์ของ $I_{DS}-V_{GS}$ ในขณะที่อยู่ในย่านไม่อิ่มตัว แสดงได้ดังในรูปที่ 2.17

ซึ่งกราฟนี้สามารถแสดงค่าของแรงดันขีดเริ่ม V_T ได้ เนื่องจากแรงดันเกต V_{GS} ที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม V_T กระแสเดรน $I_{DS} \approx 0$ และเมื่อแรงดันเกต V_{GS} สูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม V_T ทำให้มีกระแสเดรนอิ่มตัว $I_{DS(sat)}$ ค่าต่างๆ แรงดันเกต V_{GS} ที่ทำให้กระแสเดรนเริ่มไหลได้จึงถูกพิจารณาว่าเป็นแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage: V_T) นอกจากนี้กราฟ $I_{DS}-V_{GS}$ ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนซึ่งเป็นกระแสเอาท์พุทในวงจรของเดรน-ซอส กับแรงดันเกตซึ่งเป็นแรงดันอินพุท ซึ่งแรงดันเกตสามารถควบคุมหรือส่งเสริม สนับสนุนให้กระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น ได้นั่นเอง



รูปที่ 2.16 คุณสมบัติ I_{DS} - V_{DS} ที่แรงดัน V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ ของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล



รูปที่ 2.17 คุณสมบัติ I_{DS} - V_{GS} ของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส drain I_{DS} แรงดัน drain V_{DS} แรงดันเกต V_{GS} และแรงดันขีดเริ่ม V_T สามารถอธิบายด้วยย่านการทำงานซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ย่าน คือ ย่านไม่อิ่มตัว (Non-saturation region) เมื่อแรงดัน $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$ อธิบายดังสมการที่ (2.4) และย่านอิ่มตัว (Saturation region) เมื่อ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ แสดงดังสมการที่ (2.5) [23]

$$I_{DS} = \beta \left[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (2.4)$$

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ β คือ “พารามิเตอร์ของมอสเฟตมีค่าเท่ากับ”

$$\beta = C_i \cdot \mu_n \cdot \frac{W}{L} \quad (2.6)$$

เมื่อ μ_n	คือสภาพคล่องของประจุพาหะ
C_i	คือค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อพื้นที่
W	คือความกว้างเกต
L	คือความยาวเกต
V_T	คือค่าแรงดันขีดเริ่ม

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของอุปกรณ์มอสเฟต คือค่าแรงดันขีดเริ่ม หมายถึงแรงดันไบอัสที่เกิดค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เกิดภาวะ “สตริงอินเวอร์ชัน” กล่าวคือเป็นค่าแรงดันที่ทำให้อุปกรณ์มอสเฟตเริ่มทำงาน แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$V_T = V_{FB} - \frac{Q_{dm}}{C_i} + 2\psi_F \quad (2.7)$$

โดยที่ค่าแรงดันแถบเรียบของมอสเฟต หรือ Flat band voltage ซึ่งเราใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น V_{FB} มีเท่ากับสมการที่ (2.8)

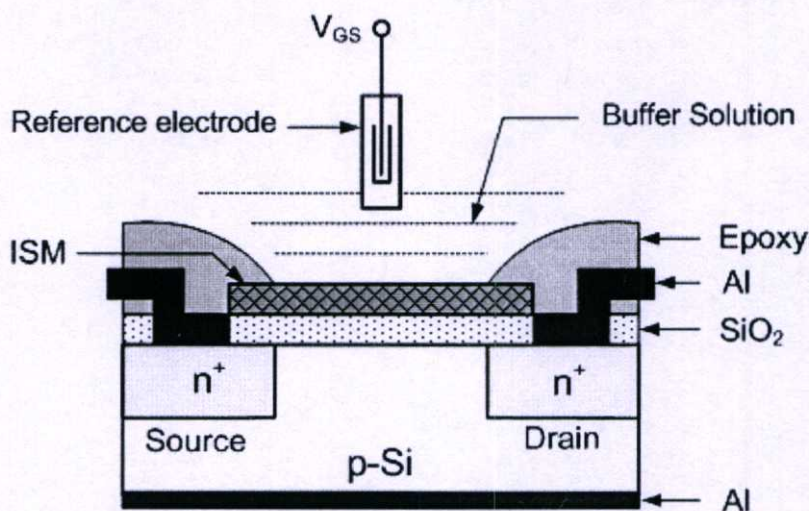
$$V_{FB (MOSFET)} = \phi_m - \phi_s \quad (2.8)$$

เมื่อ ψ_F	คือ ศักย์เฟอร์มิ
ϕ_m	คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_s	คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
Q_{dm}	คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงสุด

2.5 อุปกรณ์ไอสเฟท

2.5.1 โครงสร้างอุปกรณ์ไอสเฟท

โครงสร้างของอุปกรณ์ไอสเฟท (Ion Sensitive Field Effect Transistor: ISFET) โดยพื้นฐานถูกพัฒนามาจากโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ หรือมอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแชนแนล ซึ่งพัฒนาให้สามารถตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่างได้โดยการกำจัดชั้นเกตโลหะออกเพื่อให้ชั้นเกตออกไซด์ หรือชั้นฉนวนสัมผัสกับสารละลายโดยตรง และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิด Ag-AgCl แทนชั้นเกตโลหะแสดงดังรูปที่ 2.18 โดยที่ชั้นเกตออกไซด์ หรือชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน (Ion Sensing Membrane: ISM) เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างไอสเฟท และมีการใช้โครงสร้างชั้นเกตฉนวนมากกว่าหนึ่งชั้น สำหรับชั้นฉนวนที่สัมผัสกับฐานรองซิลิคอน นิยมใช้ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปลูกจากกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน เนื่องจากคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนบนซิลิคอนไดออกไซด์ มีความสำคัญมากสำหรับการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างเนื่องจากเป็นชั้นป้องกันไม่ให้ไอออนทะลุผ่านเข้าไปยังรอยสัมผัสของซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอน กล่าวคือสามารถแสดงถึงความสามารถในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือปริมาณไอออนในสารละลาย ตัวอย่างของชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเหนือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เช่น ซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) อะลูมินา (Al_2O_3) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และแทนทาลัมเพนทอกไซด์ (Ta_2O_5) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์ไอสเฟทอีกอย่างหนึ่งคือ การบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการให้ชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเท่านั้นที่สัมผัสกับสารละลาย



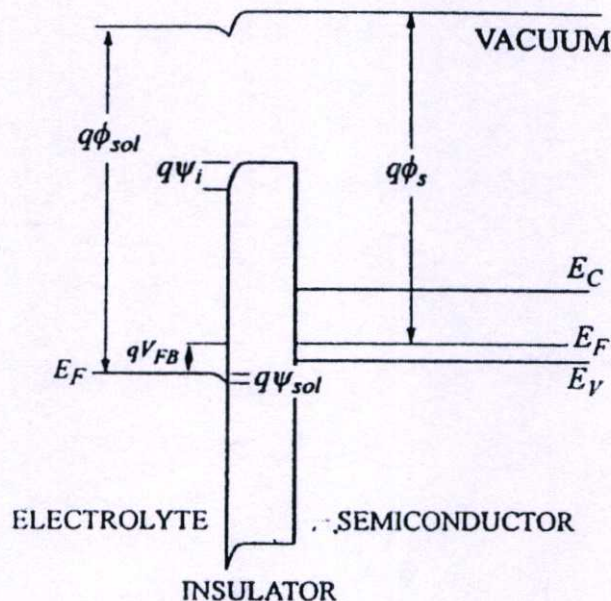
รูปที่ 2.18 แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์ไอสเฟท

2.5.2 คุณสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์ออสเฟท

หลักการการทำงานของอุปกรณ์ออสเฟท ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ โครงสร้าง EIS สามารถอธิบายได้โดยการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์มอสเฟท ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ โครงสร้าง MIS [24] อุปกรณ์ออสเฟทเกิดจากอุปกรณ์มอสเฟทที่ถูกแยกเกตโลหะออกจากตัวอุปกรณ์เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง แล้วนำไปจุ่มในสารละลาย โดยให้บริเวณชั้นฉนวนหรือเมมเบรนที่ไวต่อไอออนสัมผัสกับสารละลาย

การทำงานของอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดขณะที่อยู่ในช่วงไม่อิ่มตัว (non-saturated) ค่าของกระแส (I_{DS}) จะขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชัน (μ_n) ความจุไฟฟ้าของฉนวน และอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของช่องทางเดินของกระแส นอกจากนี้ยังขึ้นกับค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับฟังก์ชันงานของวัสดุ (ϕ)

ค่าแรงดันขีดเริ่มสำหรับอุปกรณ์มอสเฟทจะมีความคงที่ ส่งผลให้กระแส (I_{DS}) จะขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่เกต (V_{GS}) เพียงอย่างเดียว เมื่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างเดรนกับซอส (V_{DS}) มีค่าคงที่ สำหรับอุปกรณ์ออสเฟทค่าแรงดันขีดเริ่มไม่ได้เป็นค่าตัวแปรที่คงที่ เปรียบเทียบได้จากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิง-สารละลาย-ฉนวน [25-26] ซึ่งศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายจะเปลี่ยนแปลง เมื่อชั้นฉนวนสัมผัสกับสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ทำให้สามารถหาค่าการตอบสนองจากการพิจารณาค่าแรงดันขีดเริ่มได้ ดังนั้นระดับพลังงานต่างๆ สามารถอธิบายได้โดยอาศัยแผนภาพแถบพลังงานดังในรูปที่ 2.19 [23]



รูปที่ 2.19 ลักษณะแถบพลังงานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ

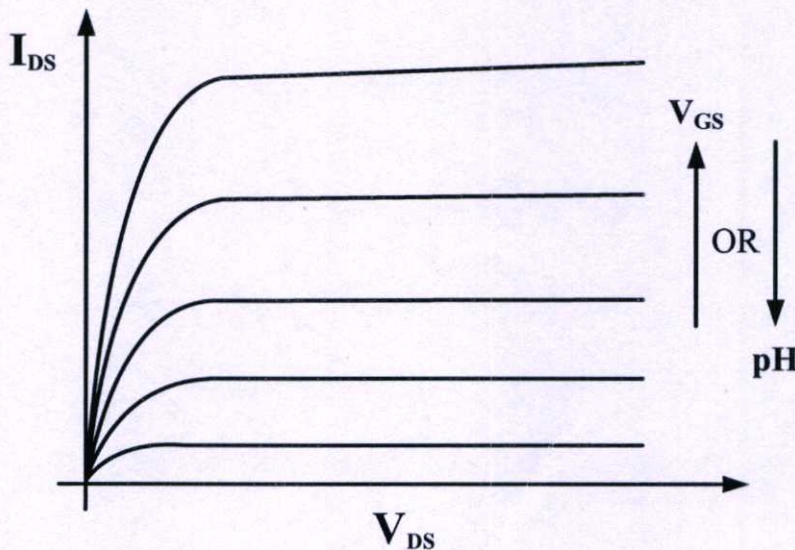
เมื่อพิจารณาลักษณะแถบพลังงานในรูปที่ 2.20 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าแรงดันแถบเรียบของอุปกรณ์ไอส์เฟทได้ดังสมการที่ (2.13) [35]

$$V_{FB(ISFET)} = \phi_{sol} - \phi_s - \psi_i + \psi_{sol} \quad (2.13)$$

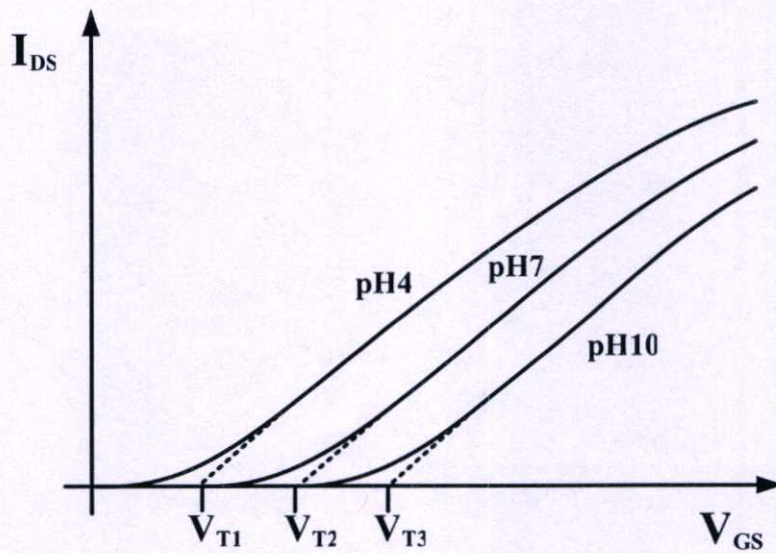
- เมื่อ ϕ_{sol} คือ ฟังก์ชันงานของสารละลาย
 ϕ_s คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
 ψ_i คือ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อชั้นฉนวนกับสารละลาย
 ψ_{sol} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมด้านสารละลายแต่ละชนิด

นอกจากนี้ความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนไอออนไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมด้านสารละลายแต่ละชนิด แต่จะขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อชั้นฉนวนกับสารละลาย ผลของการที่ไอออนสัมผัสกับผิวหน้าของชั้นฉนวน ส่งผลให้กระแสเดรนของอุปกรณ์ไอส์เฟท เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ ψ_i ส่งผลให้แรงดัน V_{FB} และ V_T มีการเปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ($I_{DS} - V_{DS}$) ของอุปกรณ์ไอส์เฟท เมื่อแรงดันเกตหรือแรงดันที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 2.20 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต ($I_{DS} - V_{GS}$) ในสารละลายค่า pH ต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 คุณสมบัติ $I_{DS} - V_{DS}$ ที่แรงดัน V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ



รูปที่ 2.21 คุณสมบัติ I_{DS} - V_{GS} ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ที่ V_{DS} มีค่าคงที่

จากกราฟในรูปที่ 2.20 สามารถแสดงค่าของแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ได้ เนื่องจากแรงดันเกต (V_{GS}) ที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม กระแสเดรนจะมีค่าประมาณศูนย์ และเมื่อแรงดันเกตสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม ทำให้มีกระแสเดรนค่าต่างๆ นอกจากนี้กราฟ I_{DS} - V_{GS} ในรูปที่ 2.21 ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับค่า pH ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างได้ เนื่องจากแรงดันขีดเริ่มจะแปรผันกับค่า pH หรือค่าความเป็นกรด-ด่าง นั้นเอง

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

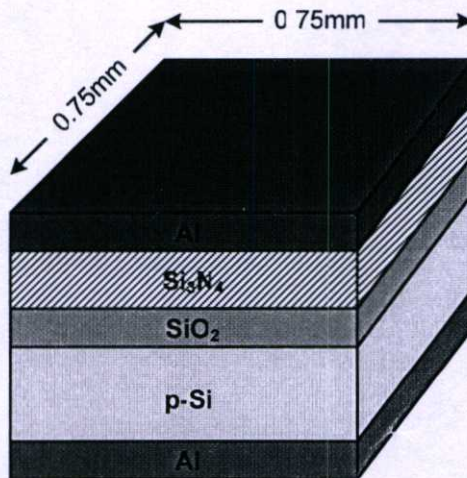
3.1 การวัดคุณลักษณะความจุไฟฟ้า - แรงดันของโครงสร้าง MIS และ EIS

การวัดคุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน หรือ C-V (Capacitance-voltage characteristic) ของโครงสร้าง MIS และ EIS ที่สร้างขึ้นมีความสำคัญมาก เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า และการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ที่ใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

3.1.1 โครงสร้าง MIS

3.1.1.1 การสร้างโครงสร้าง MIS

โครงสร้าง MIS ที่นำมาทำการทดสอบถูกสร้างขึ้นบนแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี ระบาย (100) สภาพต้านทานไฟฟ้า $5 \Omega\text{-cm}$ โดยมีฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างจากกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation) หนา 10 nm จากนั้นสร้างขึ้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการ LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ที่ความหนา 30, 50 และ 70 nm และมีอะลูมิเนียมหนา 1000 nm เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน แล้วทำการซินเตอร์ (Sintering) ที่อุณหภูมิ 420°C ในบรรยากาศไนโตรเจนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นฉนวน

3.1.1.2 การวัดคุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดัน เพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ที่ความหนา 30, 50 และ 70 nm

นำชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการวัดลักษณะเฉพาะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน ด้วยเครื่องวัด Hewlett packard รุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer ใช้ร่วมกับ โปรแกรม EasyEXPERT โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากวงจรแบบขนาน ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. voltage) จาก -5 ถึง 5 V พร้อมกับการให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. voltage) 30 mV ความถี่ 1 kHz คงที่ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ในช่วงแรงดันจาก -5 ถึง 5 V จะไม่แปรผันกับความถี่ที่ 1 kHz แล้วทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงการทำงานของโครงสร้าง MIS เข้าสู่สถานะต่างๆ คือ ภาวะแอคคิวมูเลชัน (Accumulation) , ภาวะดีพลีชัน (Depletion) และภาวะอินเวอร์ชัน (inversion)

จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ ($\epsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}$) จากค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอคคิวมูเลชัน (C_i) โดยใช้สมการ

$$\frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_{\text{SiO}_2}} + \frac{1}{C_{\text{Si}_3\text{N}_4}} \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{C_i} = \frac{t_{\text{SiO}_2}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{SiO}_2}} + \frac{t_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}} \quad (3.2)$$

โดย

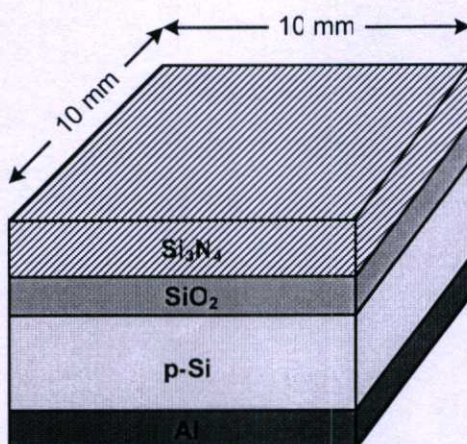
$$\begin{aligned} t_{\text{SiO}_2} &= 10 \times 10^{-9} \text{ m} \\ \epsilon_0 &= 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \\ \epsilon_{\text{SiO}_2} &= 3.9 \\ t_{\text{Si}_3\text{N}_4} &= 30, 50 \text{ และ } 70 \times 10^{-9} \text{ m} \end{aligned}$$

3.1.2 โครงสร้าง EIS

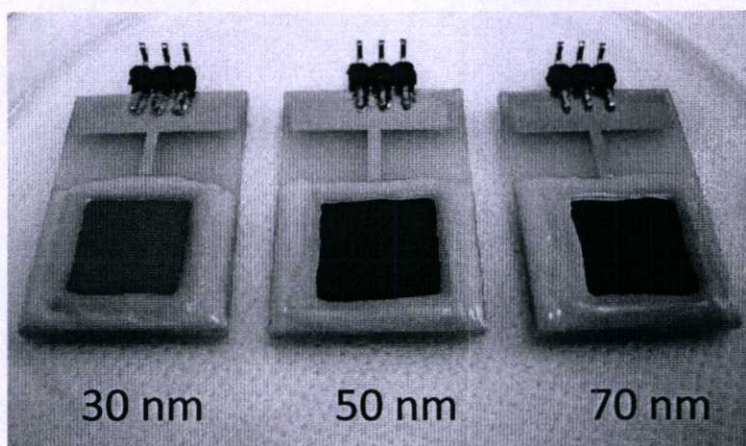
3.1.2.1 การสร้างโครงสร้าง EIS

โครงสร้าง EIS ที่นำมาทดสอบถูกสร้างขึ้นบนแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี ระบาย (100) สภาพต้านทานไฟฟ้า 5 $\Omega\text{-cm}$ มีฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างจากกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง หนา 10 nm จากนั้นสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการ LPCVD ที่ความหนา 30, 50 และ 70 nm และมีอะลูมิเนียมหนา 1000 nm เป็นขั้วไฟฟ้าต่อกับแผ่นฐานรองซิลิคอน ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 420 $^{\circ}\text{C}$ ในบรรยากาศไนโตรเจน 30 นาที ดังรูปที่ 3.2 เสร็จแล้วนำมาตัดให้ได้ขนาด

10mm×10mm แล้วนำมาติดลงบนแผ่น PCB ที่เตรียมไว้ จากนั้นทำการบรรจุภัณฑ์ด้วยอีพ็อกซี แสดงดังรูปที่ 3.3 และมีขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอีกข้างหนึ่ง



รูปที่ 3.2 โครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นฉนวน



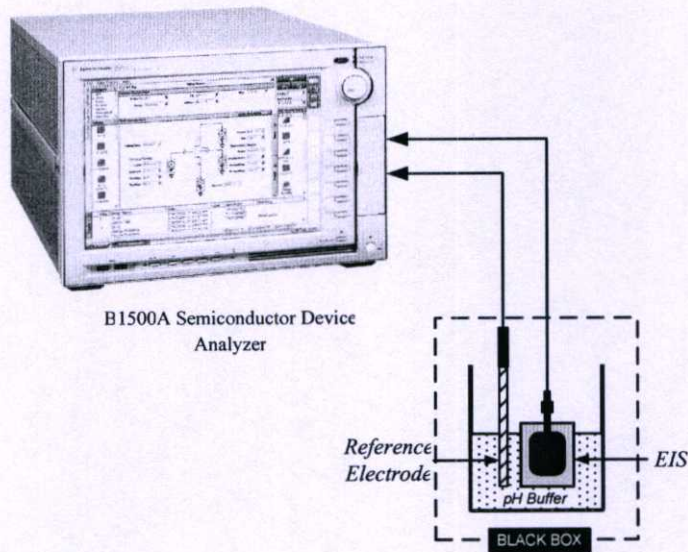
รูปที่ 3.3 โครงสร้าง EIS หลังจากการบรรจุภัณฑ์เรียบร้อยแล้ว

3.1.2.2 การวัดคุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดัน ที่มีความหนาชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เท่ากับ 30, 50 และ 70 nm เพื่อหาค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง

นำชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการวัดลักษณะเฉพาะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน ด้วยเครื่องวัด Hewlett packard รุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer ใช้ร่วมกับโปรแกรม EasyEXPERT การทดสอบตัวอย่างอุปกรณ์โครงสร้าง EIS ที่ความหนาฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ 30, 50 และ 70 nm ทำการ

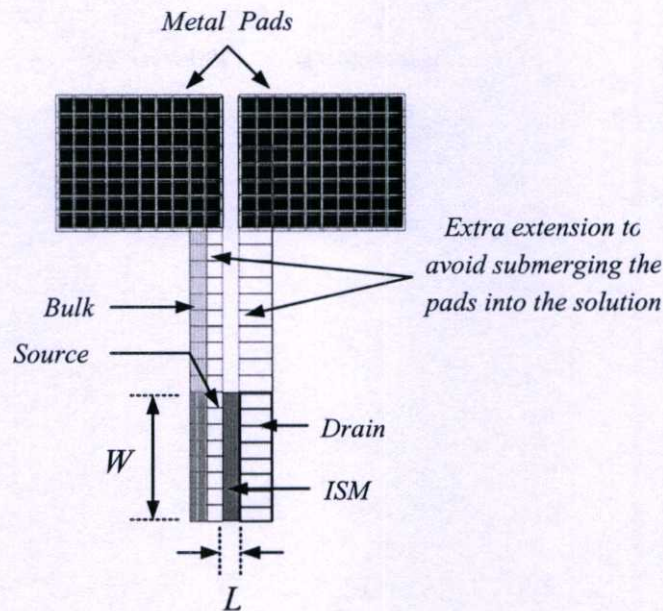
วัดในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. voltage) จาก -5 ถึง 5 V พร้อมกับการให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. voltage) 30 mV ความถี่ 1 kHz คงที่ แล้วทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ เพื่อนำไปหาค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่อไป ระบบการวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของโครงสร้าง EIS แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ระบบการวัดคุณสมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS

