

พอร์ซซิลิคอนอิเล็กโทรดสำหรับพีเอชเซ็นเซอร์  
Porous Silicon Electrode for PH Sensor



ศุภณัฒ พฤคชวานิช  
Supanun Plukswanich  
อรรธวิท ฤศมา  
Athawit Ausama

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์สซิลิคอนอิเล็กโทรดสำหรับพีเอชเซ็นเซอร์  
Porous Silicon Electrode for PH Sensor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

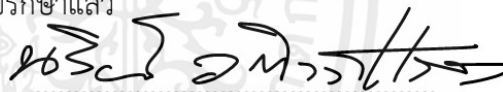
เรื่อง พอร์สซิลิคอนอิเล็กโทรดสำหรับพีเอชเซ็นเซอร์

Porous Silicon Electrode for PH Sensor

ผู้จัดทำ นาย ศุภณัฏฐ์ พลฤกษ์วานิช รหัสประจำตัว 62010894

นาย อรรถวิทย์ อุศมา รหัสประจำตัว 62011036

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	พอร์สซิลิโคนอิเล็กทรอนิกส์สำหรับพีเอชเซ็นเซอร์	
นักศึกษา	นาย ศุภณัฏฐ์ พงกษวานิช	รหัสประจำตัว 62010894
	นาย อรรถวิทย์ อุศมา	รหัสประจำตัว 62011036
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	
ปีการศึกษา	2565	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง	

### บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา PROJECT 2 จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างและศึกษาการสร้างพอร์สซิลิโคนโดยวิธีการแอโนไดซ์เซชันด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แคโทดและศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด-ด่าง แบบโครงสร้างอีจีพีทีที่มีพอร์สซิลิโคนเป็นเมมเบรน การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ภายใต้สภาพความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันพบว่า การนำพอร์สซิลิโคนมาประยุกต์ใช้เป็นเมมเบรนของอุปกรณ์ทำให้อุปกรณ์มีการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่างได้ดีขึ้นเนื่องจากพอร์สซิลิโคนมีโครงสร้างผิวหน้าที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่จึงทำให้จับกับไฮโดรเจนไอออนที่แตกตัวในสารละลายได้มากขึ้น นอกจากนี้จากผลการทดลองการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ภายใต้ pH 4,7 และ 10 โดยใช้พอร์สซิลิโคนที่มีความพรุนต่างกัน พบว่าที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนของพอร์สซิลิโคน ที่มากขึ้นมีการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่างได้ดียิ่งขึ้น

<b>Project Title</b>	Porous Silicon Electrode for PH Sensor	
<b>Student</b>	Mr. Supanun Plukswanich	student id 62010894
	Mr. Atthawit Ausama	student id 62011036
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Electronics Engineering	
<b>Year</b>	2022	
<b>Advisor</b>	Assist.Prof.Narin Atiwongsangthong	

## ABSTRACT

This report, part of the PROJECT 2 course, discusses the process of was form and study the formation of silicon porosity by anodizing method with horizontal double tank electrochemical cells, and to study the process of creating an EGFET structure measuring device with porus silicon as a membrane. This research aims to study the structure and electrical properties of devices under different pH conditions.

It was found that the application of porus silicon as a membrane of the device resulted in a better response to pH. Because porus silicon has a strong bonded surface structure, it can bind more to hydrogen ions that are dissociated in solution. In addition, the results of testing the electrical properties of the device under pH 4,7 and 10 using porosity silicon with different porosity. It was found that increase porosity percentage of silicon porosity had the better response to pH.

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการพอร์สซิลิคอนอิเล็กทรอนิกส์สำหรับพีเอชเซนเซอร์สามารถเกิดขึ้นได้จากคำแนะนำและช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และเพื่อนจากภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ร่วมช่วยกันให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ นอกจากนี้ฉันรู้สึกขอบคุณสำหรับ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ผู้จัดหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านที่สนใจ หากผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ศุภณัฏฐ์ พุกชวานิช

อรรณวิทย์ อูศมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่ออังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 รายละเอียดของรายงาน	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	
2.1 ความเป็นกรด - ด่าง (pH - Value)	5
2.2 หลักการวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH - Measurement)	7
2.2.1 การวัดความเป็นกรด-ด่างด้วยกระดาษลิตมัส	7
2.2.2 การวัดความเป็นกรด - ด่าง ด้วยกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์	8
2.2.3 การวัดความเป็นกรด - ด่าง ด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์	8
2.3 ทรานซิสเตอร์แบบมอส (MOSFET)	10
2.3.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.3.2 คุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต	12
2.4 อุปกรณ์อีจีเฟต (EGFET)	15
2.4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของอุปกรณ์อีจีเฟต	15
2.4.2 ลักษณะสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์อีจีเฟต	16
2.5 ทฤษฎีพอร์สซิลิคอน (Porous silicon)	19
2.5.1 โครงสร้างพอร์สซิลิคอน	19
2.5.2 การจำแนกประเภทของพอร์สซิลิคอน	20
2.6 เทคนิคการสร้างพอร์สซิลิคอน (Formation Technique)	21
2.6.1 วิธีการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี	21
2.7 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน	23
2.7.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน	23
2.8 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน	25
2.9 การดักจับไฮโดรเจนอออนของชั้นพอร์สซิลิคอน	26
<b>บทที่ 3 กระบวนการทดลองและเครื่องมือที่ใช้</b>	
3.1 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน	29
3.1.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี	
3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.1.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี	31
3.1.4 การศึกษาขั้นตอนการสร้างหัววัดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่าง โครงสร้าง EGFET โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน	32
3.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด	35
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด – ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอน	
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	
4.1 ความไวการตอบสนองของกระแสที่มีต่อค่าพีเอช (โหมดกระแส)	37
4.2 ความไวการตอบสนองของแรงดันที่มีต่อค่าพีเอช (โหมดแรงดัน)	39
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	41
<b>บรรณานุกรม</b>	42