3.2 การออกแบบลวดลายสำหรับการสร้างอุปกรณ์ไอสเฟท

การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ ISFET จะคล้ายกับ MOSFET ต่างกันที่ไม่มีชั้นของเกต โลหะบนฉนวนออกไซด์ ขั้วซอส และฐานรองถูกต่อร่วมกันด้วยอะลูมิเนียม ตัวอุปกรณ์ ISFET ที่ออกแบบมีหลักการทำงานเหมือนกับ n-channel MOSFET โดยขั้วซอส และเดรนถูกเติมสารเจือด้วยอาร์เซนิก (n^+) และฐานรองที่เป็นขั้วต่อถูกเติมสารเจือด้วยโบรอน (p^+) ข้อมูลในการออกแบบ ถูกใช้สำหรับการสร้างกระจกต้นแบบด้วยเครื่อง DWL ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้กระจกต้นแบบ จำนวน 7 แผ่น โดยออกแบบให้มีขนาดของขั้วไฟฟ้าทั้งสองเป็น $1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ ส่วนขนาดของแขนแนลมีควมยาว L เท่ากับ $5 \mu\text{m}$ ระยะความกว้าง W มีค่าเป็น $500 \mu\text{m}$, $2000 \mu\text{m}$ และ $4000 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 3.5

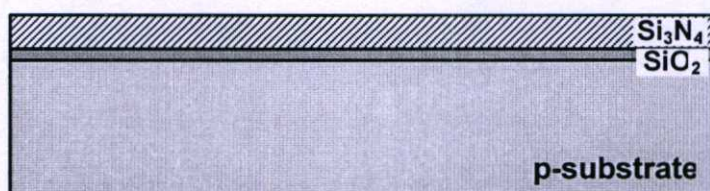


รูปที่ 3.5 ภาชนะดินแบบสำหรับสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ ISFET

3.3 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ ISFET

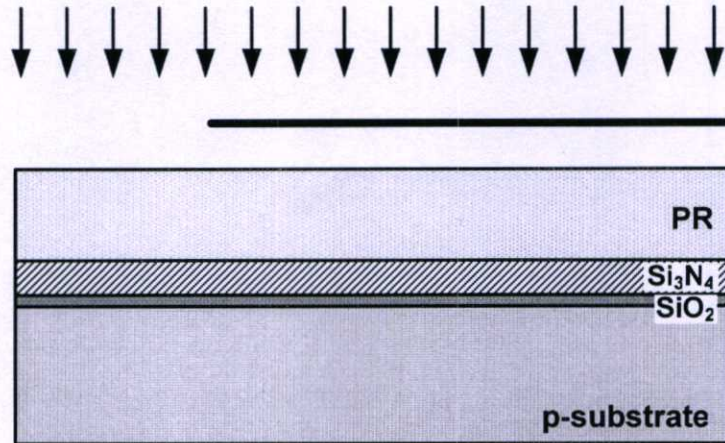
แนวคิดการสร้างอุปกรณ์ ISFET โดยแท้จริงแล้วก็คืออุปกรณ์ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) ซึ่งได้ลอกเอาชั้นเกตโลหะออก เมื่อนำอุปกรณ์สัมผัสกับสารละลาย ศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นจนวนกับสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับปริมาณไฮโดรเจนไอออนในสารละลายแต่ละชนิด ชั้นออกไซด์บริเวณเกตทำหน้าที่เป็น ion sensing membrane (ISM) เราเลือกใช้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ชนิดพี (100) สภาพต้านทานไฟฟ้า 5 Ω -cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วเป็นแผ่นฐานรอง โดยมีขั้นตอนกระบวนการสร้างดังนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและไขมันด้วยสารเคมี
2. สร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์จากกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งซึ่งมีความหนา 25 nm เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้น Interfacial layer จากนั้นสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เหนือฟิล์ม SiO_2 ด้วยกระบวนการ LPCVD ซึ่งมีความหนา 150 nm ดังรูปที่ 3.6

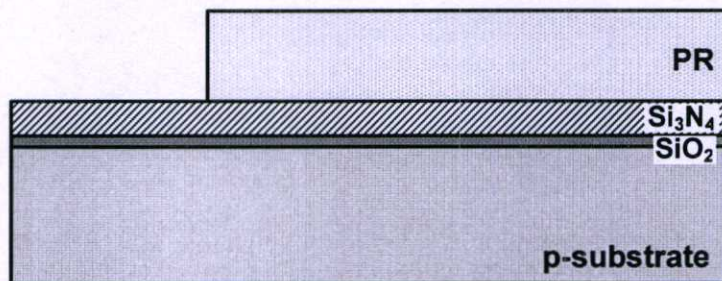


รูปที่ 3.6 ภาพจำลองการปลูกฟิล์ม SiO_2 และ Si_3N_4 บนแผ่นผลึกซิลิคอนตามลำดับ

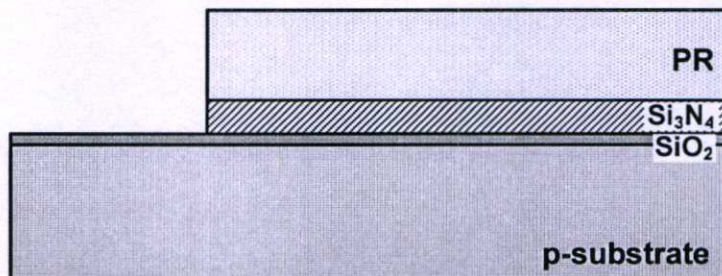
3. สร้างลวดลายที่ 1 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี สำหรับกั๊ดชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ดังรูปที่ 3.7, 3.8, 3.9 และ 3.10 เพื่อสร้างชั้น Field oxide หนา 650 nm ด้วยเทคนิค Local Oxidation (LOCOS) ของ Si ดังรูปที่ 3.11 เพื่อทำการแยกส่วนพื้นที่ทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว เสร็จแล้วทำการลอกชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ออก โดยใช้วิธีการ Wet etching ด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ดังรูปที่ 3.12



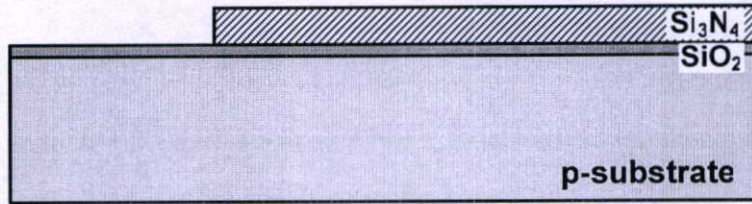
รูปที่ 3.7 ภาพจำลองการฉายแสงผ่านกระจกโฟโตนิกส์ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง



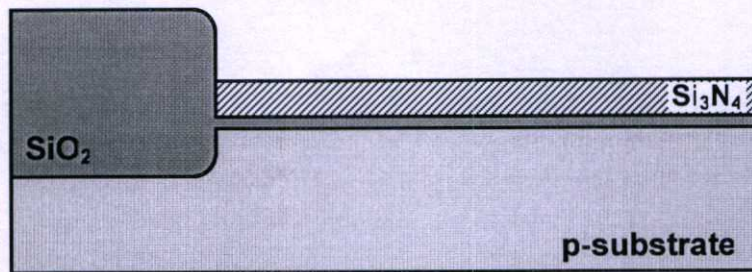
รูปที่ 3.8 ภาพจำลองหลังจากการล้างน้ำยาไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



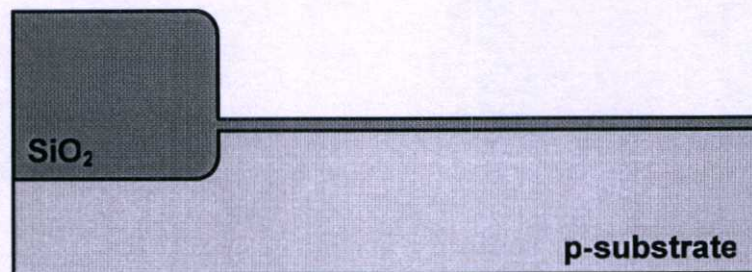
รูปที่ 3.9 ภาพจำลองหลังจากกระบวนการกั๊ดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้วยวิธีการ Dry etching



รูปที่ 3.10 ภาพจำลองหลังจากกระบวนการลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

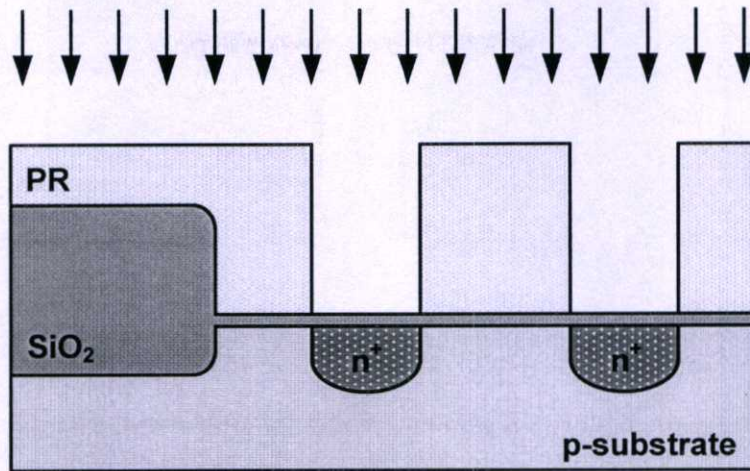


รูปที่ 3.11 ภาพจำลองชั้น Field oxide ที่สร้างด้วยเทคนิค Local Oxidation (LOCOS)



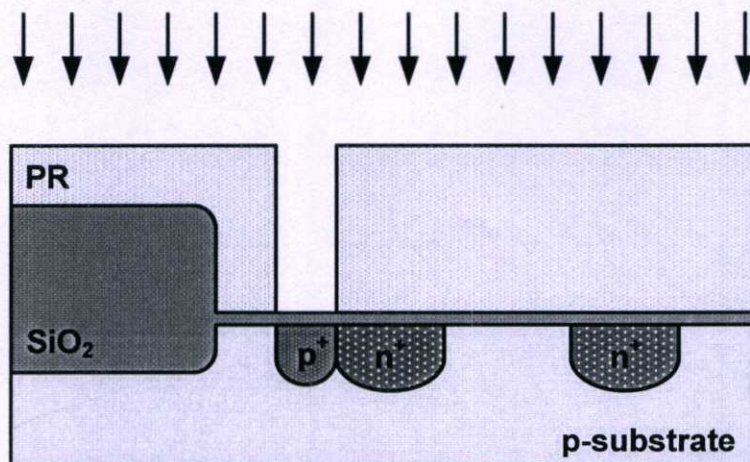
รูปที่ 3.12 ภาพจำลองชั้น Field oxide หลังจากลอกชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้วยวิธีการ Wet etching

4. สร้างลวดลายที่ 2 ด้วยกระบวนการโฟโวลติโกราฟี สำหรับกำหนดบริเวณสร้างขั้วขอส และ เทรน ของอุปกรณ์ ISFET เจือสารชนิดเอ็นอย่างเข้มข้น (n^+) ลงบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี ด้วยการ ยิงฝังประจุอาร์เซนิกไอออน ปริมาณสารเจือ $5.0\text{E}15$ ions/cm² ดังรูปที่ 3.13 เสร็จแล้วลอกชั้นฟิล์ม น้ำยาไวแสงออกด้วยสารเคมี Piranha



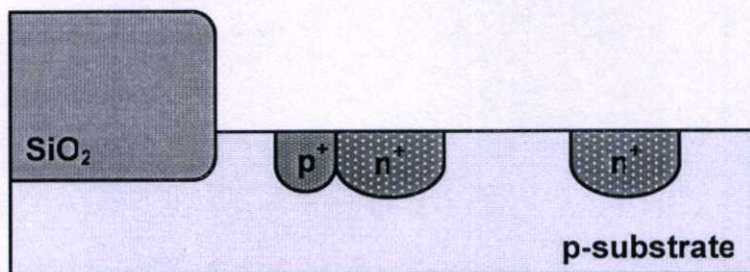
รูปที่ 3.13 ภาพจำลองกระบวนการยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็นอย่างเข้มข้น (n^+) บริเวณขั้วซอส และเดรนของอุปกรณ์ ISFET

5. สร้างลวดลายที่ 3 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี สำหรับกำหนดพื้นที่เจือสารชนิดพี (p^+) เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกกับฐานรองซิลิคอน (Si substrate) ด้วยการยิงฝังประจุโบรอนไอออน ปริมาณสารเจือ $3.0E15$ ions/cm² ดังรูปที่ 3.14 เสร็จแล้วลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงออกและทำการ Anneal ที่อุณหภูมิ 900 °C ในบรรยากาศไนโตรเจน 40 นาที เพื่อให้อะตอมสารเจือที่ถูกยิงฝังประจุ สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในผลึกซิลิคอนได้ดีกว่าเดิม และอยู่ในตำแหน่งที่มั่นคงภายในผลึก



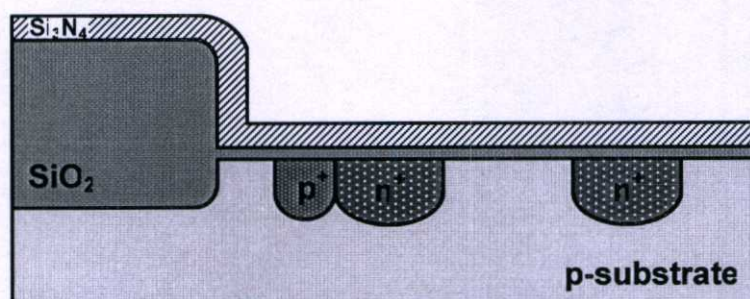
รูปที่ 3.14 ภาพจำลองกระบวนการยิงฝังประจุสารเจือชนิดพีเข้มข้น (p^+) เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกกับเนื้อซิลิคอน

6. ลอกชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ออกดังรูปที่ 3.15 เพื่อที่จะสร้างชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนด้วยฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์



รูปที่ 3.15 ภาพจำลองกระบวนการลอกชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์

7. ก่อนที่จะสร้างชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนด้วยฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ เราต้องสร้างฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์หนา 10 nm ก่อน เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้น interfacial layer ช่วยในการลดความเครียด (strain) ระหว่างแผ่นผลึกซิลิกอนกับฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ แล้วจึงสร้างฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์หนา 30 nm ด้วยเทคนิค LPCVD ดังรูปที่ 3.16

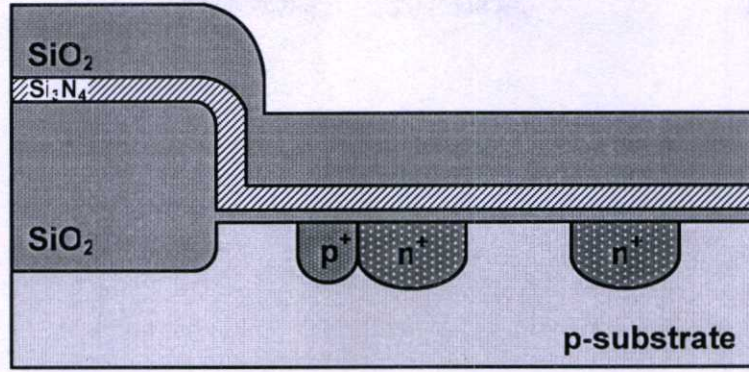


รูปที่ 3.16 ภาพจำลองชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนที่สร้างขึ้นจากฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์หนา 30 nm เหนือฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์หนา 10 nm

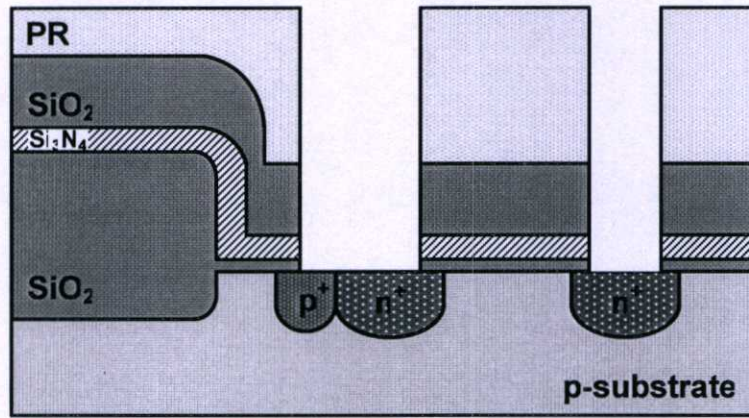
8. ทำการสร้างชั้นฟิล์มฉนวนด้วยฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์หนา 1,000 nm ด้วยเทคนิค LPCVD แสดงดังรูปที่ 3.17

9. สร้างลวดลายที่ 4 ด้วยกระบวนการโฟโวลติโซกราฟี สำหรับกำหนดพื้นที่บริเวณช่องสัมผัส (Contact hole) จากนั้นทำการกัดช่องสัมผัส เดรน, ซอส และฐานรอง (บริเวณซอส และฐานรองมีการเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 3.18) เสร็จแล้วลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงออก

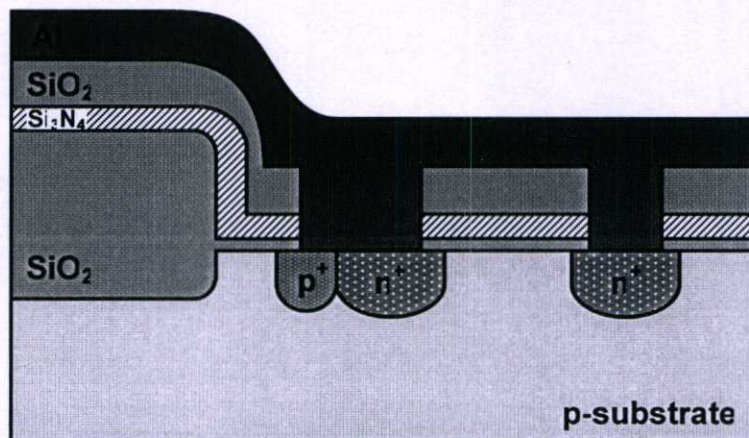
10. เคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการสปัตเตอริงค์ (RF Sputting) ความหนา 1000 nm ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.17 ภาพจำลองกระบวนการสร้างฟิล์มฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 nm

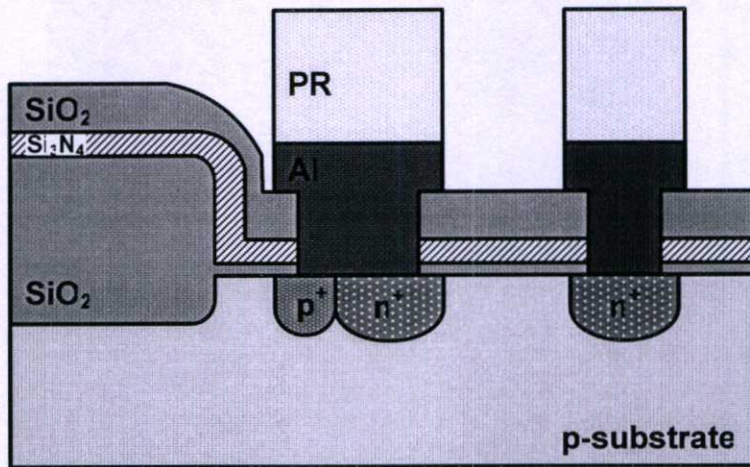


รูปที่ 3.18 ภาพจำลองกระบวนการกัดพื้นที่บริเวณช่องสัมผัส (Contact hole)



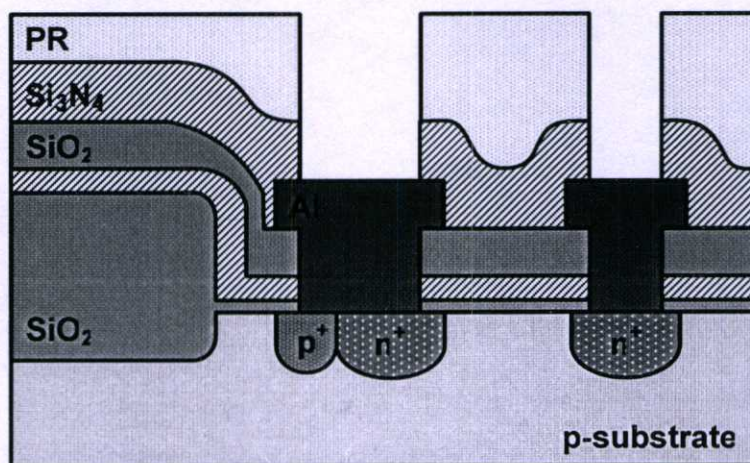
รูปที่ 3.19 ภาพจำลองชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมเคลือบอยู่ทั่วผิวของแผ่นผลึก และถูกเติมอยู่ในพื้นที่บริเวณช่องสัมผัสซึ่งเชื่อมต่อกับตัวอุปกรณ์

11. สร้างลวดลายที่ 5 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.20 เสร็จแล้วลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงออกแล้วทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 420 °C ในบรรยากาศไนโตรเจน 30 นาที เพื่อให้เกิดเป็นอัลลอยของชั้นซิลิกอน และชั้นอะลูมิเนียม (Si-Al Alloy)



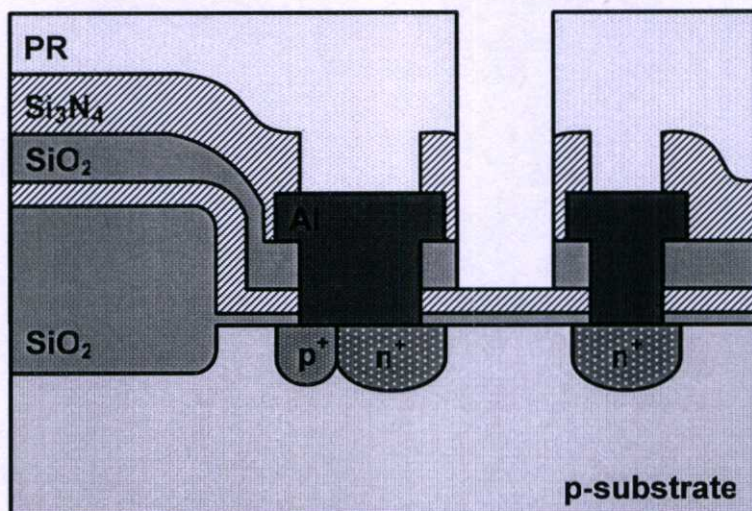
รูปที่ 3.20 ภาพจำลองขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมหลังจากกระบวนการกัด

12. เคลือบฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ด้วยเครื่องจักร PECVD เพื่อสร้างเป็นชั้นป้องกันผิวหน้าของแผ่นผลึก (passivation layer) จากนั้นสร้างลวดลายที่ 6 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อเปิดชั้นป้องกันผิวหน้าบริเวณส่วน Bonding Pad ซึ่งเป็นบริเวณที่จะมีการต่อเชื่อมตัวอุปกรณ์ออกไปใช้งานภายนอก ดังรูปที่ 3.21 เสร็จแล้วลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงออก

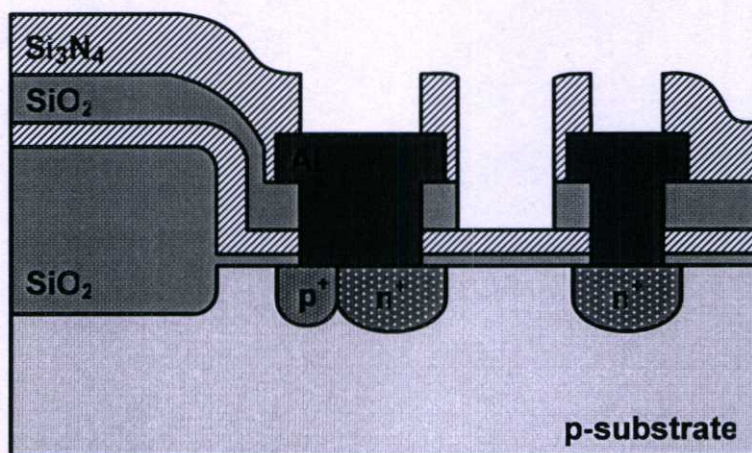


รูปที่ 3.21 ภาพจำลองชั้นป้องกันผิวหน้าของแผ่นผลึก

13. สร้างลวดลายที่ 7 ซึ่งเป็นมาสก์สุดท้ายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อเปิดชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน โดยการกัดฟิล์ม Si_3N_4 และ SiO_2 จนถึงชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ที่ใช้เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ดังรูปที่ 3.22 สุดท้ายลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงออก ดังรูปที่ 3.23 เป็นการสิ้นสุดกระบวนการ



รูปที่ 3.22 ภาพจำลองอุปกรณ์ ISFET หลังจากเปิดชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน



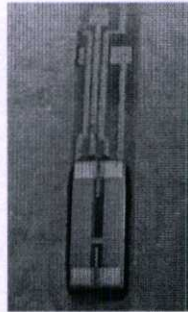
รูปที่ 3.23 ภาพจำลองอุปกรณ์ ISFET หลังจากกระบวนการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว

3.4 กระบวนการบรรจุภัณฑ์

การบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ขนาดเล็ก และต้องเปิดเฉพาะพื้นที่บริเวณเกตสัมผัสกับสารละลาย โดยป้องกันบริเวณขั้วไฟฟ้าและแผ่นฐานรองไม่ให้สัมผัสกับสารละลายที่ต้องการวัด

การห่อหุ้ม (Encapsulation) อุปกรณ์ ISFET ต้องคำนึงถึงความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมจากสารละลายที่ทำการวัด ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของ ความผิดพลาดในกระบวนการวัด และทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง วัสดุที่เลือกใช้ต้องมีความทนทานต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ความดันทานไฟฟ้าสูง และขึ้นรูปได้ง่าย โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

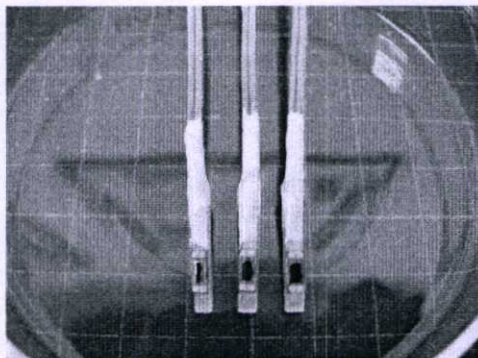
1. นำแผ่นเวเฟอร์ซิลิกอนขนาด 6 นิ้วที่ผ่านกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไอสเฟท มาทำการตัดแยกเป็นชิพขนาด $4 \times 5 \text{ mm}^2$ แล้วติดตั้งเข้ากับแผ่น PCB ด้วย อีพ็อกซี่ ยี่ห้อ Pattex เบอร์ Duro N24 เสร็จแล้วทำการเชื่อมต่อลวดทอง ชิ้นงานที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ชิ้นงานที่ตัดแยกเป็นชิพ และเชื่อมต่อลวดทองเรียบร้อยแล้ว

2. นำอุปกรณ์ไอสเฟทที่ผ่านกระบวนการเชื่อมต่อลวดทองกับ PCB แล้ว มาเชื่อมต่อกับสายไฟเพื่อใช้เป็นสายนำสัญญาณ

3. ใช้อีพ็อกซี่ทาบริเวณขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับสารละลาย และทาอีพ็อกซี่โดยรอบอุปกรณ์ไอสเฟท เพื่อป้องกันบริเวณตัวอุปกรณ์ไอสเฟทสัมผัสกับสารละลาย ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดกระแสรั่วภายในตัวอุปกรณ์ ข้อควรระวังในการปฏิบัติงานขั้นตอนนี้คือระวังอีพ็อกซี่เปื้อนบริเวณเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ซึ่งเป็นส่วนที่มีผลต่อการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง อุปกรณ์ที่ผ่านการหุ้มด้วย อีพ็อกซี่ แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ชิ้นงานที่ผ่านการหุ้มด้วย อีพ็อกซี่ เรียบร้อยแล้ว

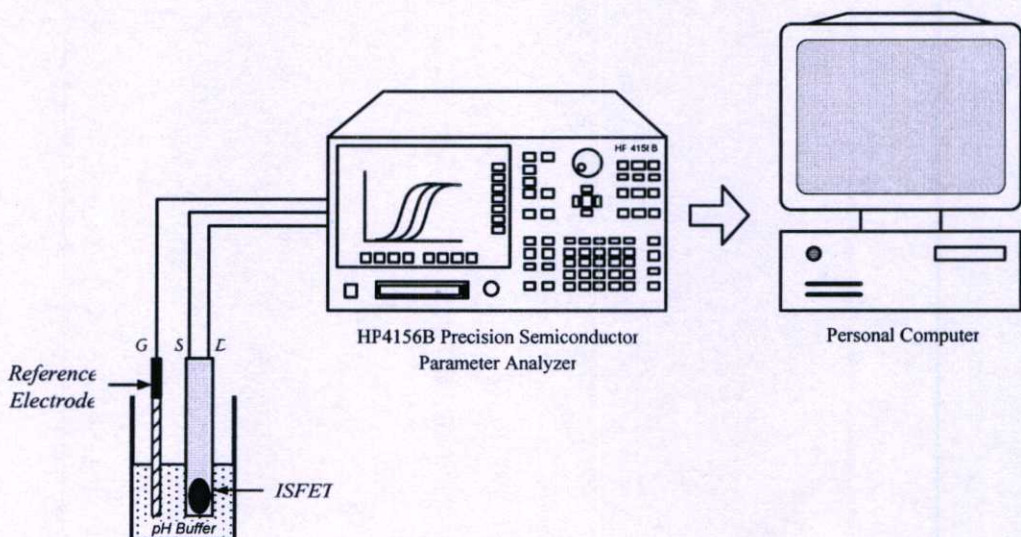
3.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการการทดลองต่างๆของตัวอุปกรณ์ ISFET สำหรับผลการทดลองจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

3.5.1 การทดสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

ในทางปฏิบัติขั้วไฟฟ้าอ้างอิง หรือ Reference Electrode เป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำอุปกรณ์ ISFET ไปใช้งานสำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลาย ช่วงแรกการนำอุปกรณ์ ISFET ไปใช้วัดค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายยังไม่ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง แต่อย่างไรก็ตามได้มีการทดลองนำขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไปใช้วัดในสารละลาย โดยได้พิสูจน์ให้เห็นว่าการวัดในสารละลายให้ได้ค่าที่เที่ยงตรง และมีเสถียรภาพ ต้องควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่โดยการใส่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง [1]

ในการทดสอบขั้วไฟฟ้าโลหะชนิดต่าง ๆ อันได้แก่ ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) ตะกั่ว (Pb) และ เหล็ก (Fe) เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) โดยการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันด้วยเครื่องวัด HP4156B Precision Semiconductor Parameter Analyzer ซึ่งใช้ร่วมกับโปรแกรม Interactive Characteristics Software (ICS) โดยป้อนแรงดัน V_{DS} จาก 0-2 V แล้ววัดค่ากระแส I_{DS} ที่แรงดันเกต V_{GS} คงที่เท่ากับ 0 , 0.6 , 1.2 , 1.8 และ 2.4 V ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET

การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดัน $I_{DS}-V_{DS}$ ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแต่ละชนิด ในสารละลายตัวอย่าง ค่า pH 4 , 7 และ 10 ทำการทดสอบการวัด 2 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 5 นาที จากนั้นนำผลการทดสอบของค่ากระแสครนที่วัดได้ มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแต่ละชนิดด้วยสมการที่ 3.3

$$\%error = \left| \frac{M_2 - M_1}{M_1} \right| \times 100\% \quad (3.3)$$

โดยที่ $M_1 =$ ผลการทดสอบครั้งที่ 1
 $M_2 =$ ผลการทดสอบครั้งที่ 2

3.5.2 การวัดกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์ ISFET

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบถึงปริมาณกระแสรั่วจากบริเวณขั้วเกต หรือขั้วไฟฟ้าอ้างอิง กับส่วนของซอส (Source) และชั้นฐานรอง (Substrate) ของตัวอุปกรณ์ หลังจากการบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากปริมาณกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์ ISFET เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของวัสดุ และการบรรจุภัณฑ์

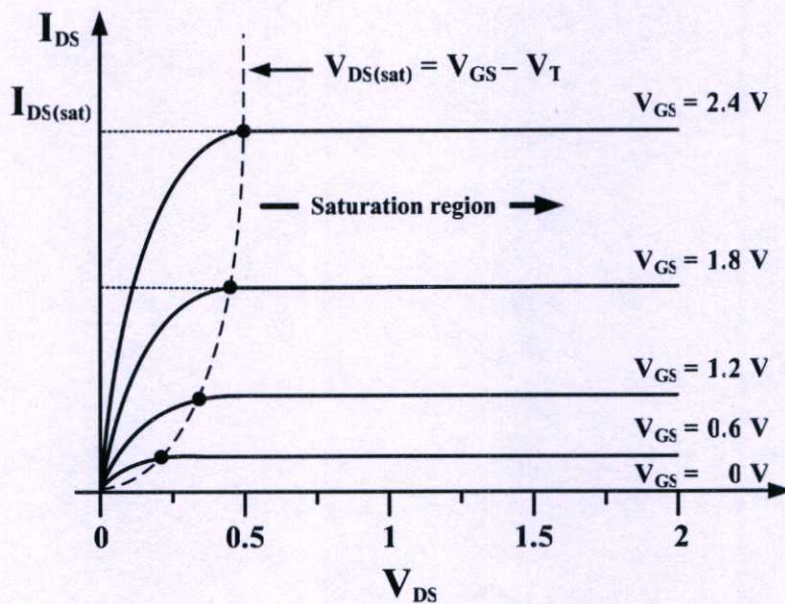
หลังจากการบรรจุภัณฑ์อุปกรณ์ ISFET เสร็จเรียบร้อยแล้ว บริเวณที่จะสัมผัสกับสารละลาย โดยตรงคือบริเวณของเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเท่านั้น ส่วนบริเวณอื่นของตัวอุปกรณ์อันได้แก่ ขั้วไฟฟ้า (PAD) ลวดทอง และฐานรองรับโดยรอบ ต้องป้องกันไม่ให้สัมผัสกับสารละลาย แต่ปัญหาที่สำคัญในกระบวนการบรรจุภัณฑ์คือ พื้นที่บริเวณเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของอุปกรณ์ อีสเพทมีขนาดเล็กมาก การขึ้นรูปหรือการห่อหุ้มด้วยวัสดุอีพ็อกซี เป็นไปด้วยความยากลำบาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบตัวอุปกรณ์ ISFET หลังจากกระบวนการบรรจุภัณฑ์ก่อนนำ อุปกรณ์ ISFET ไปใช้งาน โดยการวัดปริมาณกระแสรั่ว (I_{GS})

การวัดปริมาณกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์ ISFET เป็นการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันด้วย เครื่องมือวัด HP4156B Precision Semiconductor Parameter Analyzer เก็บข้อมูลด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ร่วมกับโปรแกรม Interactive Characteristics Software (ICS) แสดงดังรูปที่ 3.26 โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าลบกับขั้วซอส ให้ศักย์ไฟฟ้าบวกกับขั้วเดรนและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl แล้วจุ่ม ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ซึ่งป้อนแรงดัน V_{GS} เท่ากับ 0 - 2.5 V และให้แรงดันเดรน V_{DS} คงที่ เท่ากับ 0.2 V แล้วทำการวัดปริมาณกระแสรั่ว I_{GS} เปรียบเทียบกับกระแส I_{DS}

3.5.3 การศึกษาย่านการทำงาน

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องพิจารณาการทำงานของตัวอุปกรณ์ ISFET โดยพิจารณาผลของแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง หรือแรงดันขั้วเกต V_{GS} กับแรงดันเดรน V_{DS} ที่มีผลต่อกระแสเดรน I_{DS} เพื่อที่จะสามารถแบ่งย่านการทำงาน และเปรียบเทียบผลการทำงานของตัวอุปกรณ์ ในย่านต่างๆ

นำตัวอุปกรณ์ ISFET ที่ผ่านการวัดปริมาณกระแสไว้เรียบร้อยแล้ว มาทำการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดัน (I_{DS} - V_{DS}) ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 โดยป้อนแรงดัน V_{DS} จาก 0 - 2 V แล้ววัดค่ากระแส I_{DS} ที่แรงดันเกต V_{GS} คงที่เท่ากับ 0, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 V ระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระแส-แรงดัน แสดงดังในรูปที่ 3.26 จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} และแรงดัน V_{DS} ดังแสดงในรูปที่ 3.27 สามารถนำไปวิเคราะห์และพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ ISFET ในย่านต่างๆ ได้ด้วยสมการ $V_{DS(sat)} = V_{GS} - V_T$



รูปที่ 3.27 ย่านการทำงานของอุปกรณ์ ISFET ที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆ

3.5.4 การวัดคุณสมบัติเฉพาะของตัวอุปกรณ์ ISFET

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการหาคุณสมบัติเฉพาะต่างๆของตัวอุปกรณ์ อีสเฟท โดยจะทำการวัดการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ช่วงการทำงาน อัตราการครีฟท์ ฮีสเตอร์รีซิส และเวลาของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง

3.5.4.1 การวัดการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Sensitivity)

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เมื่อขนาดความกว้างของเซนแนลมีค่าต่างกัน

นำตัวอุปกรณ์ ISFET ที่บรรจุภัณฑ์เรียบร้อยแล้วทั้ง 3 แบบ ซึ่งมีขนาดความกว้างของเซนแนล (W) เท่ากับ 500, 2000 และ 4000 μm ส่วนความยาว (L) เท่ากับ 5 μm ลงที่ มาทำการวัดคุณสมบัติ กระแส - แรงดัน ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 โดยให้แรงดัน V_{GS} เท่ากับ 0 - 3 V แล้ว วัดกระแส I_{DS} เมื่อให้แรงดัน V_{DS} เท่ากับ 0.2 V ลงที่สำหรับการทำงานในย่านไม่อิ่มตัว และ 1 V สำหรับการทำงานในย่านอิ่มตัว ระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระแส-แรงดัน แสดงดังใน รูปที่ 3.26 ผลการทดลองดังกล่าวจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต เพื่อนำไป วิเคราะห์หาค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่อไป

3.5.4.2 การทดสอบช่วงการทำงาน (pH range)

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทดสอบการวัดช่วงของค่าความเป็นกรด-ด่าง สำหรับตัวอุปกรณ์ ISFET ที่สร้างขึ้น

นำตัวอุปกรณ์ ISFET แบบที่มีขนาดของความกว้างเซนแนล (W) เท่ากับ 4000 μm ส่วนความยาว (L) เท่ากับ 5 μm มาทดสอบการทำงานในสารละลายตัวอย่างค่า pH ต่างๆ โดยการวัดคุณสมบัติ กระแส-แรงดัน ($I_{DS}-V_{GS}$) เมื่อให้แรงดัน V_{GS} เท่ากับ 0 - 3 V ที่แรงดัน V_{DS} มีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 V ใน สารละลายตัวอย่างค่า pH 1, 4, 7, 10 และ 13 ระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระแส-แรงดัน แสดงดังในรูปที่ 3.26

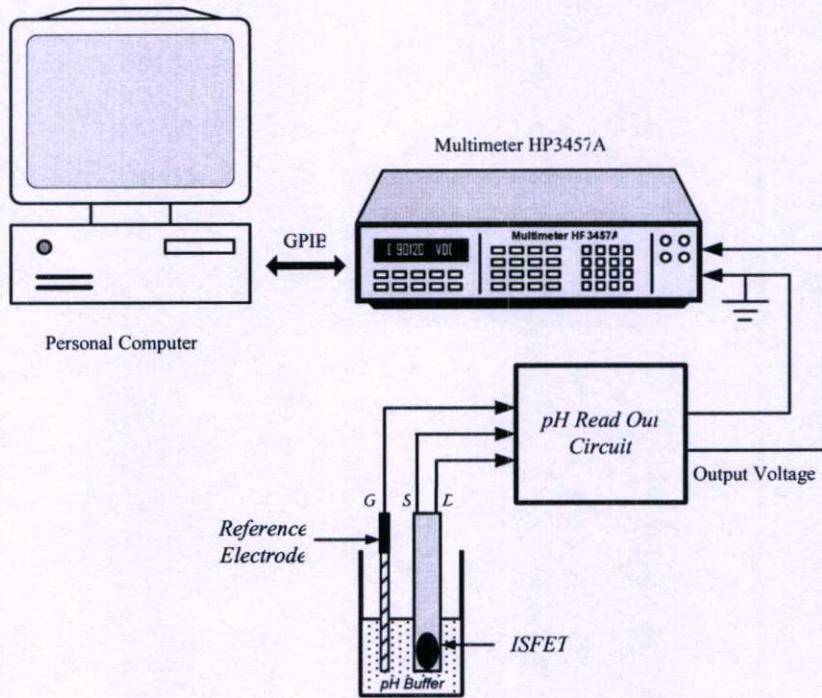
3.5.4.3 การทดสอบอัตราการครีฟท์ (Drift rate)

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบความสัมพันธ์ของแรงดันเอาท์พุท หรือแรงดันเกตที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากระยะเวลาของการวัด

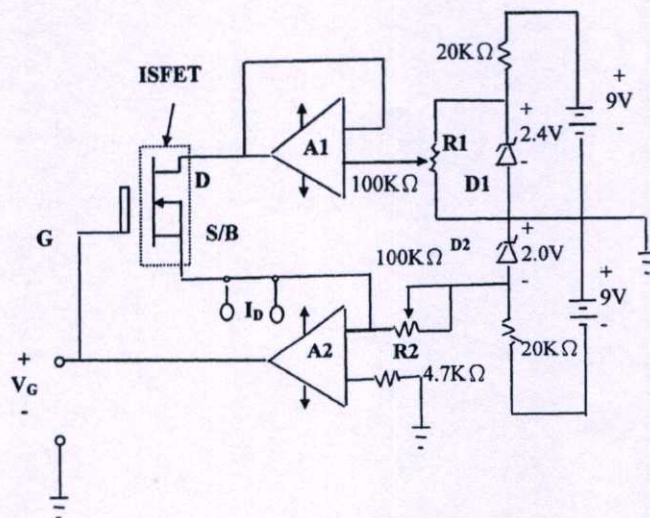
นำตัวอุปกรณ์ ISFET แบบที่มีขนาดของความกว้างเซนแนล (W) เท่ากับ 4000 μm ส่วนความยาว (L) เท่ากับ 5 μm มาทำความสะอาดบริเวณของชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนด้วยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง (Ultra Deionized Water: UDI) ก่อนนำมาทดสอบเพื่อเป็นการลดปริมาณไอออนชนิด ต่างๆที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ให้มีค่าเป็นกลางทางไฟฟ้ามากที่สุดก่อนเริ่มทำ การทดสอบ

การทดสอบอัตราการครีฟท์ เป็นการวัดคุณสมบัติของแรงดันเกตเทียบกับระยะเวลาของการวัด ซึ่งได้ทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 ชั่วโมง [27,29] ด้วย เครื่องวัด Multimeter HP3457A ต่ออยู่กับวงจรอ่านค่า pH (pH Read Out Circuit) [28] และเก็บ ข้อมูลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ร่วมกับโปรแกรม Labview แสดงดังรูปที่ 3.28

โดยที่วงจรรอ่านค่า pH จะป้อนแรงดัน V_{DS} คงที่เท่ากับ 0.2 V กระแส I_{DS} คงที่เท่ากับ 40 μA ให้กับตัวอุปกรณ์ ISFET และมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงต่อร่วมกับวงจรรอ่านค่า pH แสดงดังรูปที่ 3.29 เมื่อ R_1 ทำหน้าที่เป็นตัวปรับค่าแรงดัน V_{DS} และ R_2 ทำหน้าที่เป็นตัวปรับค่ากระแส I_{DS} และมีสัญญาณป้อนกลับจากออปแอมป์ A_2 ไปยังขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำให้แรงดัน V_{GS} มีเปลี่ยนแปลงขณะทำการวัดในสารละลายค่า pH ที่ต่างกัน



รูปที่ 3.28 ระบบวัดอัตราการครีฟท์และอีเลคโตรริซีสของอุปกรณ์ไอส์เฟท



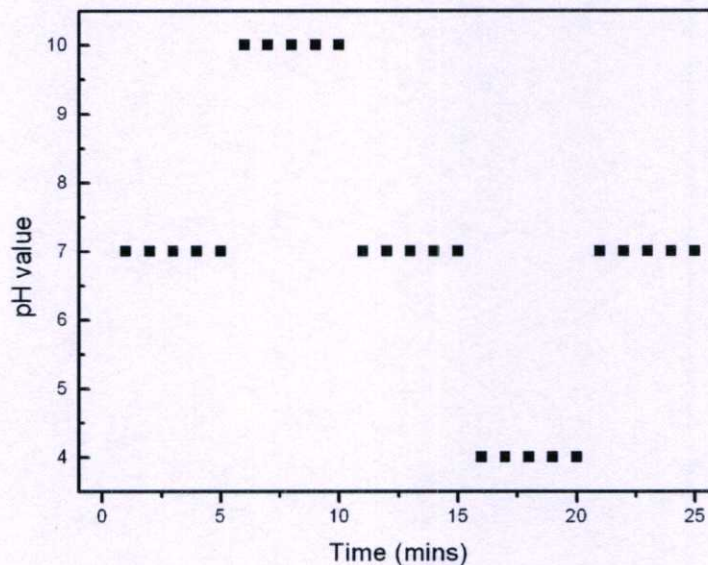
รูปที่ 3.29 วงจรรอ่านค่า pH สำหรับตัวอุปกรณ์ ไอส์เฟท

3.5.4.4 การวัดฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis)

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบผลของฮิสเตอร์รีซิสซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความคลาดเคลื่อนจากการวัดที่เกิดจากตัวอุปกรณ์ ISFET

นำตัวอุปกรณ์ ISFET แบบที่มีขนาดของความกว้างเซนแนล (W) เท่ากับ 4000 μm ส่วนความยาว (L) เท่ากับ 5 μm แฉในสารละลายตัวอย่างที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเพื่อให้ตัวอุปกรณ์มีเสถียรภาพและสมดุลทางอุณหภูมิ จากนั้นต่ออุปกรณ์เข้ากับระบบการวัดฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งมีระบบการวัดแบบเดียวกับการทดสอบอัตราการครีฟท์ แสดงดังรูปที่ 3.28

การวัดค่าฮิสเตอร์รีซิสเป็นการทดสอบในวงรอบการวัดที่เริ่มจากสารละลายตัวอย่างค่า pH7-pH10-pH7-pH4-pH7 ที่อุณหภูมิห้อง โดยในการทดสอบแต่ละค่า pH จะเก็บข้อมูลทุกๆ 1 วินาทีเป็นเวลา 300 วินาที จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาด และทำให้แห้งโดยการเป่าด้วยไนโตรเจน แล้วจึงนำไปทดสอบกับสารละลายค่า pH ค่าอื่นๆต่อไป ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาแสดงดังรูปที่ 3.30



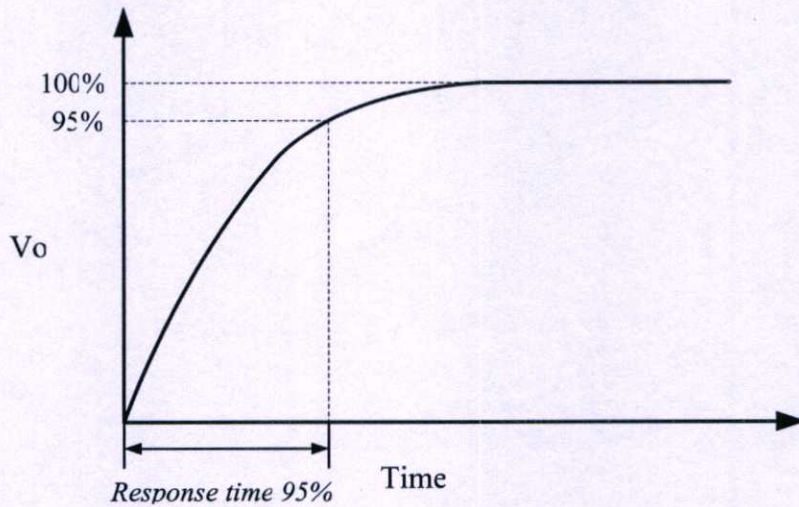
รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลา

3.5.4.5 เวลาของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (Response time)

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทดสอบเวลาของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET

นำผลการทดลองของตัวอุปกรณ์ ISFET แบบที่มีขนาดของความกว้างเซนแนล (W) เท่ากับ 4,000 μm ส่วนความยาว (L) เท่ากับ 5 μm จากในหัวข้อ 3.5.4.4 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์

ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับช่วงเวลา เพื่อหาค่าเวลาหรือความไวที่ใช้ในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังรูปที่ 3.31 โดยคิดจากขนาดของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นเป็น 95% [30]

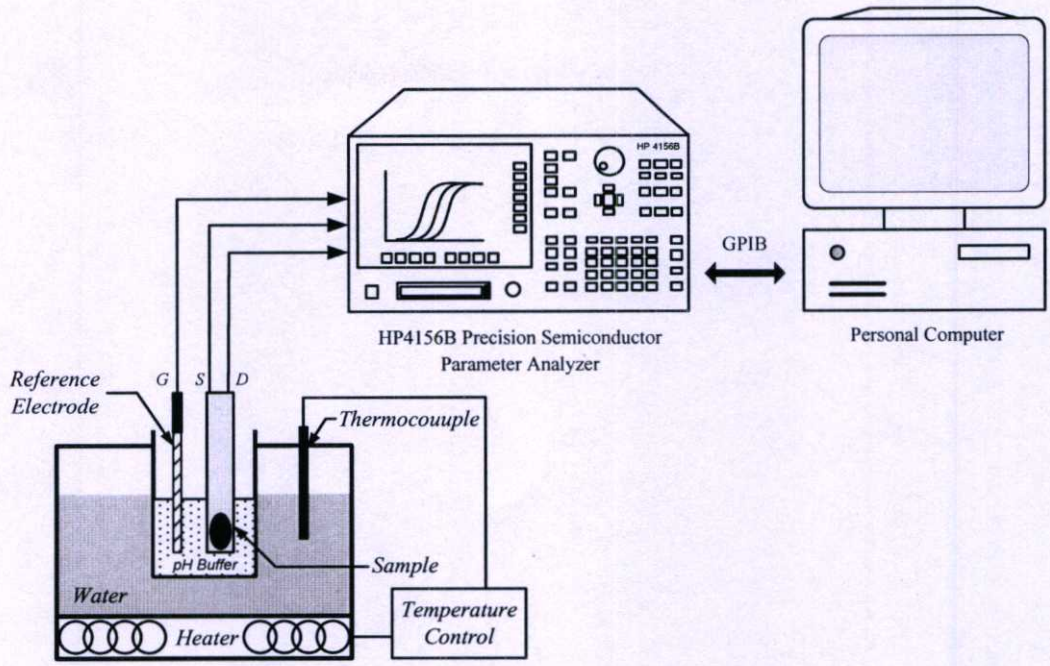


รูปที่ 3.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับเวลา

3.5.5 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ และการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่า pH ต่างๆ

นำตัวอุปกรณ์ ISFET ที่มีขนาดของความกว้างเซนแนล (W) เท่ากับ $4,000 \mu\text{m}$ ส่วนความยาว (L) เท่ากับ $5 \mu\text{m}$ มาทำการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดัน โดยต่อเข้ากับระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.32 ป้อนแรงดัน V_{GS} ตั้งแต่ 0-2 V เมื่อแรงดัน V_{DS} มีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 V ทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 7 และ 10 ที่อุณหภูมิ 25 35 45 และ 55°C จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกิดกับอุณหภูมิ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.32 ระบบการวัดผลกระทบของอุณหภูมิต่อตัวอุปกรณ์ไอส์เฟท

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากตัวอุปกรณ์ โครงสร้าง MIS EIS และ ISFET ซึ่งมีฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน โดยผลการทดลองจะนำเสนอการวัดคุณสมบัติเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MIS และ EIS การทดสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิง การวัดปริมาณกระแสรั่วของอุปกรณ์ ISFET การห่าย่นการทำงาน ของอุปกรณ์ ISFET การวัดคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ ISFET และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึง การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ ISFET

การทดลองทั้งหมดในบทนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง และใช้สารละลายตัวอย่างค่า pH มาตรฐานของบริษัท EUTECH การทดลองทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การวัดคุณลักษณะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน

4.1.1 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

นำตัวอุปกรณ์ โครงสร้าง MIS ที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการทดสอบวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. voltage) จาก -5 ถึง 5 V พร้อมกับการให้ สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. voltage) 30 mV ความถี่ 1 kHz คงที่ การคำนวณค่าความจุไฟฟ้า ของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์สามารถคำนวณได้จากค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอกคิวมูลेशन โดยใช้ สมการที่ 3.1 กำหนดให้ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์มีค่า 10 nm และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ ซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 3.9 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอกคิวมูลेशनและค่าความจุไฟฟ้า ของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ที่คำนวณได้ ที่ความหนาของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เท่ากับ 30, 50 และ 70 nm เป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอกคิวมูลेशनและค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์ม Si_3N_4

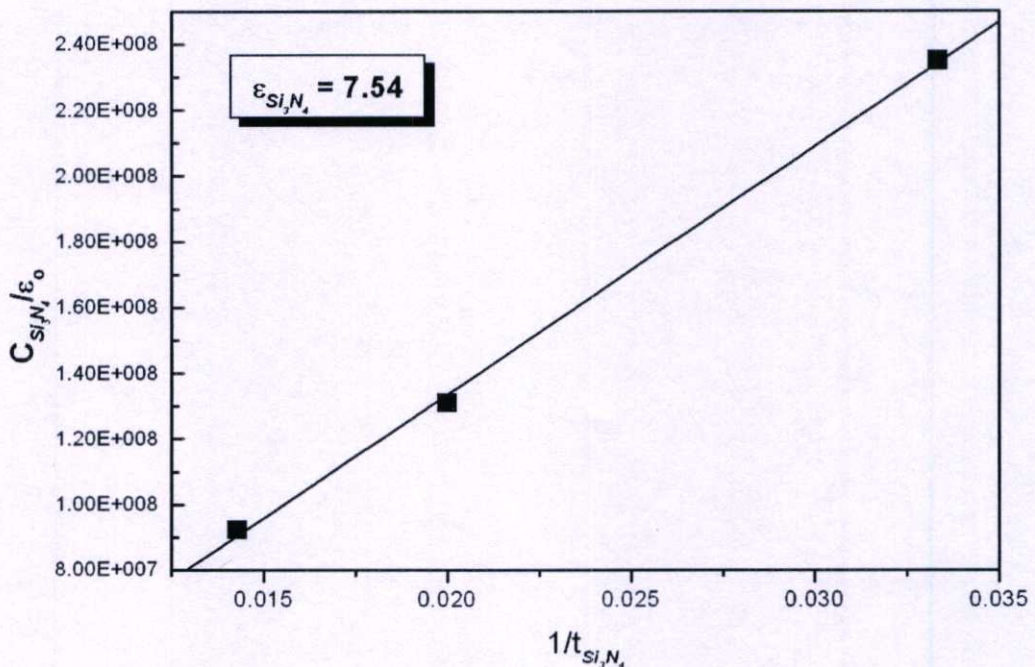
$t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ (m)	C_i (F/m^2)	$C_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ (F/m^2)
30×10^{-9}	1.30×10^{-3}	2.09×10^{-3}
50×10^{-9}	0.87×10^{-3}	1.32×10^{-3}
70×10^{-9}	0.66×10^{-3}	0.95×10^{-3}

จากการพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ที่มีความหนาเท่ากับ 30 50 และ 70 nm พบว่าค่าความจุไฟฟ้าแปรผันกับความหนาฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ กล่าวคือเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์มีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4.1

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{t} \quad (4.1)$$

และเนื่องจากฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์มีความหนาเท่ากับ 10 nm คงที่ ทำให้ความจุไฟฟ้าของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์มีค่าลดลงจะส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอกติวมูเลชันให้ลดลงด้วยเช่นกัน

จากนั้นนำค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.1 ที่ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ 30, 50 และ 70 nm มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{Si_3N_4} / \epsilon_0$ กับค่า $1/t_{Si_3N_4}$ เพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ตลอดช่วงความหนาของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.1



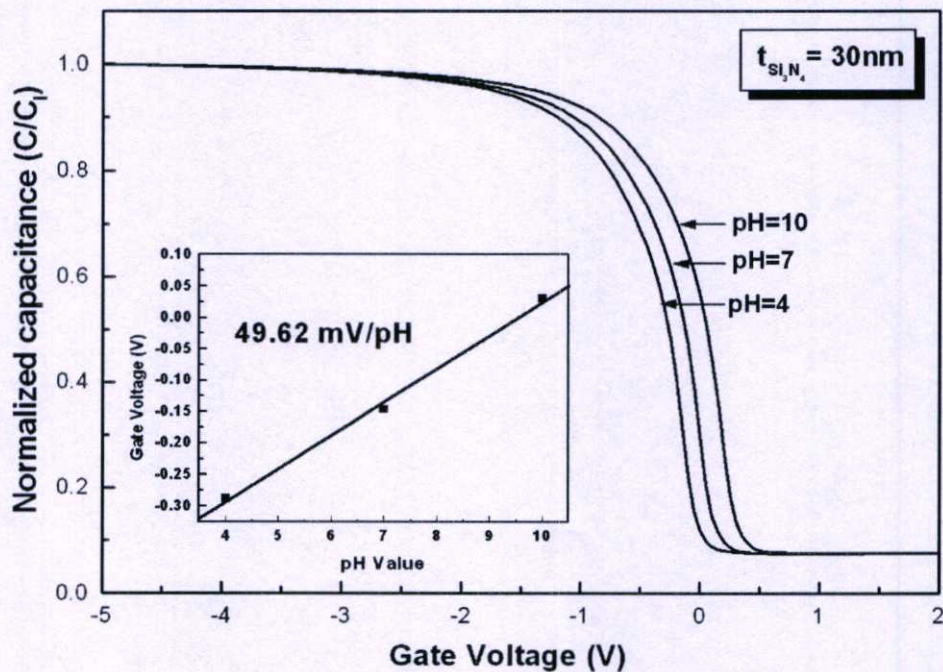
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{Si_3N_4} / \epsilon_0$ กับ $1/t_{Si_3N_4}$

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 พบว่าฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ที่สร้างจากกระบวนการ LPCVD มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 7.54 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความหนาของ

ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ 30, 50 และ 70 nm มีค่าเท่ากับ 1.96-1.97 ซึ่งพบว่าผลการวัดทั้งสองวิธีให้ค่าตรงกับกับคุณสมบัติฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ค่ามาตรฐานที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 7.5 และค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 2.0 [31]

4.1.2 การตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง

การพิจารณาคุณสมบัติของการตอบสนองต่อค่าความเป็น กรด-ด่าง ของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ ที่ใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ถูกทดสอบโดยตัวอุปกรณ์โครงสร้าง EIS ด้วยการวัด ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. voltage) จาก -5 ถึง 5 V พร้อมกับการให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. voltage) 30 mV ความถี่ 1 kHz คงที่ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ที่เขียนอยู่ในเทอมของ ก้านอร์มาไลซ์ (normalized capacitance) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความจุไฟฟ้ารวมกับความจุไฟฟ้าสูงสุด (ชั้นฉนวน) หรือ C/C_i



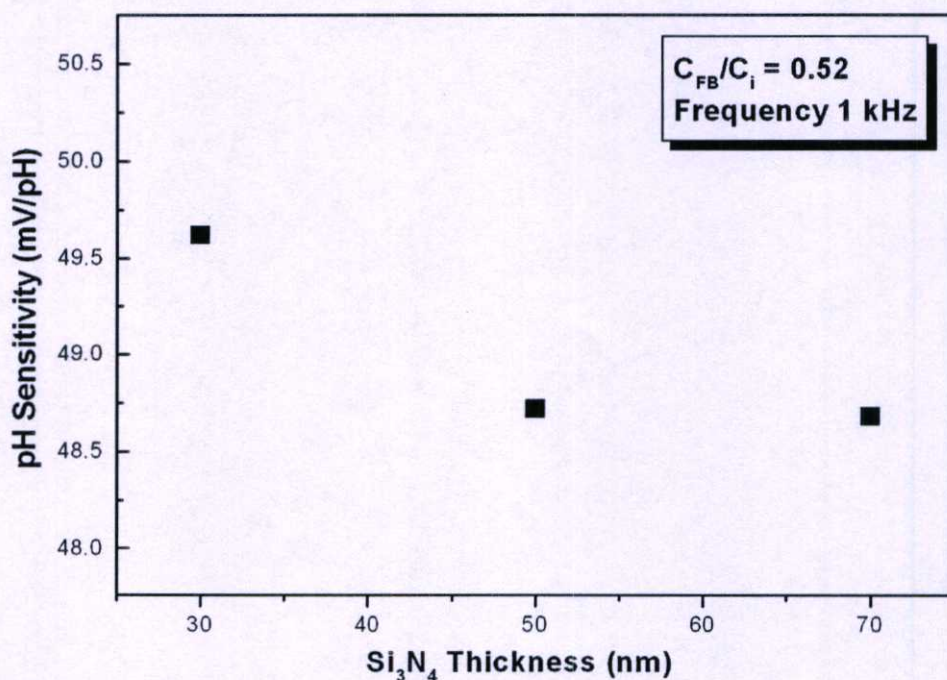
รูปที่ 4.2 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง EIS

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง EIS ที่มีความหนาชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ 30 nm ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 พบว่ามีการทำงานเข้าสู่ภาวะต่างๆ กล่าวคือจากการทดลองในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 การทำงานเข้าสู่ภาวะ

แอกคิวลิตีเกิดขึ้นเมื่อให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -5 V จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ -2 V และเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะเข้าสู่ภาวะดีพลีทชันจนถึงจุดต่ำสุดที่ค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.27 V และเริ่มเกิดภาวะอินเวอร์ชันที่ค่าแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.27 V

และเมื่อพิจารณาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง EIS ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 พบว่าการทำงานในภาวะแอกคิวลิตี และอินเวอร์ชันไม่สามารถนำมาศึกษาการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างได้ เนื่องจากไม่สามารถบอกความแตกต่างของสารละลายตัวอย่างค่า pH ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการทำงานในภาวะดีพลีทชันในช่วงแรงดันแถบเรียบ (Flat band voltage) ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า-แรงดัน พบว่าโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นชั้นฉนวนสามารถแยกความแตกต่างของสารละลายตัวอย่างค่า pH ได้ อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากที่แรงดันแถบเรียบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายตัวอย่างค่า pH มีค่าสูงขึ้นเมื่อพิจารณาแรงดันแถบเรียบที่คำนวณมาไลซ์ความจุไฟฟ้า C_{FB} / C_i เท่ากับ 5.2 [32] ให้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 49.62 mV/pH ที่อุณหภูมิ 25 °C

ความหนาฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ที่ใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นซิลิคอนไนไตรด์ของโครงสร้าง EIS กับค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ทั้งหมด 3 ความหนา คือ 30, 50 และ 70 nm ทำการทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ของโครงสร้าง EIS ที่ความหนาฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เท่ากับ 30, 50 และ 70 nm

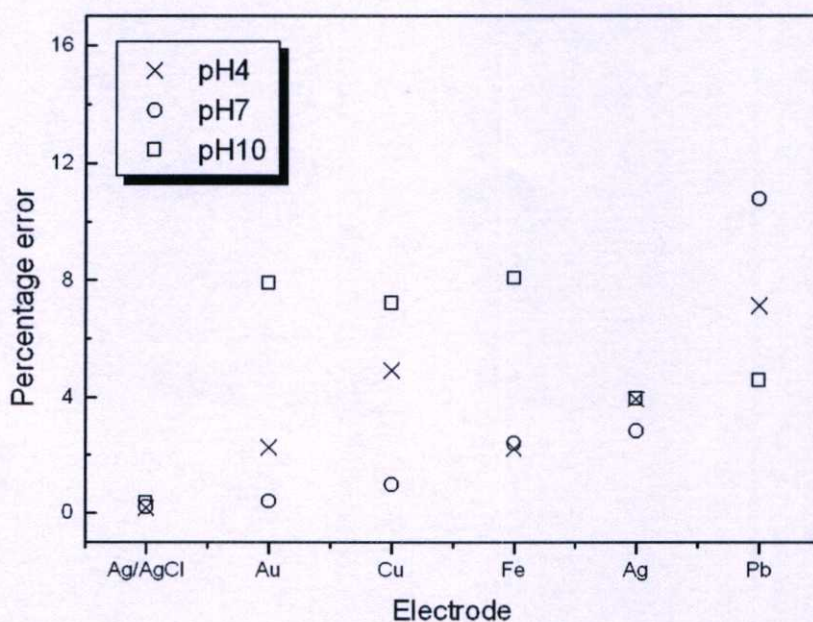
จากผลการทดลองในรูปแบบที่ 4.3 พบว่าฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ที่ความหนา 30, 50 และ 70 nm ให้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 49.62 48.72 และ 48.68 mV/pH ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม Si_3N_4 ให้การตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดี และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด-ด่างที่ดีด้วยเช่นกัน และที่ความหนาฟิล์ม Si_3N_4 30 nm ให้การตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่าที่ความหนา 50 และ 70 nm เพียงเล็กน้อย อาจเกิดจากช่วงความหนาฟิล์ม Si_3N_4 ที่นำมาทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้เราเลือกฟิล์ม Si_3N_4 ที่มีความหนา 30 nm ใช้เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนสำหรับตัวอุปกรณ์อิเล็กโทรด เนื่องจากที่ความหนา 30 nm ให้การตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงสุด

4.2 การทดสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าโลหะชนิดต่าง ๆ อันได้แก่ ทองแดง (Cu) เงิน (Ag), ตะกั่ว (Pb) และเหล็ก (Fe) กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่าการวัดในสารละลายให้ได้ค่าที่เที่ยงตรง และมีเสถียรภาพ ต้องควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่โดยการใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

นำตัวอุปกรณ์อิเล็กโทรดมาทำการทดสอบกับขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ ในสารละลายตัวอย่างค่า pH4, 7 และ 10 จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแต่ละชนิด แสดงดังในรูปแบบที่ 4.4

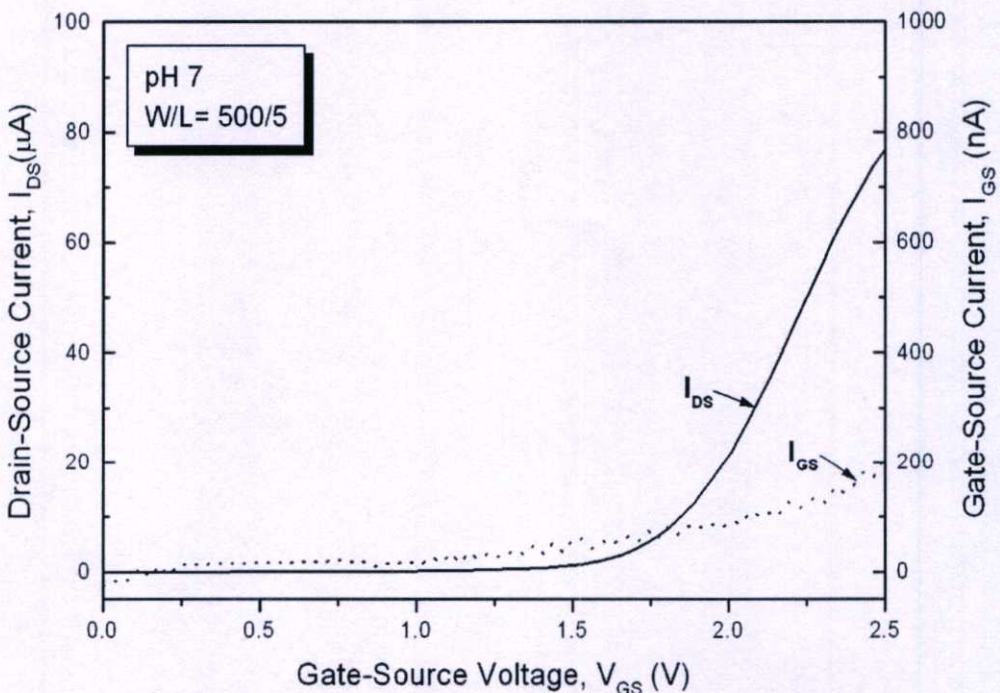


รูปที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ

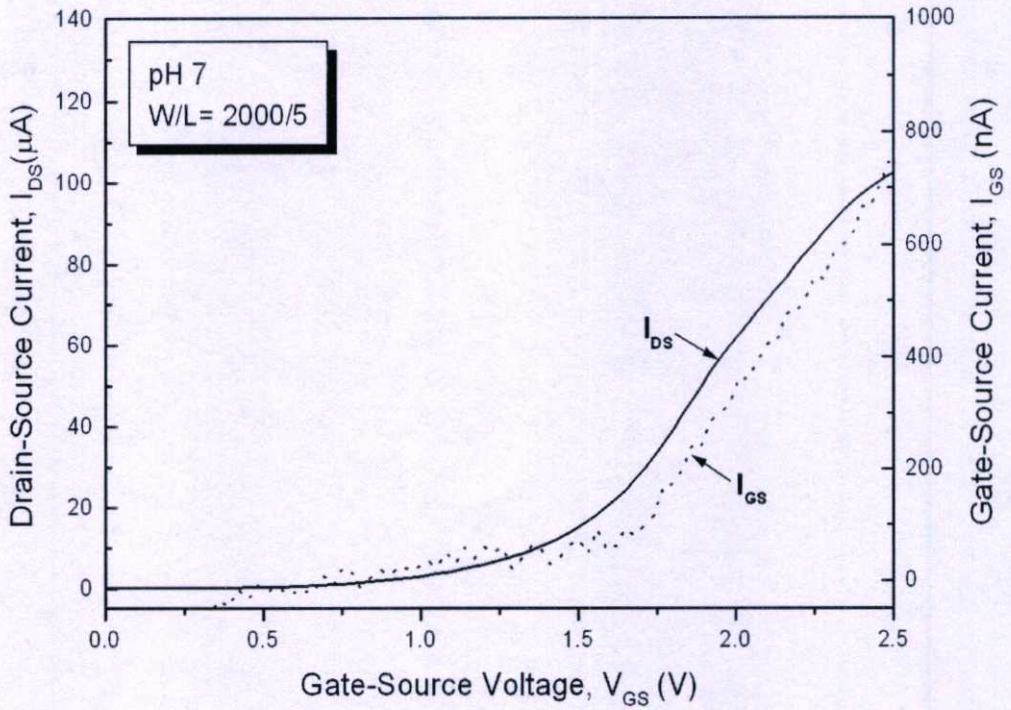
ผลการทดลองในรูปที่ 4.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ พบว่า ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ให้ผลการวัดที่มีความถูกต้องและมีเสถียรภาพ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำกว่า 0.41 % ส่วนขั้วไฟฟ้าโลหะชนิดอื่นอันได้แก่ ทองแดง, เงิน, ตะกั่ว และเหล็ก ให้ผลการวัดที่ไม่แน่นอนหรือไม่มีเสถียรภาพนั่นเอง ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยสูงเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ และมีค่าแตกต่างกันเมื่อวัดในสารละลายตัวอย่างค่า pH ต่างกัน เนื่องจากมีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นที่บริเวณขั้วไฟฟ้าโลหะที่สัมผัสอยู่กับสารละลาย ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วไฟฟ้าโลหะ แต่จะไม่เกิดกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ เนื่องจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์จุ่มอยู่ในสารละลายที่อิ่มตัวของโพแทสเซียมคลอไรด์ จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์มีค่าคงที่ในแต่ละค่า pH