## บทที่ 1

### บทนำ

อุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟต (Extended-Gate Field Effect Transistor : EGFET) เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างแบ่งแยกออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนของเมมเบรนที่ใช้ตรวจวัดและ ส่วนของมอสเฟต ซึ่งข้อได้เปรียบหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีการบรรจุ ภัณฑ์ที่ง่าย ตอบสนองต่อความเป็นกรด ด่าง ได้เป็นอย่างดี ทำความสะอาดได้ง่าย เป็นต้น

ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐาน และขอบเขตของ งานวิจัย

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการตรวจวัดค่าสภาพความเป็นกรด ด่าง (Acid - Alkaline) เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญมาก ทั้งในด้านอุตสาหกรรมทางด้านเคมี (Industrial Chemical) ห้องปฏิบัติการทางด้านเคมี (Chemical Laboratory) ชีวเคมี (Biochemical) ทางด้านเกษตรกรรม (Agriculture) ตลอดจนกระทั่งอุตสาหกรรม ทางด้านอาหารและยา (Food and Drug) เนื่องจากมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างมากซึ่งสภาพ ความเป็นกรด ด่างจะเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่บ่งบอกถึงคุณภาพของกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ต่างๆการวัด สภาพความเป็นกรด ด่าง ที่ถูกนำมาใช้ในปัจจุบันนั้นก็จะมีการตรวจวัดด้วยวิธีการและเครื่องมือหลายๆ แบบ ด้วยกัน เช่น การตรวจเช็คด้วยกระดาษลิตมัส การวัดด้วยกระดาษยูนิเวอแซลอินดิเคเตอร์ (Universal Indicator) และการตรวจวัดด้วยพีเอชมิเตอร์แบบกระดาษเปียก ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและใช้ งานตรวจวัดได้ง่าย เป็นต้น แต่วิธีการตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างที่ได้กล่าวมานั้นก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่ บางประการ ยกตัวอย่างเช่น ในการวัดด้วยกระดาษลิตมัสจะเป็นการวัดแบบเทียบสีซึ่งอาจจะเกิดการผิดพลาด ในการเทียบสีหรือสีที่ผิดเพี้ยนจากสารเจือปน จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดสูงๆ อีกทั้งการวัดค่าความเป็นกรดด่างด้วยเครื่องวัดพีเอชแบบกระดาษเปียกก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดและความ ทนทานเนื่องจากอาจจะเกิดการแตกร้าวของตัวกระดาษเปียกได้ อุปกรณ์ EGFET เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่สามารถ วัดค่าสภาพความเป็นกรด - ด่างได้ ถูกค้นพบโดย Van der Speigel ที่ Moore School Pennsylvania [1] ซึ่ง โครงสร้างแบบ EGFET นั้นจะถูกแบ่งแยกออกเป็นสองส่วนด้วยกันได้แก่ ส่วนของเมมเบรนที่ใช้ในการตรวจจับ ไฮโดรเจนไอออน (H) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความเป็นกรด ด่างในสารเคมีและส่วนของมอสเฟต โดยที่ส่วนที่ใช้เป็น เมมเบรนนั้นจะถูกต่อแยกออกมาจากขาเกตของมอสเฟต ซึ่งในโครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้ EGFET ซึ่งมีข้อ

ได้เปรียบที่หลากหลาย เช่น มอสเฟตที่ใช้ในการตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างในสารเคมีจะปราศจากการสัมผัสกับสารเคมีโดยสิ้นเชิงซึ่งทำให้มอสเฟตนั้นสามารถใช้งานได้หลายครั้ง มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน มีขั้นตอนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ มีการบรรจุภัณฑ์ที่ง่าย ไม่ไวต่อแสงและอุณหภูมิ เป็นต้น ในส่วนของวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นเมมเบรนในการตรวจวัดไฮโดรเจนอ็อกไซด์สำหรับโครงสร้าง EGFET เพื่อป้องกันค่าความเป็นกรด - ด่าง นั้นได้มีอยู่หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) [2], ทินออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) [3], ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [4], ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) [5], พาลาเดียมออกไซด์ (PdO) [6], รูทีเนียมไดออกไซด์ (RuO<sub>2</sub>)[7] เป็นต้น