4.3 กระแสรั่วในตัวอุปกรณ์

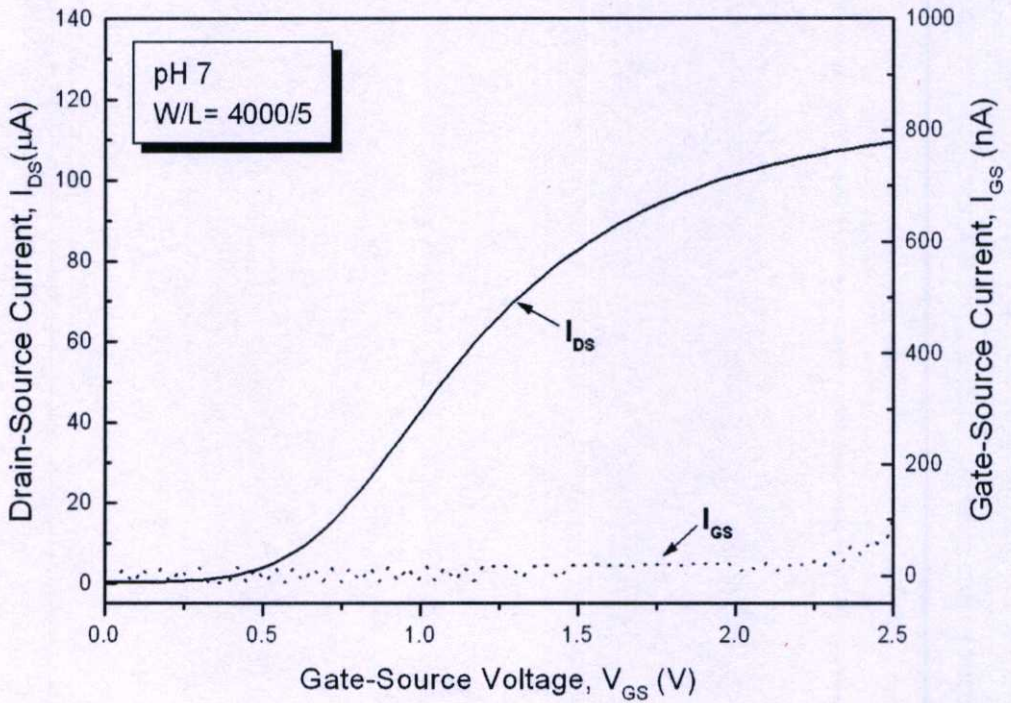
การวัดปริมาณกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์ ISFET ทั้ง 3 แบบ ที่สร้างและบรรจุภัณฑ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งมีขนาดความกว้างแชนแนล (W) เท่ากับ 500, 2000 และ 4000 μm ส่วนความยาว (L) เท่ากับ 5 μm คงที่ ทำการทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ขณะที่ป้อนแรงดัน V_{GS} เท่ากับ 0 – 2.5 V ผลการวัดกระแสรั่ว I_{GS} เปรียบเทียบกับกระแส I_{DS} เมื่อป้อนแรงดัน V_{DS} คงที่เท่ากับ 0.2 V แสดงดังในรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่ว I_{GS} กับแรงดันเกต เมื่อขนาดของ $W/L = 500/5$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่ว I_{GS} กับแรงดันเกต เมื่อขนาดของ $W/L = 2000/5$

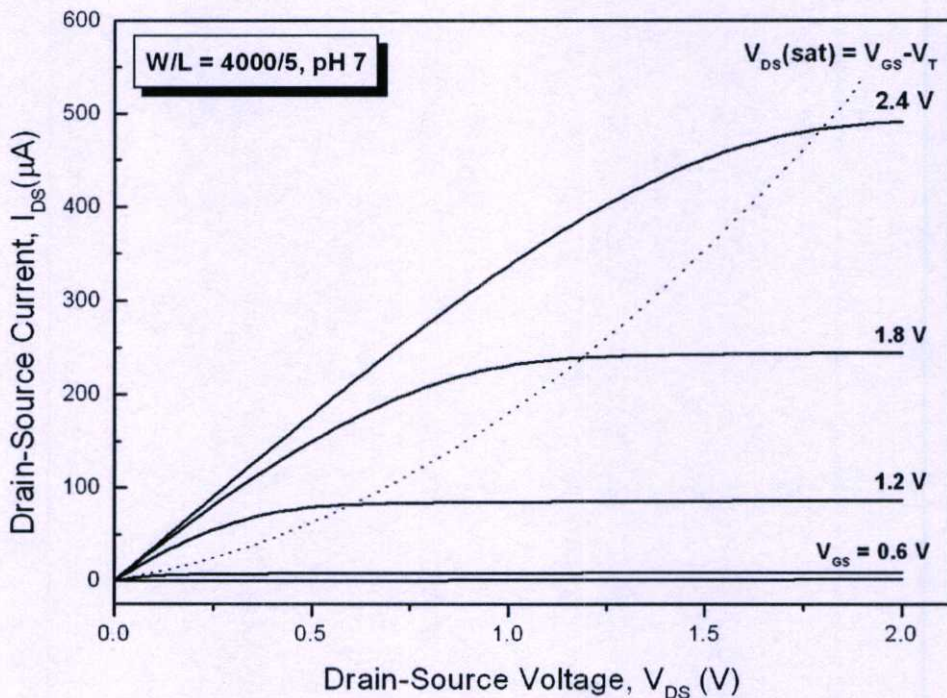


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่ว I_{GS} กับแรงดันเกต เมื่อขนาดของ $W/L = 4000/5$

จากผลการทดลองวัดปริมาณกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์ แสดงให้เห็นว่าปริมาณกระแสรั่ว I_{GS} ในช่วงการทำงานของอุปกรณ์ ISFET ทั้ง 3 แบบ มีค่าอยู่ระหว่าง 100-750 nA หรือต่ำกว่า $1 \mu A$ ทั้งสิ้น ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ และกระบวนการเก็บบรรจุดังกล่าวจึงถือได้ว่ามีคุณภาพดี ซึ่งจะเป็นการป้องกันความผิดพลาดในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

4.4 ย่านการทำงาน

การทดสอบย่านการทำงานของตัวอุปกรณ์ ISFET แบบที่มีขนาดความกว้างแซนแนล (W) ต่อความยาว (L) เท่ากับ 4000/5 ได้ทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 แล้วทำการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดัน $I_{DS} - V_{DS}$ เมื่อให้แรงดัน V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ



รูปที่ 4.8 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน-แรงดันเมื่อแรงดันเกต V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อให้แรงดันที่ขั้วเกต $V_{GS} > V_T$ และค่อยๆ ให้แรงดันเดรนเพิ่มขึ้น จะเห็นว่ากระแสเดรน I_{DS} จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันเดรน V_{DS} เกือบเป็นเชิงเส้น และจะชะลอตัวลงเมื่อแรงดันเดรนยังคงเพิ่มขึ้น กระทั่งมีค่าเข้าใกล้แรงดันเดรนอิ่มตัว $V_{DS}(sat)$ แต่ยังคงอยู่ในเงื่อนไขของ $V_{DS} < V_{DS}(sat)$ ซึ่งมีหลักการการทำงานเหมือนกับอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์ ในย่านนี้ อุปกรณ์ ISFET จะมีสภาพไม่อิ่มตัว (Non saturation region) กล่าวคือกระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นกับแรงดันเดรน และความชันของกราฟคุณสมบัติ $I_{DS} - V_{DS}$ จะเพิ่มขึ้นกับแรงดันที่ขั้วเกต V_{GS} เนื่องจาก

ความนำของแชนแนลขึ้นกับแรงดันเกต เมื่อแรงดันเดรนมีค่ามากกว่าแรงดันเดรนอิ่มตัว หรือ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ กระแสเดรนจะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับแรงดันเดรนอีกต่อไป ในขณะที่อุปกณ์ ISFET ถูกพิจารณาว่าทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation region) ซึ่งเราสามารถแบ่งย่านการทำงานของตัวอุปกณ์ ISFET ได้ด้วยสมการ $V_{DS(sat)} = V_{GS} - V_T$ กล่าวคือ เมื่อ $0 < V_{DS} < V_{DS(sat)}$ จะเป็นการทำงานในย่านไม่อิ่มตัว (non-saturation region) และเมื่อ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ จะเป็นการทำงานในย่านอิ่มตัว (saturation region)

4.4.1 การทำงานในย่านไม่อิ่มตัว

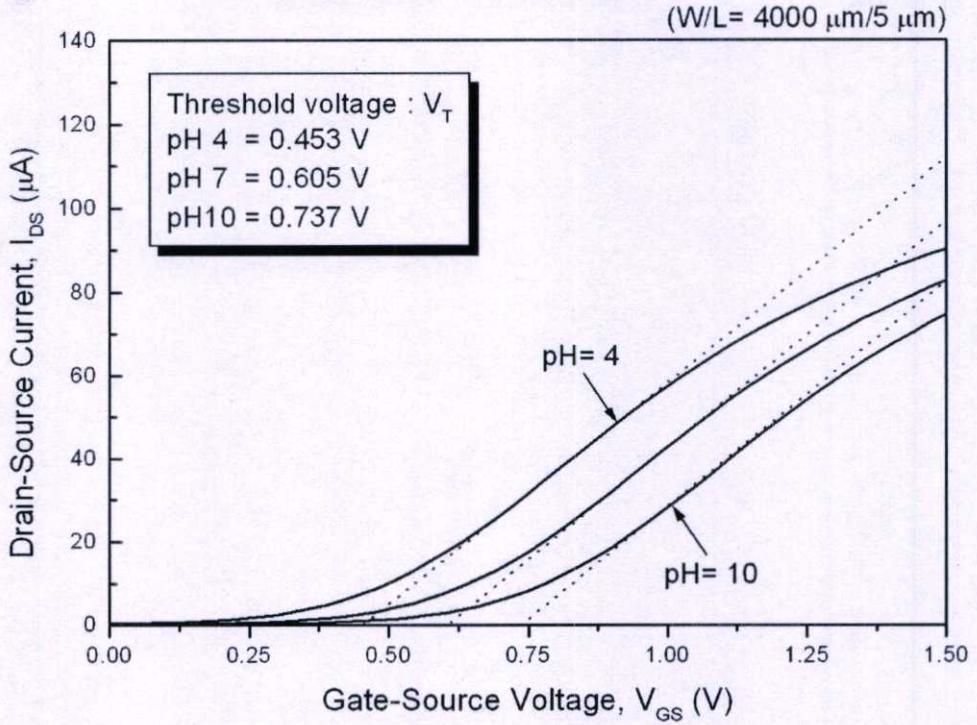
การทดสอบการทำงานของตัวอุปกณ์ ISFET ในย่านไม่อิ่มตัว เป็นการนำตัวอุปกณ์ ISFET ไปวัดลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน เพื่อทดสอบความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ที่แรงดัน V_{DS} มีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 V ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าแรงดันขีดเริ่ม V_T มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH ต่างกัน ซึ่งมีผลมาจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน หรือ H^+ ในสารละลายตัวอย่างแต่ละค่า pH ที่มีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมากกว่าในสารละลายตัวอย่างค่า pH 10 แต่จะน้อยกว่าในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 ดังนั้นจะเห็นว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 จะมีค่าแรงดันขีดเริ่ม V_T น้อยกว่าในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 และ pH 10 ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าความนำของแชนแนลขึ้นกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายตัวอย่าง หรือค่า pH นั้นเอง

เมื่อพิจารณาการทำงานของอุปกณ์ ISFET ในย่านไม่อิ่มตัว เมื่อให้แรงดันเดรนคงที่เท่ากับ 0.2 โวลต์ สามารถคำนวณหาค่าแรงดันเกตต่ำสุดที่ทำให้อุปกณ์ ISFET ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวได้จากสมการที่ 4.1

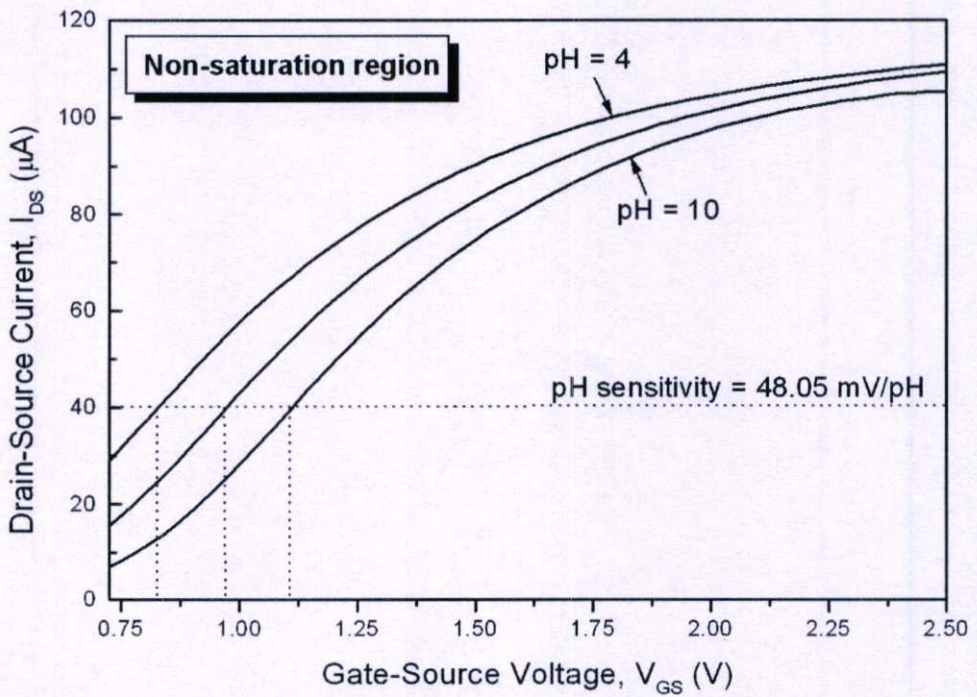
$$V_{DS(sat)} = V_{GS} - V_T \quad (4.1)$$

โดยที่แรงดันขีดเริ่ม V_T ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ 0.605 โวลต์ ดังนั้นค่าแรงดันเกต V_{GS} ที่ทำให้อุปกณ์ ISFET ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวจะต้องมีค่ามากกว่า 0.805 โวลต์ เนื่องจากที่แรงดันเกตมีค่าต่ำกว่าค่าดังกล่าวทำให้อุปกณ์ ISFET ทำงานในย่านอิ่มตัว

ผลการทดลองในรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดัน $I_{DS}-V_{GD}$ ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 โดยให้แรงดันเดรนเท่ากับ 0.2 โวลต์ คงที่ เมื่อพิจารณาเฉพาะในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 พบว่ากระแสเดรนจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับแรงดันเกต ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4.2



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม V_T กับสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10

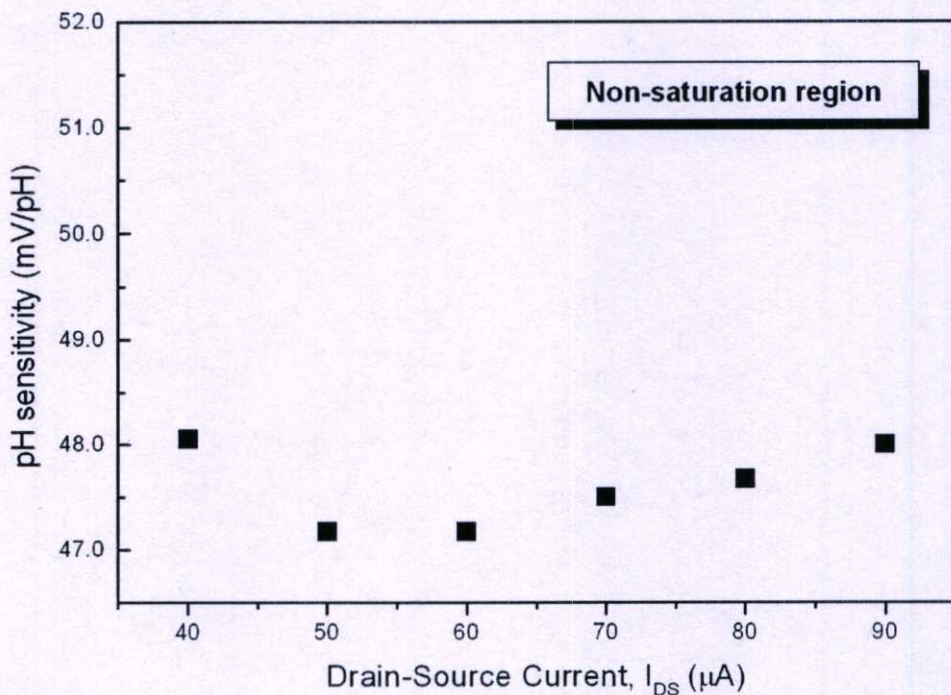


รูปที่ 4.10 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน I_{DS} - V_{GS} สำหรับการทำงานในย่านไม่อิ่มตัว

$$I_{DS} = \beta \left[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 พบว่าที่แรงดันเกตคงที่ค่าหนึ่ง กระแสเดรน I_{DS} จะขึ้นอยู่กับแรงดันขั้วเริ่ม V_T กล่าวคือ เมื่อสารละลายตัวอย่างค่า pH ลดลง หรือมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนสูงขึ้น ทำให้แรงดันขั้วเริ่ม V_T ลดลง ส่งผลให้กระแสเดรน I_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันเมื่อสารละลายตัวอย่างค่า pH เพิ่มขึ้น หรือมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนลดลง ทำให้แรงดันขั้วเริ่ม V_T เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสเดรน I_{DS} มีค่าลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 4.2

จากรูปที่ 4.11 เมื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} กับการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง สำหรับการทำงานในย่านไม่อิ่มตัว พบว่าเมื่อเลือกจุดทำงานที่มีกระแสเดรนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของอุปกรณ์ ISFET มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 47.17-48.05 mV/pH ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่า 1 mV/pH ดังแสดงดังรูปที่ 4.11

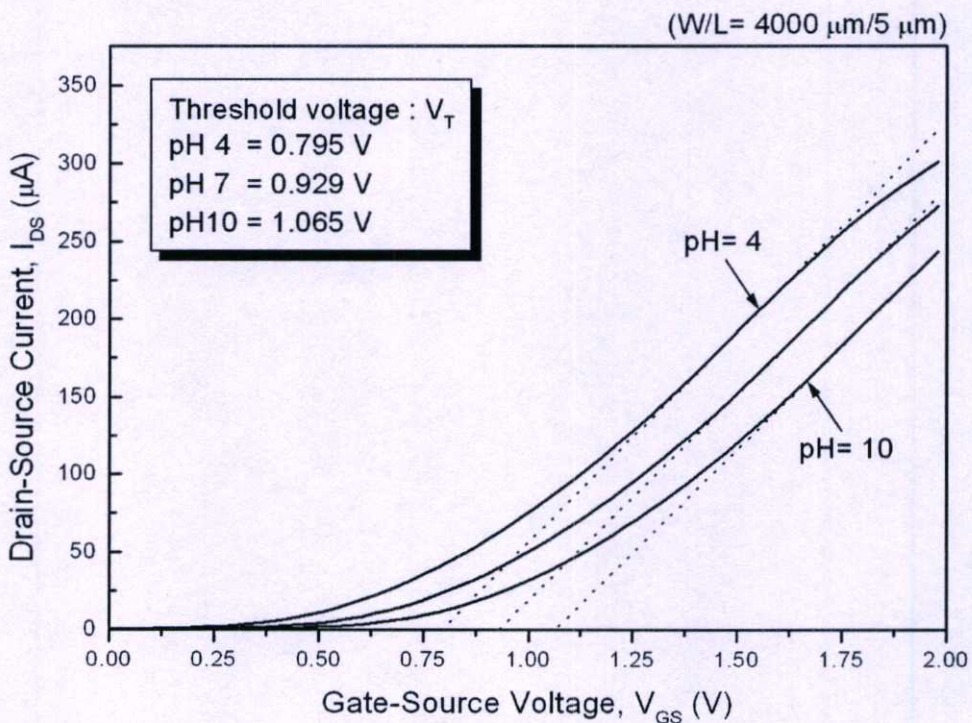


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} กับการตอบสนองต่อค่า pH สำหรับการทำงานในย่านไม่อิ่มตัว

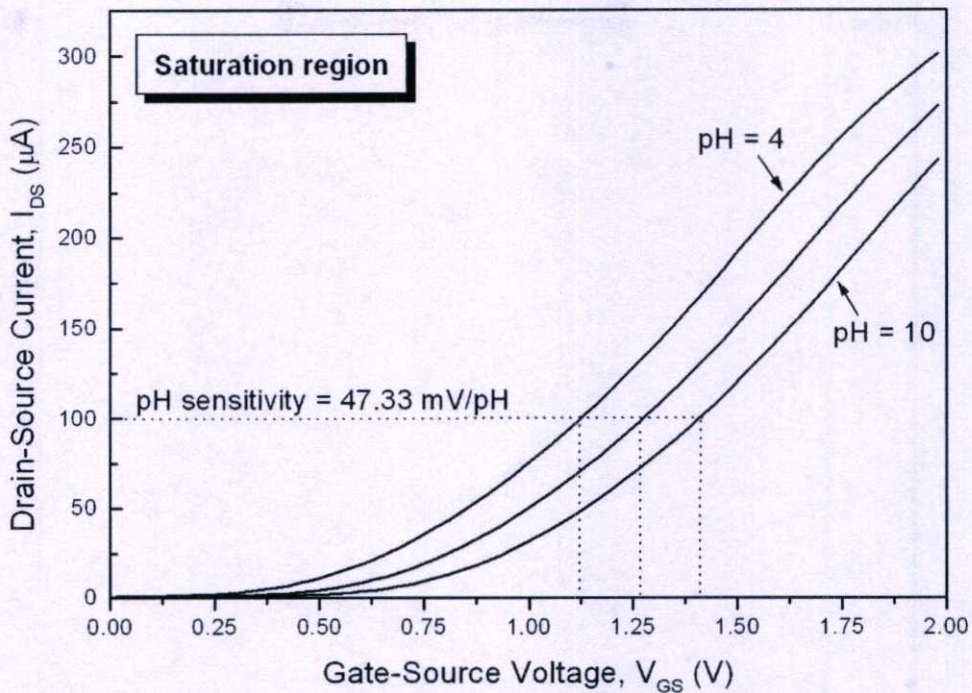
4.4.2 การทำงานในย่านอิมิตัว

การทดสอบการทำงานของตัวอุปกรณ์ ISFET ในย่านอิมิตัว เป็นการทดสอบแบบเดียวกับการทดสอบในหัวข้อที่ 4.4.1 โดยการนำตัวอุปกรณ์ ISFET ไปวัดลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดัน เพื่อทดสอบความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 แต่ให้แรงดันเดรนคงที่เท่ากับ 1 V เนื่องจากทำให้เกิดช่วงการทำงานในย่านอิมิตัวที่กว้าง สามารถอธิบายการทำงานได้ดีขึ้น

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่ม V_T กับสารละลายตัวอย่างค่า pH ต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าแรงดันขีดเริ่ม V_T มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH ต่างกัน ซึ่งเป็นเหมือนกับการทำงานในย่านไม้อิมิตัว กล่าวคือค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 จะมีค่าแรงดันขีดเริ่ม V_T น้อยกว่าในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 และ pH 10 ตามลำดับ จากการพิจารณาการทำงานในย่านอิมิตัว พบว่าเมื่อให้แรงดันเดรนคงที่เท่ากับ 1 V จะได้แรงดันขีดเริ่ม V_T ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ 0.929 V จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ 4.1 จะได้ว่าค่าแรงดันเกตสูงสุดที่ทำให้อุปกรณ์ ISFET ยังคงทำงานในย่านอิมิตัว จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1.929 V



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม V_T กับสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 7 และ 10 สำหรับการงานในย่านอิมิตัว



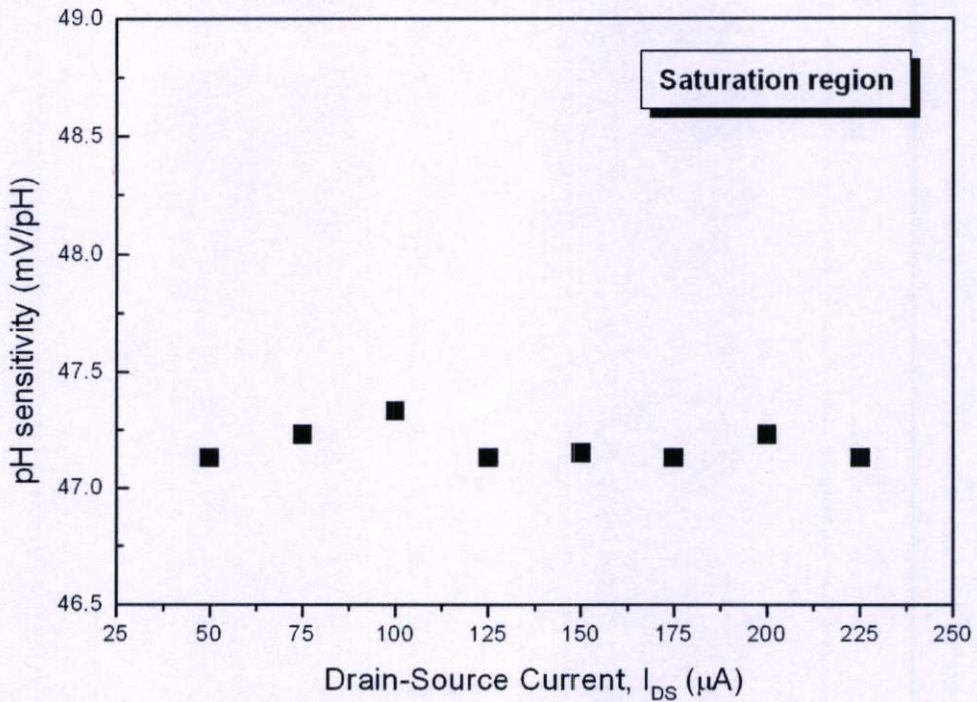
รูปที่ 4.13 คุณสมบัติกระแสแตรนกับแรงดันเกตสำหรับการทำงานในย่านอิมิตัว

ผลการทดลองในรูปที่ 4.13 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแสแตรนกับแรงดันเกต ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ที่ให้แรงดันแตรนเท่ากับ 1 โวลต์ คงที่ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสแตรนกับแรงดันเกต ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 เพียงค่าเดียว พบว่ากระแสแตรนมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับแรงดันเกต แต่จะไม่ขึ้นกับแรงดันแตรน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4.3

$$I_{DS}(sat) = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (4.3)$$

และเมื่อพิจารณาในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 พบว่าที่แรงดันเกตคงที่ค่าหนึ่ง กระแสแตรน I_{DS} จะขึ้นอยู่กับแรงดันขีดเริ่ม V_T กล่าวคือ เมื่อสารละลายตัวอย่างค่า pH ลดลง ทำให้แรงดันขีดเริ่ม V_T ลดลง ส่งผลให้กระแสแตรน I_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันเมื่อสารละลายตัวอย่างค่า pH เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันขีดเริ่ม V_T เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสแตรน I_{DS} มีค่าลดลง

ในรูปที่ 4.14 เป็นผลการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแตรน กับผลการตอบสนองต่อค่า pH สำหรับการทำงานในย่านอิมิตัว พบว่าเมื่อเลือกจุดทำงานที่มีกระแสแตรนเท่ากับ 50-200 μA โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 μA ทำให้ผลการตอบสนองต่อค่า pH ของอุปกรณ์ ISFET มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 47.13-47.33 mV/pH ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย หรือมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.5 mV/pH แต่เมื่อเลือกจุดทำงานที่มีกระแสแตรนต่ำกว่า 50 μA พบว่าไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างสารละลายตัวอย่างแต่ละชนิดได้สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับผลการตอบสนองต่อค่า pH
สำหรับการทำงานในย่านอิ่มตัว

ผลจากการทดสอบย่านการทำงานของอุปกรณ์ ISFET พบว่าการนำตัวอุปกรณ์ไปใช้งานสามารถใช้ได้ทั้งย่านไม่อิ่มตัวและย่านอิ่มตัว ซึ่งทั้งสองย่านการทำงานจะให้ค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 47.17-48.05 mV/pH ดังนั้นการเลือกย่านการทำงานของอุปกรณ์ไอสเฟท ไปใช้งานจะขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งานเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น การนำไปใช้เป็นเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่างแบบพกพา เราควรเลือกใช้การทำงานในย่านอิ่มตัวเนื่องจากกระแสเดรนอิ่มตัวไม่ขึ้นกับแรงดันเดรน กล่าวคืออุปกรณ์ประเภทนี้เมื่อใช้งานระยะหนึ่งแล้วแบตเตอรี่จะค่อยๆลดลง แต่เนื่องจากกระแสเดรนอิ่มตัวขึ้นกับแรงดันขั้วเริ่ม โดยไม่ขึ้นกับแรงดันเดรน ทำให้การทำงานของอุปกรณ์ไอสเฟทมีค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่างไม่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องแม้ว่าแรงดันเดรนจะมีเปลี่ยนแปลงก็ตาม

4.5 การวัดคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ ISFET

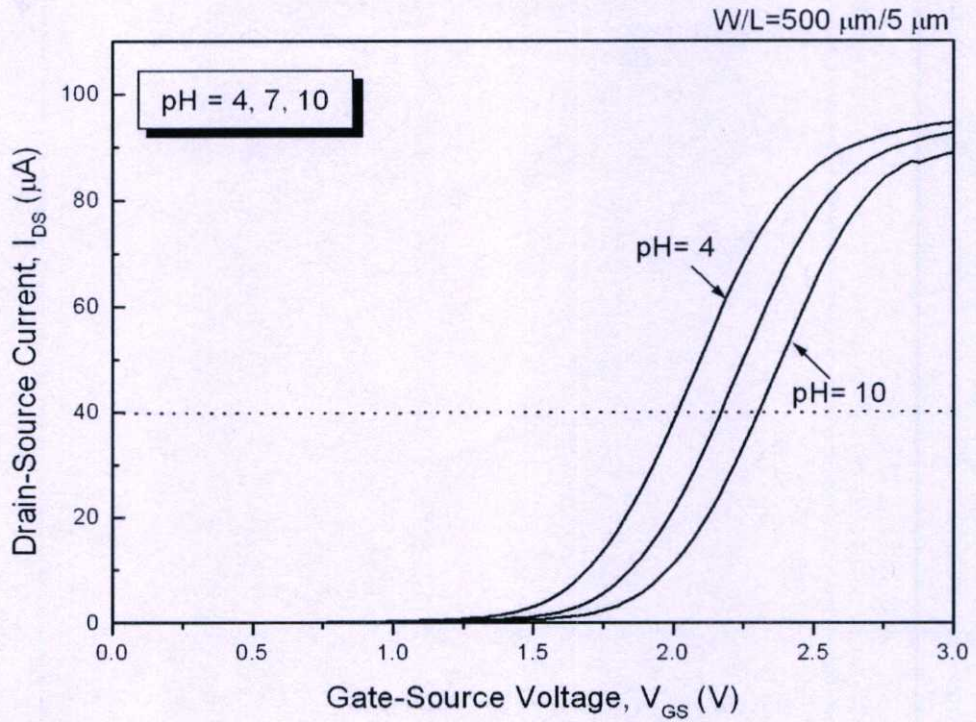
4.5.1 การวัดการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Sensitivity)

การวัดการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ของอุปกรณ์ ISFET ทั้ง 3 แบบที่ผ่านกระบวนการบรรจุภัณฑ์ และทดสอบกระแสรั่วเรียบร้อยแล้ว เป็นการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ($I_{DS}-V_{GS}$) ของตัวอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 7 และ 10 ที่แรงดัน V_{DS} มีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 V เพื่อเป็นการศึกษาผลของแขนแนลที่มีขนาดความกว้างต่อความยาว หรือ W/L เท่ากับ 500 μm / 5 μm , 2000 μm / 5 μm และ 4000 μm / 5 μm

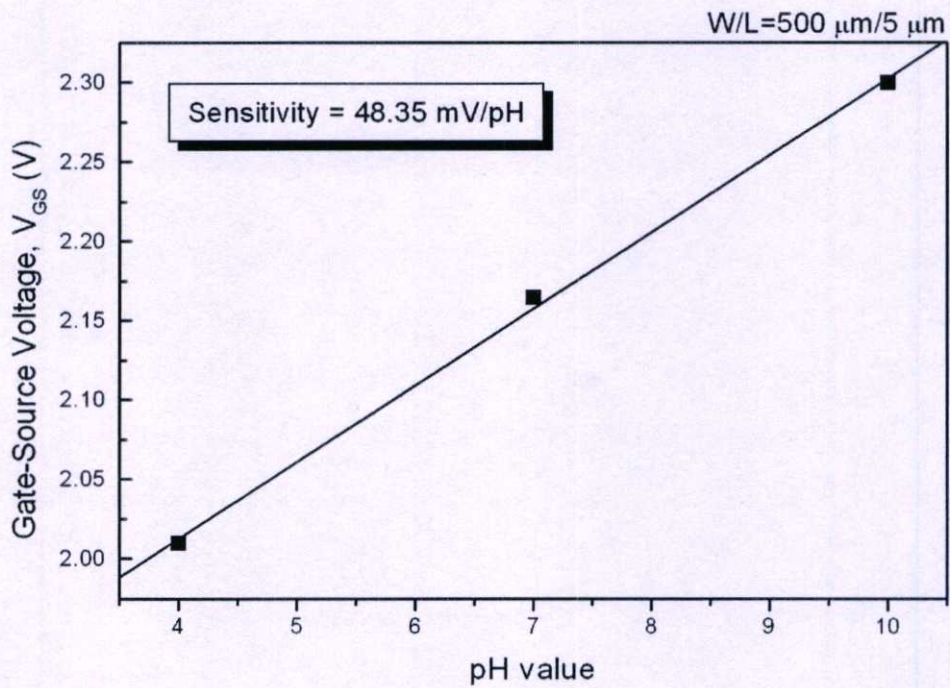
ผลจากการทดลองในรูปที่ 4.15 เป็นผลการวัดคุณสมบัติเฉพาะระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตของตัวอุปกรณ์ไอสเฟท ที่แขนแนลมีขนาดความกว้างต่อความยาว หรือ W/L เท่ากับ 500 μm / 5 μm พบว่าในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ตัวอุปกรณ์ไอสเฟทจะทำงานเมื่อให้แรงดันเกตมากกว่าหรือเท่ากับ 1.853 โวลต์ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.15 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกตกับค่า pH พบว่าที่กระแสเดรน 40 μA สามารถแยกความแตกต่างระหว่างสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ได้สม่ำเสมอ ให้ค่าแรงดันเกตเท่ากับ 2.01 , 2.16 และ 2.30 ตามลำดับ และได้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 48.35 mV/pH แสดงดังรูปที่ 4.16

ผลจากการทดลองในรูปที่ 4.17 เป็นผลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสเดรนกับแรงดันเกตของตัวอุปกรณ์ไอสเฟท ที่แขนแนลมีขนาดความกว้างต่อความยาว หรือ W/L เท่ากับ 2000 μm / 5 μm พบว่าในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ตัวอุปกรณ์ไอสเฟทจะทำงานเมื่อให้แรงดันเกตมากกว่าหรือเท่ากับ 1.433 โวลต์ และเมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกตกับค่า pH เพื่อหาค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่าที่กระแสเดรนเท่ากับ 40 μA สามารถแยกความแตกต่างของสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ได้อย่างสม่ำเสมอ ให้ค่าแรงดันเกตเท่ากับ 1.66 , 1.81 และ 1.95 ตามลำดับ ได้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 47.23 mV/pH แสดงดังรูปที่ 4.18

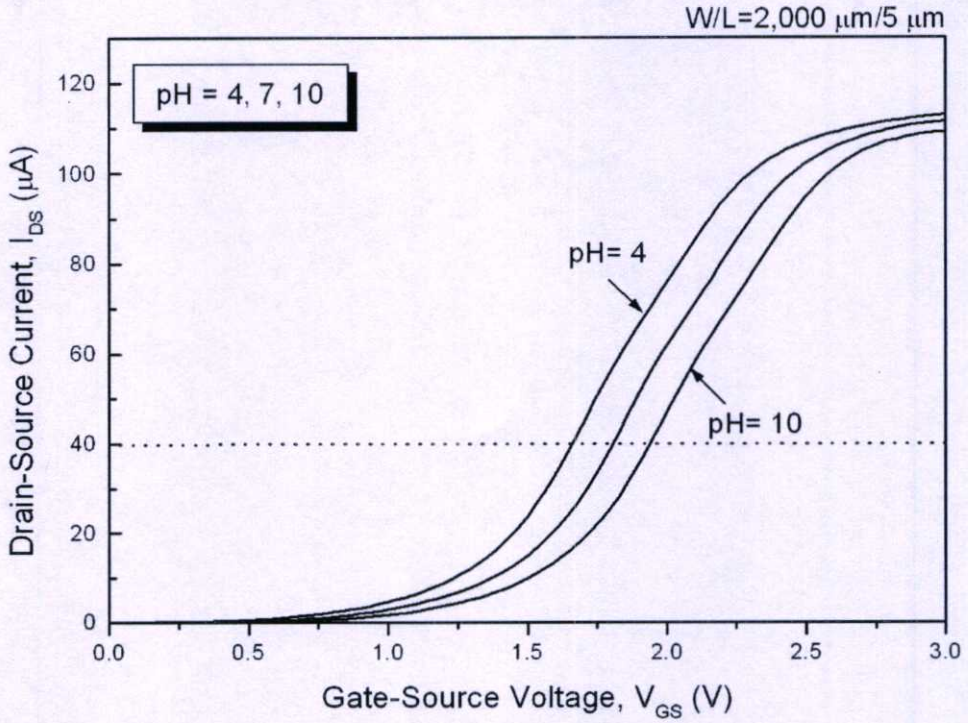
ผลจากการทดลองในรูปที่ 4.19 เป็นผลการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสเดรนกับแรงดันเกตของตัวอุปกรณ์ไอสเฟท ที่แขนแนลมีขนาดความกว้างต่อความยาว หรือ W/L เท่ากับ 4000 μm / 5 μm ซึ่งเป็นแขนแนลที่มีขนาดใหญ่ที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ พบว่าในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ตัวอุปกรณ์ไอสเฟทจะทำงานเมื่อให้แรงดันเกตมากกว่าหรือเท่ากับ 0.605 โวลต์ และเมื่อนำผลการทดลองมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกตกับค่า pH พบว่าที่กระแสเดรนเท่ากับ 40 μA สามารถแยกความแตกต่างของสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ได้อย่างสม่ำเสมอ มีค่าแรงดันเกตเท่ากับ 0.82 , 0.97 และ 1.11 ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ได้เท่ากับ 48.05 mV/pH แสดงดังรูปที่ 4.20



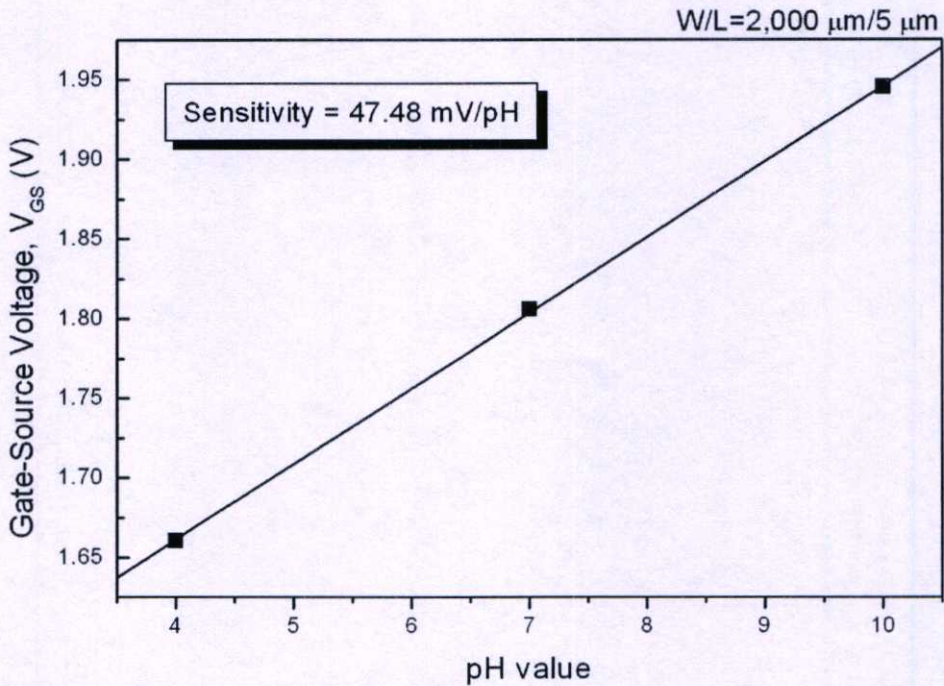
รูปที่ 4.15 คุณสมบัติกระแสแรงดัน ของอุปกรณ์ ISFET ที่มีขนาด W/L=500/5



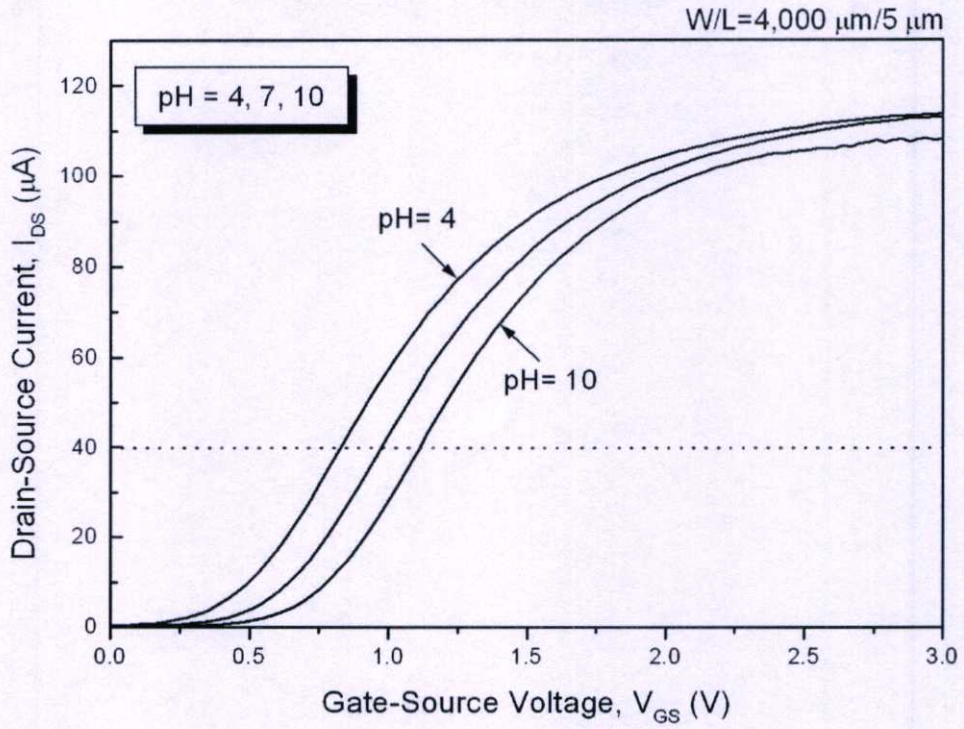
รูปที่ 4.16 การตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของอุปกรณ์ไอส์เฟทที่มีขนาด W/L=500/5



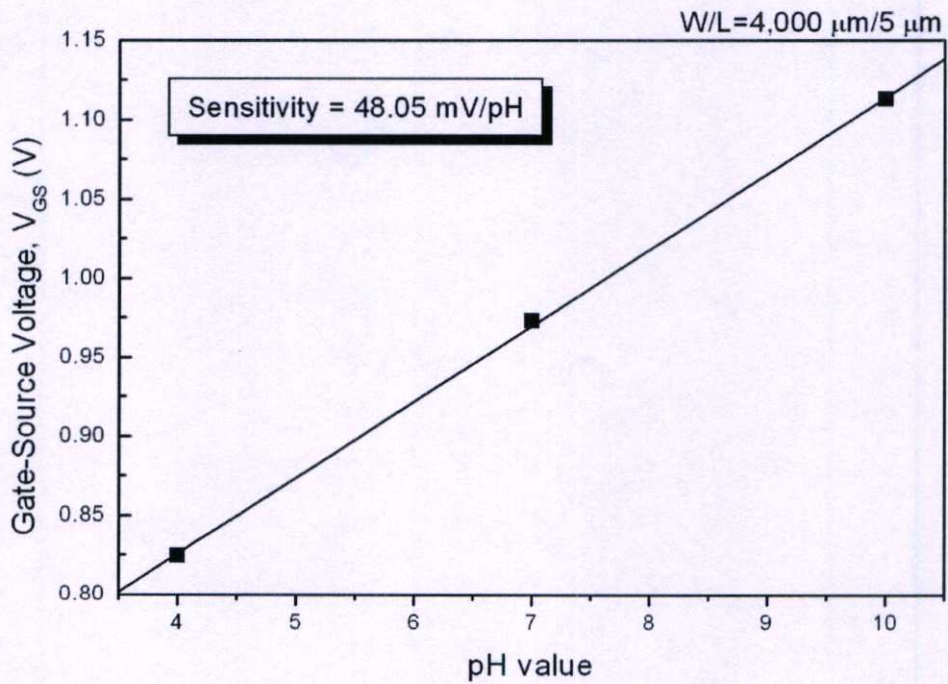
รูปที่ 4.17 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของอุปกรณ์ ISFET ที่มีขนาด W/L=2000/5



รูปที่ 4.18 การตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของอุปกรณ์ไอส์เฟทที่มีขนาด W/L=2000/5

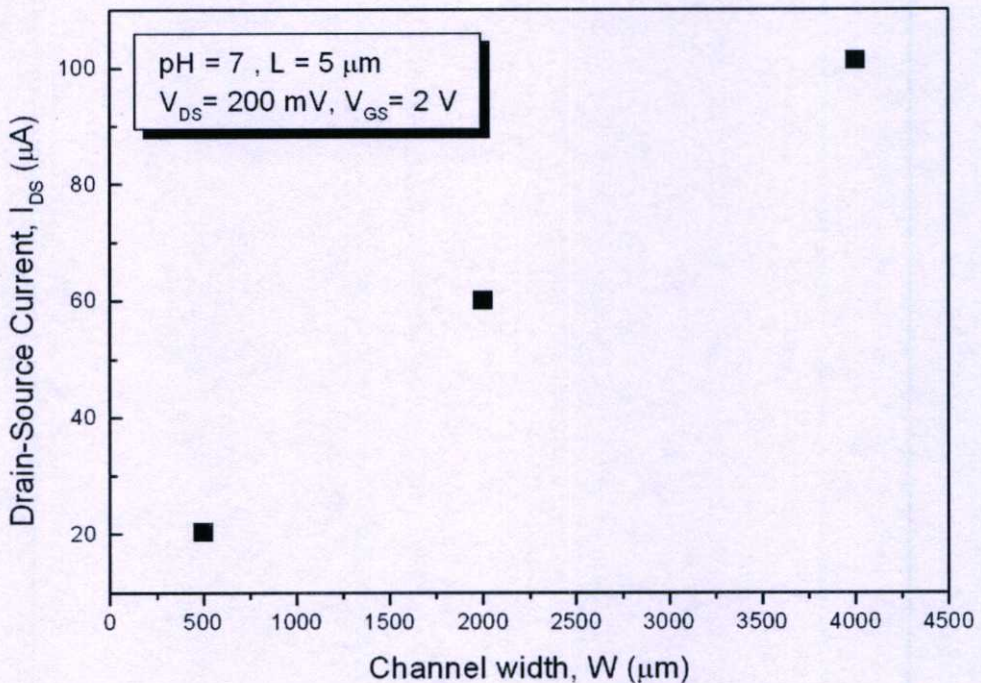


รูปที่ 4.19 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของอุปกรณ์ ISFET ที่มีขนาด W/L=4000/5



รูปที่ 4.20 การตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของอุปกรณ์ไอส์เฟทที่มีขนาด W/L=4000/5

จากการทดสอบตัวอุปกรณ์ไอส์เฟททั้ง 3 แบบ เพื่อหาค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ที่แรงดันเดรนเท่ากับ 0.2 โวลต์ และกระแสเดรน 40 μA พบว่าค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าใกล้เคียงกันมาก ประมาณ 48 mV/pH อาจกล่าวได้ว่าขนาดความกว้างของแชนแนลไม่มีผลต่อการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง แต่จะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ไอส์เฟท กล่าวคือกระแสเดรนจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดความกว้างของแชนแนลที่เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งมีการทำงานเช่นเดียวกับอุปกรณ์มอสเฟท สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.4) และ (2.6)



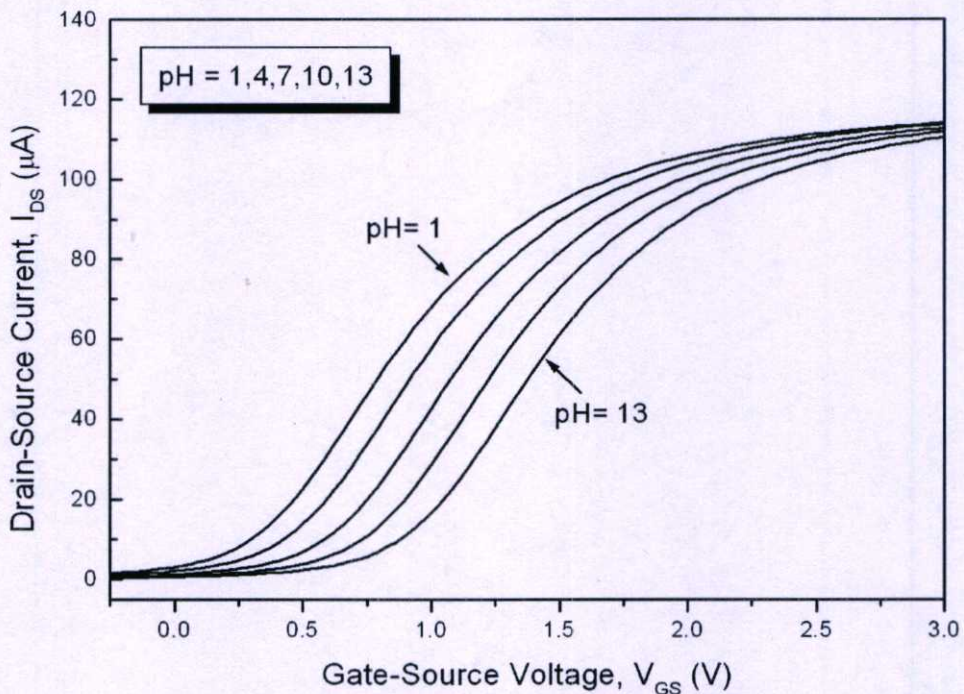
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับขนาดความกว้างของแชนแนล

ขนาดความกว้างของแชนแนล หรือ ความกว้างของเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ยังมีผลต่อแรงดันขีดเริ่มของตัวอุปกรณ์ด้วย เนื่องจากขนาดที่กว้างขึ้นจะทำให้ชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนมีโอกาสจับกับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ของสารละลายที่มาสัมผัส ทำให้สามารถเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนให้เกิดแชนแนลชนิดเอ็นขึ้น ได้มากกว่าขนาดความกว้างของแชนแนลที่แคบ ส่งผลให้ขนาดที่กว้างขึ้นของแชนแนลจะทำให้อุปกรณ์ไอส์เฟทเริ่มทำงานที่แรงดันเกตลดลง หรือแรงดันขีดเริ่มลดลงนั่นเอง

สำหรับตัวอุปกรณ์ไอส์เฟทแบบที่แชนแนลมีขนาดความกว้างต่อความยาว หรือ W/L เท่ากับ $4000 \mu\text{m} / 5 \mu\text{m}$ ให้ค่าแรงดันเกตต่ำกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 1.5 V และให้ค่ากระแสเดรนที่สูงดังสมการกระแสของอุปกรณ์ไอส์เฟท จึงถูกเลือกที่จะนำไปใช้ทำการทดลองต่อในหัวข้อถัดไป

4.5.2 การทดสอบช่วงการทำงาน (pH range)

ผลจากการทดสอบช่วงการทำงานของอุปกรณ์ ISFET แบบที่มีเซนเนลมีขนาดความกว้างต่อความยาว หรือ W/L เท่ากับ $4000 \mu\text{m} / 5 \mu\text{m}$ ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 1, 4, 7, 10 และ 13 เพื่อพิจารณาหาช่วงการทำงานของตัวอุปกรณ์ สำหรับลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ($I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$) ในสารละลายตัวอย่างค่า pH ต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 4.22



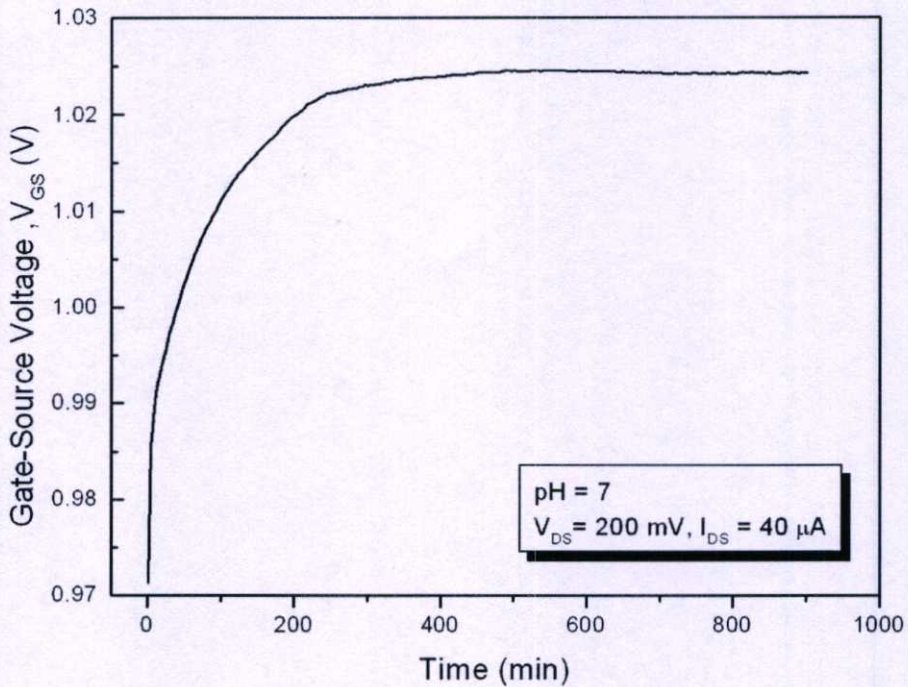
รูปที่ 4.22 การทดสอบช่วงการทำงานของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่าต่างๆ

จากผลการทดสอบช่วงการทำงาน พบว่าค่าแรงดันเกต (V_{GS}) จะเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวาตามสารละลายตัวอย่างค่า pH ที่สูงขึ้น หรือแปรผกผันกับความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนไอออนในสารละลายตัวอย่าง และสามารถแยกความแตกต่างของสารละลายตัวอย่างค่า pH 1, 4, 7, 10 และ 13 ได้อย่างสม่ำเสมอ กล่าวคือตัวอุปกรณ์ไอสเฟทที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้งานได้ตั้งแต่ช่วงค่า pH 1-13 ได้ดี

4.5.3 การทดสอบอัตราการครีฟท์ (Drift rate)

ผลการทดสอบอัตราการครีฟท์ของอุปกรณ์ ISFET แบบที่เซนเนลมีขนาดความกว้างต่อความยาว หรือ W/L เท่ากับ $4000 \mu\text{m} / 5 \mu\text{m}$ หลังจากทำความสะอาดบริเวณของเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

ด้วยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง (Ultra Deionized Water: UDI) การวัดวิเคราะห์หาค่าอัตราการครีฟที่ได้ ทำการทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 ชั่วโมง สำหรับผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.23



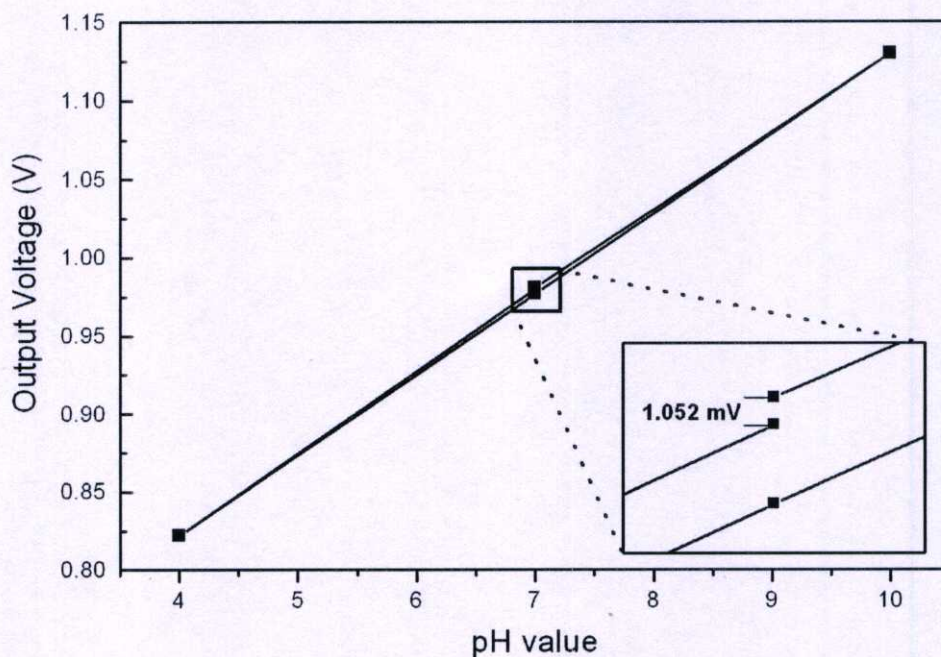
รูปที่ 4.23 ลักษณะอัตราการครีฟของตัวอุปกรณ์ไอสเฟท

ผลจากการทดลองหาค่าอัตราการครีฟของตัวอุปกรณ์ไอสเฟทในรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่า หลังจากจุ่มอุปกรณ์ไอสเฟทลงในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ในช่วงแรก คือตั้งแต่เริ่มจุ่มจนถึงเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าแรงดันเกต หรือแรงดันเอาท์พุทจะเพิ่มขึ้นจาก 0.971-1.023 V อย่างรวดเร็ว และจะเริ่มอิมตัวหลังจาก 5 ชั่วโมง เมื่อจุ่มต่อไปในช่วงระหว่างเวลา 5-15 ชั่วโมง พบว่าแรงดันเกตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จาก 1.023-1.024 V จนถึงค่าอิมตัว ค่าอัตราการครีฟที่คำนวณหลังจากจุ่มอุปกรณ์ไอสเฟทในสารละลายตัวอย่างไปแล้ว 5 ชั่วโมงมีเท่ากับ 0.162 mV/h แต่สำหรับการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ในงานทั่วไปจะใช้เวลาในจุ่มวัดน้อยมากประมาณ 1-5 นาที ซึ่งมีค่าอัตราการครีฟที่เท่ากับ 0.002 mV/min ดังนั้นผลจากอัตราการครีฟจะไม่ส่งผลต่อการวัดในช่วงสั้นๆ

4.5.4 ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis)

ฮิสเตอร์รีซิสเป็นค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความคลาดเคลื่อนจากการวัด ที่เกิดจากตัวอุปกรณ์ ISFET โดยทั่วไปการวัดฮิสเตอร์รีซิสจะทำการวัดหลังจากที่ตัวอุปกรณ์ถูกแช่ในสารละลายตัวอย่าง

ที่เป็นกลางเพื่อให้ตัวอุปกรณ์มีเสถียรภาพและสมดุลทางอุณหภูมิ ผลจากการวัดค่าฮีสเทอรีซิส ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7-10-7-4-7 แสดงดังในรูปที่ 4.24



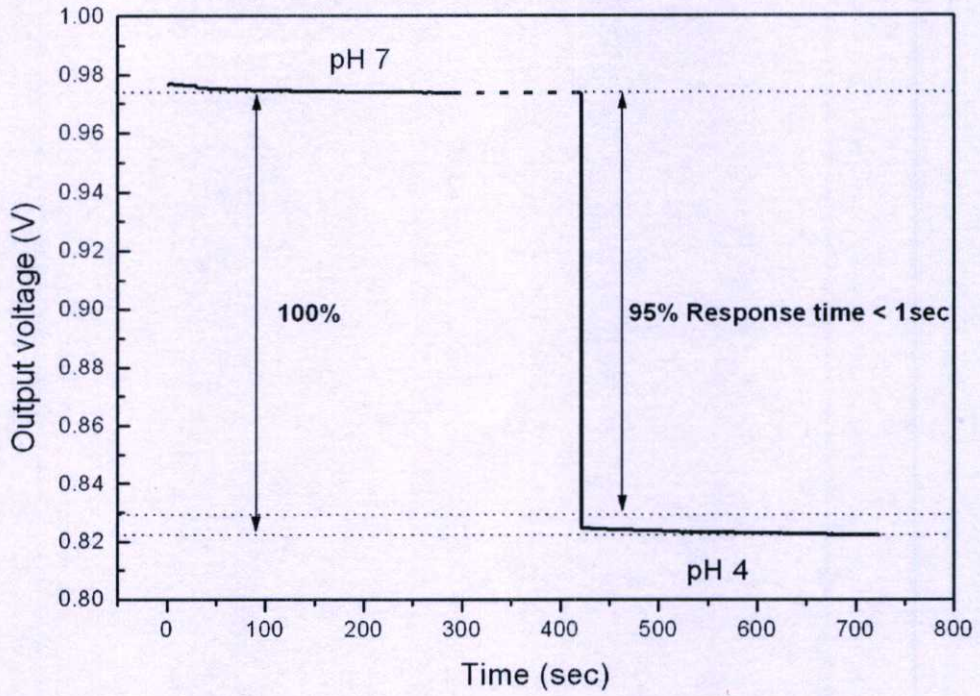
รูปที่ 4.24 ลักษณะฮีสเทอรีซิสของรอบการวัดเริ่มจากสารละลายตัวอย่างค่า pH 7-10-7-4-7

ผลจากการทดลองในรูปที่ 4.24 เป็นการวัดฮีสเทอรีซิสในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7-10-7-4-7 มีค่าเท่ากับ 1.052 mV สาเหตุที่ทำให้ค่าฮีสเทอรีซิสไม่เท่ากับศูนย์ หรือทับกันพอดี อาจเกิดจากผลของ Memory effect บริเวณผิวหน้าของชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนในสารละลายตัวอย่างค่า pH มีการแพร่เข้ามาฝังตัวอยู่ในชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเพิ่มขึ้นทีละน้อยตามความเข้มข้นของสารละลาย และระยะเวลาในการทดสอบ

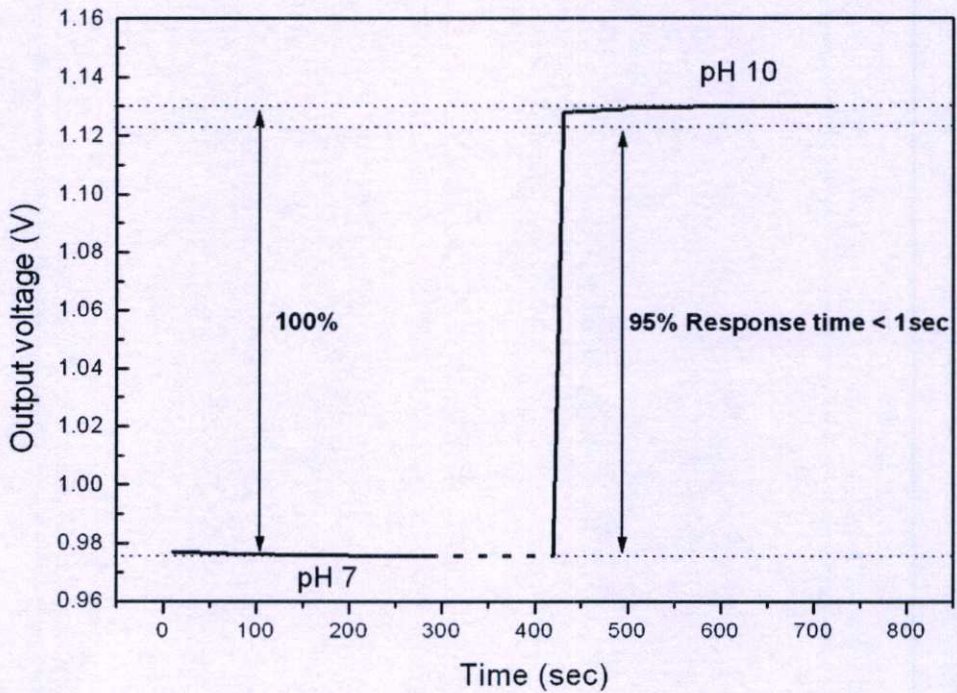
4.5.5 เวลาของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (Response time)

การทดสอบหาค่าเวลาของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ของตัวอุปกรณ์ ISFET แบบที่แกนแนลมีขนาดความกว้างต่อความยาวเท่ากับ $4000 \mu\text{m} / 5 \mu\text{m}$ โดยให้แรงดัน V_{DS} มีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 V และกระแส I_{DS} เท่ากับ 40 μA

โดยทำการทดสอบในสารละลายตัวอย่างที่เป็นกลาง (pH7) ไปยังสารละลายที่เป็นกรด (pH4) และจากสารละลายที่เป็นกลางไปยังสารละลายที่เป็นด่าง (pH10) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตกับเวลา สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าเวลาของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างได้



รูปที่ 4.25 เวลาของการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของค่า pH 7 ไปยัง pH 4



รูปที่ 4.26 เวลาของการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ของค่า pH 7 ไปยัง pH 10

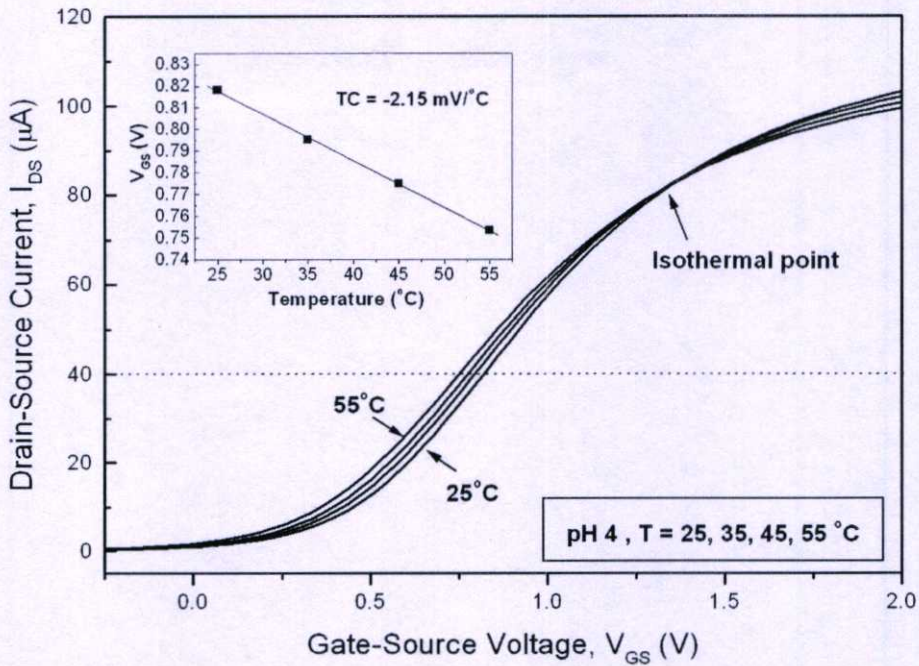
ผลการทดสอบในรูปที่ 4.25 เป็นการทดสอบจากสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ไปยังสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 ใช้เวลาในการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 1 วินาที ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 4.26 เป็นการทดสอบจากสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ไปยังสารละลายตัวอย่างค่า pH 10 เวลาในการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 1 วินาที เช่นกัน ซึ่งถือได้ว่าอุปกรณ์ฮีสเฟทมีความไวในการตอบสนองสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับหัววัดความเป็นกรด-ด่าง แบบกระเปาะแก้ว [33]

4.6 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET แบบที่เซนแนลมีขนาดความกว้างต่อความยาวเท่ากับ $4000 \mu\text{m} / 5 \mu\text{m}$ เป็นการศึกษาจากการวัดคุณสมบัติเฉพาะกระแส-แรงดัน $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ที่อุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55°C ตามลำดับ โดยให้แรงดัน V_{DS} มีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 V

ผลการวัดคุณสมบัติเฉพาะกระแส-แรงดัน $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ ของตัวอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 ที่อุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55°C พบว่ามีจุดทำงานจุดหนึ่งที่กระแส I_{DS} ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เราเรียกจุดนี้ว่า “จุดที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ” หรือ “ISOTHERMAL POINT” หมายถึงจุดที่ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเท่ากับ $0 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และใช้สัญลักษณ์แทนกระแส I_{DS} ตำแหน่งนี้เป็น “ I_{DS0} ” [34] ซึ่งมีค่าเท่ากับ $83.1 \mu\text{A}$ จากลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าค่าแรงดัน V_{GS} ณ จุดทำงานของตัวอุปกรณ์ ISFET ที่มีค่ากระแส I_{DS} น้อยกว่าค่ากระแส I_{DS0} จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในสารละลายตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น และ ณ จุดทำงานของตัวอุปกรณ์ ISFET ที่มีค่ากระแส I_{DS} สูงกว่าค่ากระแส I_{DS0} พบว่าแรงดัน V_{GS} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในสารละลายตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น จากการพิจารณาจุดทำงานที่ค่ากระแสเดรนเท่ากับ $40 \mu\text{A}$ ให้ค่าแรงดันเกตเท่ากับ 0.8183, 0.7952, 0.7749 และ 0.7534 V ในสารละลายตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55°C ตามลำดับ ได้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficients: TC) เท่ากับ $-2.15 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ แสดงดังในรูปที่ 4.27

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 และ pH 10 มีค่าเท่ากับ -1.85 และ $-1.29 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 คุณสมบัติเฉพาะกระแส-แรงดัน ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 ที่อุณหภูมิ 25-55 $^{\circ}C$

ผลการวัดคุณสมบัติเฉพาะกระแส-แรงดัน I_{DS} - V_{GS} ของตัวอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ที่อุณหภูมิ 25 และ 55 $^{\circ}C$ แสดงในรูปที่ 4.28 พบว่ากระแส-แรงดัน I_{DS} - V_{GS} แปรผันกับอุณหภูมิ จากหลักการทํางานของอุปกรณ์ ISFET อธิบายได้ด้วยทฤษฎีการทํางานของอุปกรณ์ MOS คุณสมบัติกระแส I_{DS} สำหรับการทํางานในย่านไม่อิ่มตัวของอุปกรณ์ ISFET ชนิดเอ็นแชนแนล แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ อธิบายดังสมการที่ 2.4 โดยที่แรงดันขีดเริ่ม V_T อธิบายด้วยสมการที่ 4.1 [35]

$$V_T = \underbrace{E_{ref}}_{\text{Reference electrode}} - \underbrace{\psi_i + \psi_{sol}}_{\text{Electrolyt / insulator}} - \underbrace{\phi_s - Q_{dm}/C_i + 2\psi_F}_{\text{Semiconductor}} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (2.4) สามารถอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติเฉพาะกระแส-แรงดัน (I_{DS} - V_{GS}) ของอุปกรณ์ ISFET แปรผันกับอุณหภูมิเกิดจากค่าพารามิเตอร์ 2 ชนิด คือสภาพคล่องของอิเล็กตรอน (μ_n) และแรงดันขีดเริ่ม V_T กล่าวคือ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.28 สภาพคล่องของอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชันจะลดลง และแปรกับอุณหภูมิอย่างเป็นฟังก์ชันของเอ็กโปเนนเชียลในช่วงการทํางานของแรงดัน V_{GS} อยู่เหนือจุดที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังสมการที่ (4.2)

$$\mu_n \propto T^{-\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

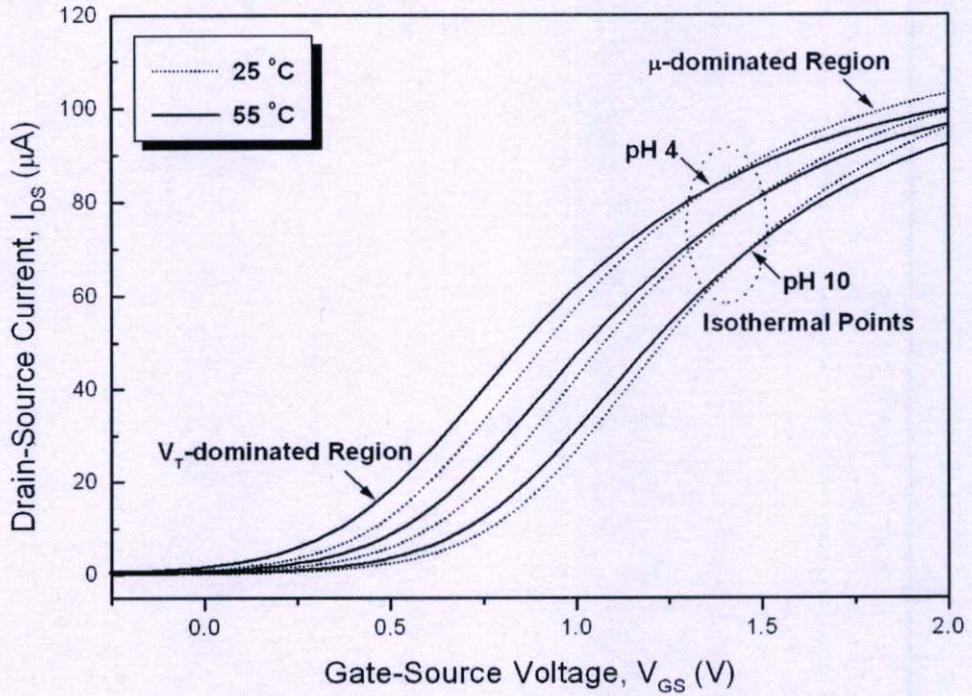
และเมื่ออุปกรณ์ ISFET มีช่วงการทำงานของแรงดัน V_{GS} อยู่ได้จุดที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าแรงดันขีดเริ่มจะแปรผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือแรงดัน V_T จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในสารละลายตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.21

การที่แรงดันขีดเริ่มแปรผันกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 7 และ 10 ที่แสดงในรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29 ซึ่งโดยทั่วไปแรงดันขีดเริ่มประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ส่วนของผิวสัมผัสระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลาย และส่วนของสารกึ่งตัวนำ [36] แสดงในสมการที่ 4.1 เมื่อพิจารณาที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl พบว่าแรงดัน V_{GS} เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเท่ากับ $0.14 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ [34,37]

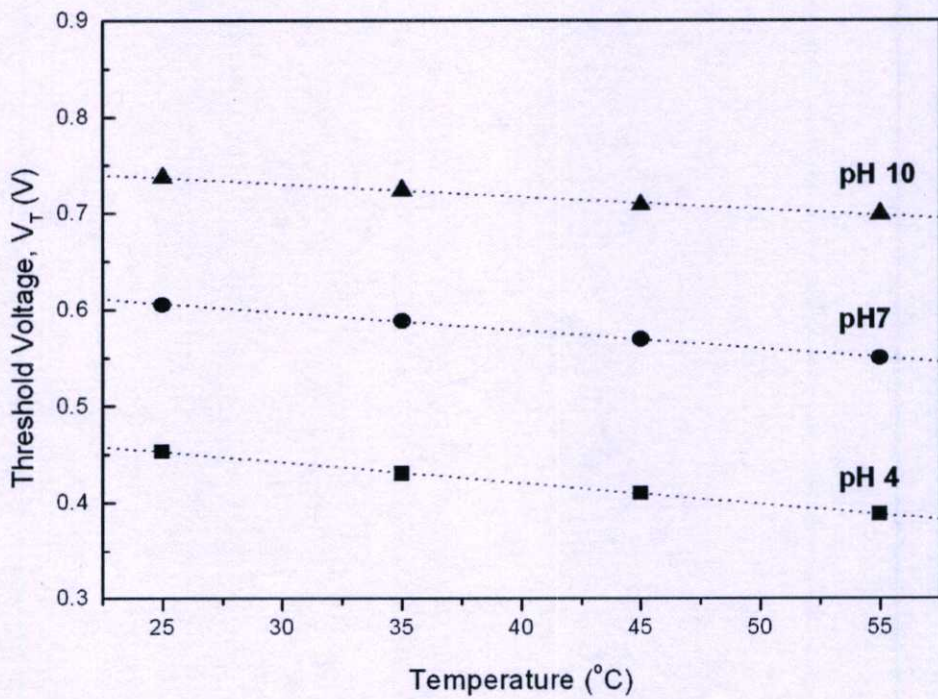
ตารางที่ 4.2 สารละลายตัวอย่างค่า pH ที่อุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55 °C

Standard Buffer Solution	Temperature			
	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C
pH 4	4.01	4.02	4.04	4.08
pH 7	7.00	6.98	6.97	6.97
pH 10	10.01	9.97	9.86	9.81

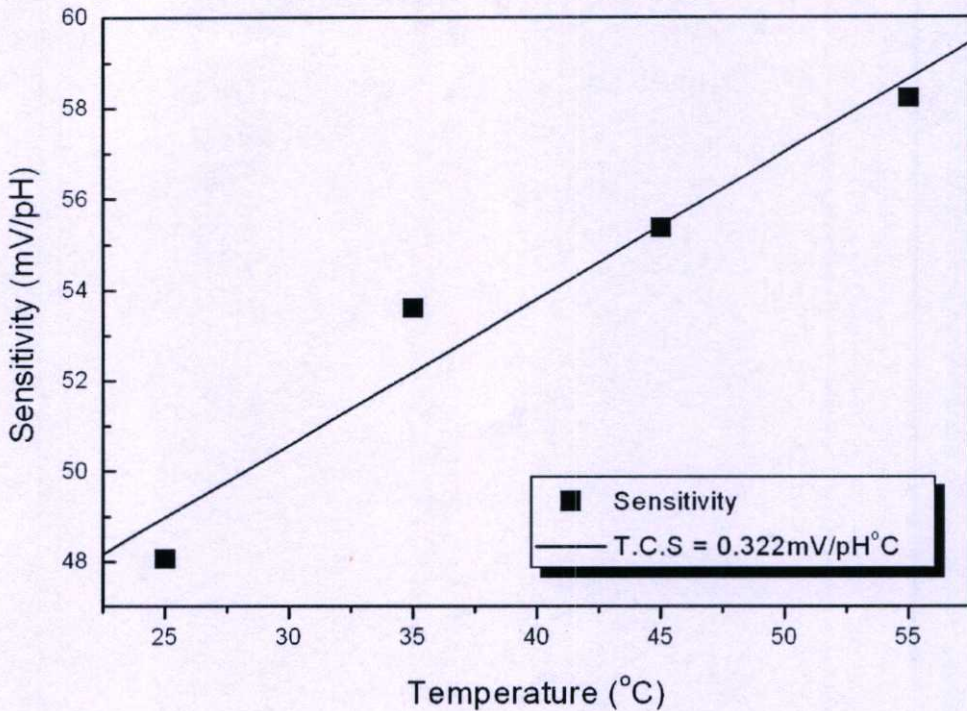
สำหรับส่วนของรอยต่อชั้นฉนวนกับสารละลาย ซึ่งรวมไปถึงสารละลายตัวอย่างค่า pH เมื่อพิจารณาสารละลายตัวอย่างค่า pH ที่ใช้สำหรับงานวิจัยครั้งนี้พบว่าสารละลายตัวอย่างค่า pH เปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าอุณหภูมิดังตารางที่ 4.2 และอุณหภูมิยังแปรผันกับศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อชั้นฉนวนกับสารละลาย ซึ่งสามารถอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.28 คุณสมบัติเฉพาะกระแส-แรงดัน I_{DS} - V_{GS} ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 7 และ 10 ที่อุณหภูมิ 25 และ 55 °C



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับอุณหภูมิในสารละลายตัวอย่าง



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอุณหภูมิ

ผลจากการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.30 เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอุณหภูมิของตัวอุปกรณ์อิเล็กโทรด ที่จุดทำงานค่ากระแสตรงเท่ากับ $40 \mu\text{A}$ ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4 , 7 และ 10 ที่อุณหภูมิ 25 , 35 , 45 และ 55 °C พบว่า ผลการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง แปรผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ผลการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 48.05 , 53.6 , 55.37 และ 58.22 mV/pH ในสารละลายตัวอย่างที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 , 35 , 45 และ 55 °C ตามลำดับ ได้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (Temperature coefficient of the sensitivity: T.C.S) เท่ากับ 0.322 mV/pH°C

สำหรับในส่วนของสารกึ่งตัวนำพบว่าศักย์เฟอร์มิ (ψ_F) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่แปรผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิมียุ่ค่าสูงขึ้นค่าของศักย์เฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ 4.3

$$\psi_F(T) = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (4.3)$$

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของพาหะในสารอินทรีนซิค (n_i) จากสมการที่ 4.4 พบว่าค่าของ n_i ขึ้นกับอุณหภูมิ และช่องว่างพลังงาน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าของ n_i จะมีค่ามากขึ้น โดย n_i จะแปรกับ $T^{3/2}$ เมื่อ K เป็นค่าคงที่

$$n_i(T) = K.T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) \quad (4.4)$$

$$E_G(T) = 1.17 - \frac{4.73 \times 10^{-4} T^2}{T + 636} \quad (4.5)$$

และเมื่อพิจารณาค่าของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน (E_G) จากสมการที่ 4.5 พบว่าขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าของช่องว่างพลังงานจะมีค่าลดลง [38]

จากการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิต่อตัวอุปกรณ์ฮีสเฟท พบว่าเป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเช่นเดียวกับอุปกรณ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ด้วยเหตุนี้เมื่อตัวอุปกรณ์ฮีสเฟทถูกนำมาใช้ตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่อุณหภูมิต่างๆ จำเป็นต้องมีการชดเชยอุณหภูมิในขณะวัดด้วย เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างตัวตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้โครงสร้างออสเฟทที่มีฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน และใช้กระบวนการสร้างเดียวกับการผลิตซีมอส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ที่นำไปใช้เป็นชั้นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน โดยสร้างจากกระบวนการ LPCVD มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 7.54 สอดคล้องกับผลการวัดค่าดัชนีการสะท้อนกลับของฟิล์มด้วยเครื่อง Ellipsometer มีค่าเท่ากับ 2.0 ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ และจากการทดสอบการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ด้วยโครงสร้าง EIS ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ที่ความหนา 30, 50 และ 70 nm พบว่ามีค่าเท่ากับ 49.62, 48.72 และ 48.68 mV/pH ตามลำดับ

2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเท่ากับ 0.41% เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้กับตัวอุปกรณ์ออสเฟท

3. กระแสรั่ว I_{GS} ของตัวอุปกรณ์ออสเฟทหลังการบรรจุภัณฑ์เสร็จแล้วมีค่าเท่ากับ 0.1-0.75 μA เมื่อทำการทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 ที่แรงดัน V_{GS} เท่ากับ 2.5 V และแรงดัน V_{DS} เท่ากับ 0.2 V เป็นการแสดงถึงการบรรจุภัณฑ์ที่ดี

4. การทำงานของตัวอุปกรณ์ออสเฟทสามารถแบ่งย่านการทำงานออกเป็นสองย่านคือ การทำงานในย่านไม่อิ่มตัวและย่านอิ่มตัว เมื่อทดสอบในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 พบว่าทั้งสองย่านมีการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 47.17-48.06 mV/pH

5. ตัวอุปกรณ์ออสเฟทแบบที่เซนแนลมีขนาดความกว้างเท่ากับ 500, 2000 และ 4000 μm ส่วนความยาวเท่ากับ 5 μm คงที่ มีการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ใกล้เคียงกันมากประมาณ 47.48-48.35 mV/pH ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ที่แรงดัน V_{DS} 0.2 V และกระแส I_{DS} 40 μA แสดงให้เห็นว่าขนาดความกว้างของเซนแนลไม่ส่งผลต่อการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง

6. ผลการวัดคุณสมบัติเฉพาะของตัวอุปกรณ์ออสเฟทที่สร้างขึ้น สามารถแยกความแตกต่างของสารละลายตัวอย่างได้ตั้งแต่ช่วงค่า pH 1-13 ค่าอัตราการครีฟท์ในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ 0.162 mV/h ผลของฮีสเทอรีซิสจากการวัดในสารละลายตัวอย่างค่า pH 7-10-7-4-7 มีค่าเท่ากับ 1.052 mV เวลาของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าต่ำกว่า 1 วินาที ที่วัดจากสารละลายค่า pH 7 ไปยังสารละลายค่า pH 4 และสารละลายค่า pH 7 ไปยังสารละลายค่า pH 10

7. อุณหภูมิมีผลต่อการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง จากการทดสอบในสารละลาย ตัวอย่างค่า pH 4, 7 และ 10 ที่อุณหภูมิเท่ากับ 25-55 °C มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิอยู่ในช่วง -2.15 ถึง -1.29 mV/°C และมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 0.322 mV/pH°C

โครงสร้างอิเสเฟทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีความสำคัญและน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจาก โครงสร้างดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวัดไอออนชนิดอื่นๆ ได้ด้วย เช่น Na^+ K^+ Ca^+ และ Cl^- รวมทั้งการวัดกลูโคส และ DNA โดยการเปลี่ยนชนิดของชั้นฟิล์มเมมเบรนที่ไวต่อไอออน และการเตรียมสารตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Morgenshtein, L. Sudakov-Boreysha, U. Dinnar, C.G. Jakobson, and Y. Nemirovsky
“Wheatstone-bridge readout interface for ISFET/REFET applications”, Sens. Actuators
B 98, 2004, pp. 18–27.
- [2] A. Fog and R. Buck, “Electronic semiconductor oxides as pH sensors”, Sens. Actuators 5,
1984, pp. 137–146.
- [3] N. Satake, Y. Matsumura and M. Fujimoto, “Temperature coefficient of and oxygen effect on
the antimony microelectrode”, Jpn. J. Physiol. 30, 1980, pp. 671–687.
- [4] M. Fujimoto, Y. Matsumura and N. Satake, “General properties of antimony microelectrode in
comparison with glass microelectrode for pH measurement”, Jpn. J. Physiol. 30, 1980,
pp. 491–508.
- [5] Erik Lauwers, Jan Suls, Walter Gumbrecht, David Maes, Georges Gielen, and Willy, “A
CMOS Multiparameter Biochemical Microsensor With Temperature Control and Signal
Interfacing”, IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 36, NO. 12,
DECEMBER 2001, pp. 2030-2038.
- [6] Hon-Sum Wong, “A CMOS –integrated ISFET-operational transducer employing differential
sensing”, IEEE Transactions on Electron devices, Vol. 36(3), 1989, pp. 479-487.
- [7] P. Bergveld, “Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological
measurement”, IEEE Transactions on Electron devices, Vol. BME-17(1), 1970,
pp. 59-63.
- [8] T. Matsuo and K.D. Wise, “An integrated field-effect electrode for biopotential recording”
IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-21, 1974, pp. 485-487.
- [9] P. Bergveld, “Development, operation, and application of the Ion-Sensitive Field Effect
Transistor as a tool for electrophysiology”, IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-19, No.5,
September 1972, pp.342-351.
- [10] P. Bergveld, “Future applications of ISFETs”, Sensor and Actuators B4, 1991, pp.125-133.
- [11] T. Matsuo and M. Esashi, “Methods of ISFET fabrication”, Sensors and Actuators 1, 1981,
pp.77-96.
- [12] Luc Bousse and Shahriar Mostar-shed, “Comparison of the hysteresis of Ta₂O₅ and Si₃N₄
pH-sensing”, Sensors and Actuators B17, 1994, pp. 157-164.

- [13] L. Bousse, H.H. Van Den Vlekkert and N.F. De Rooij, "Hysteresis in Al_2O_3 gate ISFETs", *Sensors and Actuators B2*, 1990, pp.103-110.
- [14] A.S. Poghossian: "The super-nerstian pH sensitivity of Ta_2O_5 gate ISFETs", *Sensors and Actuators B*, 1992, pp.367-370.
- [15] Luc Bousse and Shahriar Mostar-shed., "Comparison of the hysteresis of Ta_2O_5 and Si_3N_4 , pH-sensing-insulators", *Sensors and Actuators B*, 17, 1994, pp. 157-164.
- [16] Chung-We Pan, Jung-Chuan Chou, Tai-Ping Sun and Shen-Kan Hsiung "Development of the tin oxide pH electrode by the sputtering method", *Sensors and Actuators B* 108, 2005, pp. 863–869.
- [17] Hung-Kwei Liao, Jung-Chuan Chou, Wen-Yaw Chung, Tai-Ping Sun and Shen-Kan Hsiung, "Study of amorphous tin oxide thin films for ISFET applications", *Sensors and Actuators B* 50, 1998, pp. 104–109.
- [18] Hung-Kwei Liao, En-Shieh Yang, Jung-Chuan Chou, Wen-Yaw Chung, Tai-Ping Sun, and Shen-Kan Hsiun, "Temperature and Optical Characteristics of Tin Oxide Membrane Gate ISFET", *IEEE Transactions on electron devices*, VOL. 46, NO. 12, DECEMBER 1999, pp. 2278-2281.
- [19] JAN S-S, CHEN Y-C, CHOU J-C, CHENG C-C and LU C-T, "Nonideal Factors of Ion-Sensitive Field-Effect Transistors with Lead Titanate Gate", *Jpn J Appl Phys Part 1*, VOL.41,NO.10, 2002, pp.6297-6301.
- [20] Shiun-Sheng Jan, Jung-Lung Chiang, Ying-Chung Chen, Jung-Chuan Chou and Chien-Chuan Cheng, "Characteristics of the hydrogen ion-sensitive field effect transistors with sol-gel-derived lead titanate gate", *Analytica Chimica Acta* 469, July 2002, pp. 205–216.
- [21] 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* 88, 2003, pp. 1-20.
- [22] รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเดช., เขมิกอนดักเตอร์ดีไวซ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2549.
- [23] Kwok K. Ng, "Complete guide semiconductor devices", McGraw-Hill, New York, 1995, pp. 518-520.
- [24] P. Bergveld, "ISFET Theory and Practice", *IEEE sensor conference Toronto*, October 2003, pp.1-26.

- [25] L. Bousse, N.F. de Rooij and P.Bergveld: "Operation of chemically sensitive field effect sensors and as a function of the insulator-electrolyte interface", IEEE Trans. Electron Devices, ED-30, 1983, pp.1263-1270.
- [26] S.D.Moss, C.C.Johnson and J.Janata, "Hydrogen, calcium and potassium ion sensitive FET transducer: a preliminary report", IEEE Trans. On Biomedical Eng., BME-25, 1978, pp.49-54.
- [27] Jung Chuan Chou and Ching Nan Hsiao, "The hysteresis and drift effect of hydrogenated amorphous silicon for ISFET", Sensors and Actuators B 66, 2000, pp. 181–183.
- [28] Jung-Chuan Chou and Chen-Yu Weng, "Sensitivity and hysteresis effect in Al_2O_3 gate pH-ISFET", Materials Chemistry and Physics 71, 2001, pp. 120–124.
- [29] Jung-Lung Chiang, Shiun-Sheng Jan, Jung-Chuan Chou and Ying-Chung Chen "Study on the temperature effect, hysteresis and drift of pH-ISFET devices based on amorphous tungsten oxide", Sensors and Actuators B 76, 2001, pp. 624–628.
- [30] Bohuslav PALAN "Design of pH-ISFET micro-sensors low noise and inductors Integrated suspended a high quality factor Q" Degree of Ph.D in microelectronics Department of Microelectronics, Czech Technical University in Prague, 2002
- [31] Virginia Semiconductor. "The General Properties of Si, Ge, SiGe, SiO₂ and Si₃N₄." [Online]. Available: <http://www.virginiasemi.com/pdf/generalpropertiesSi62002.pdf>
- [32] A.A. Poghosian. "Determination of the pH_{pzc} of insulators surface from capacitance–voltage characteristics of MIS and EIS structures" Sensors and Actuators., B 44, 1997. pp.551–553.
- [33] M. Fujimoto, Y. Matsumura and N. Satake, "General properties of antimony microelectrode in comparison with glass microelectrode for pH measurement", Jpn. J. Physiol. 30, 1980, pp. 491–508.
- [34] Jung-Chuan Chou, Chen-Yu Weng, Hsjian-Ming Tsai. "Study on the temperature effects of Al_2O_3 gate pH-ISFET" Sensors and Actuator B 81, 2002, pp. 152-157
- [35] H.-K. Liao, J.-C. Chou, W.-Y. Chung, T.-P. Sun and S.-K. Hsiung, Proc. "Study on pH_{pzc} and surface potential of tin oxide gate ISFET" Materials Chemistry and Physics 59, 1999, pp. 6-11.
- [36] J.C. Chou, Y.E. Wang and J.S. Lin, "Temperature effect of A-Si:H pH-ISFET", Sensor and Actuators. B 63, 2000, pp.92-96.

- [37] Ying-Chung Chena, Shiun-Sheng Jan and Jung-Chuan Chou. "Temperature effects on the characteristics of hydrogen ion-sensitive field-effect transistors with sol-gel-derived lead titanate gates" *Analytica Chimica Acta* 516, 2004, pp. 43–48.
- [38] รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเดช., เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2549).

ภาคผนวก ก.

องค์ประกอบของสารละลายตัวอย่างค่า pH

องค์ประกอบของสารละลายตัวอย่างของค่า pH ต่างๆ

pH value	Composition
pH1	Hydrochloric Acid / Potassium Chloride
pH3	Citric Acid / Sodium Hydroxide Solution / Sodium Chloride
pH5	Citric Acid/Sodium Hydroxide Solution
pH7	$\text{KH}_2\text{PO}_4 / \text{Na}_2\text{HPO}_4$
pH9	Borax / Hydrochloric Acid
pH11	Boric Acid / Sodium Hydroxide Solution/Potassium Chloride

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	24 ตุลาคม พ.ศ. 2524
สถานที่เกิด	พัทลุง
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ความชำนาญเฉพาะด้าน	- กระบวนการผลิตแผ่นวงจรรวม - กระบวนการกัดแบบพลาสติก
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2547-ปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] อวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ, วิน บรรจงปรุ, วุฒินันท์ เจียมศักดิ์ศิริ, โอภาส ตรีทวีศักดิ์, ชาญเดช หรุอนันต์, อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การศึกษาการใช้ไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นร่วมกับอุปกรณ์ ISFET สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ และการวัดค่า pH”, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ปีที่ 27, เล่มที่ 2, หน้า 358-363
- [2] อวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ, วิน บรรจงปรุ, โอภาส ตรี ทวีศักดิ์, นิภาพรรณ กลั่นเงิน, ชาญเดช หรุอนันต์, อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “ซิลิกอนไมโครเซนเซอร์สำหรับการวัดค่า pH และอุณหภูมิ”, ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31, เล่ม 2, หน้า 1039-1042