พอร์สซิลิคอนเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่มีความน่าสนใจซึ่งได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับไอร่าของแอลกอฮอล์ (Alcohol Sensor) [8], สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (Anti-reflection) [9], อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Photo detector) [10-12] อีกทั้งยังได้มีงานวิจัยที่ได้นำพอร์สซิลิคอนไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบทางการแพทย์ เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดเอนไซม์ [13-14] และมีการทดสอบตรวจวัดเอนไซม์ที่สภาพความเป็นกรด - ด่างที่ต่างกัน ซึ่งพบว่าในงานวิจัยดังกล่าวพอร์สซิลิคอนสามารถตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ด่างได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะได้นำพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างแบบ EGFET เพื่อศึกษาถึงกระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการแอโนไดซ์เซชันด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่าง ๆ
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนในการตรวจวัด
3. เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อสภาพความเป็นกรด - ด่าง ของอุปกรณ์แบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนในการตรวจวัดเมื่อเทียบกับซิลิคอนแบบแผ่นเรียบ
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน
5. เพื่อศึกษาผลกระทบจากความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เข้มข้นของไฮโดรเจนอ็อกไซด์ในสารละลาย

### 1.3 สมมุติฐานการศึกษา

อุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีพีเอที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน เป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการสร้างและนำมาใช้งานในการตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง ได้ดีเนื่องจากพอร์สซิลิคอนเป็นวัสดุที่ดีโดยใช้พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากในการดักจับไฮโดรเจนอออนในสารละลายซึ่งเป็นตัวบ่งบอกสภาพความเป็นกรดต่างในสารละลาย และเมื่อในสารละลายมีปริมาณไฮโดรเจนอออนมากก็จะทำให้ผิวหน้าของพอร์สซิลิคอนนั้นมีประจุ H จำนวนมากทำให้ขาคัดของมอสเฟตที่ถูกนำมาต่อใช้งานมีศักย์บวกเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อช่องทางเดินกระแสซึ่งจะทำให้มอสเฟตแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกมาโดยแปรผันตามประมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนอออนในสารละลาย

ดังนั้นจึงสมมุติฐานว่าหากนำพอร์สซิลิคอนมาใช้เป็นเมมเบรนของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด- ด่าง แบบโครงสร้างอีจีพีเอ จะทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีการตอบสนองต่อสภาพความเป็นกรด - ด่างได้ดี

### 1.4 ขอบเขตของการดำเนินงาน

1. ศึกษาการสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี
2. ศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีพีเอที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน
3. ศึกษาหลักการตรวจจับไฮโดรเจนอออน (H) ในสารละลายของพอร์สซิลิคอนซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกปริมาณความเป็นกรด-ด่าง
4. ศึกษาการตอบสนองต่อสภาพความเป็นกรด - ด่าง ของอุปกรณ์ภายใต้ค่าความเป็นกรด - ด่าง แตกต่างกัน
5. ศึกษาผลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ภายใต้สภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกัน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างจีพีเอ
2. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเซ็นเซอร์ทางเคมีบนพื้นฐานของโครงสร้างอีจีพีเอ
3. เพื่อเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ทางเลือกในการใช้ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง ของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 รายละเอียดของรายงาน

รายงานเล่มนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีพีตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน ซึ่งจะทำการแบ่งเนื้อหาออกเป็นทั้งหมดจำนวน 5 บท โดยในแต่ละบทจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** ความเป็นมาของปัญหา ความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

**บทที่ 2** ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ทฤษฎีของของความเป็นกรด - ด่าง หลักการวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง หลักการของพีเอชมิเตอร์ ทฤษฎีของมอสเฟต อุปกรณ์อีจีพีต และกลไกในการดักจับไฮโดรเจนไอออนของพอร์สซิลิคอน

**บทที่ 3** กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการแอโนไดซ์เซชันด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนสำหรับใช้เป็นเมมเบรน สร้างอุปกรณ์อีจีพีต และการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

**บทที่ 4** ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

**บทที่ 5** สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ การประยุกต์ใช้และแนวทางการพัฒนาต่อ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ความเป็นกรด – ด่าง (pH - Value) [15]

ความเป็นกรด – ด่างหรือที่นิยมเรียกกันโดยทั่วไปว่าค่าพีเอช (Potential of Hydrogen ion : pH) และเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงปริมาณของไฮโดรเจนไอออนหรือบ่งบอกถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย (Hydrogen or hydronium ion;  $H^+$  or  $H_3O^+$ ) ซึ่งเกิดจากสารที่สามารถแตกตัวให้อนุมูลกรด ( $H^+$ ) หรือด่าง ( $OH^-$ ) ได้ โดยค่าพีเอชของสารละลายจะเป็นค่าลอการิทึมของไฮโดรเจนไอออนที่เป็นลบ และการคำนวณหาค่าพีเอชจะสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (2.1)

$$pH = -\log[H^+] \quad (2.1)$$

โดยที่ pH คือ ค่าความเป็นกรด – ด่าง  
 $H^+$  คือ ปริมาณของไฮโดรเจนไอออน (โมล/ลิตร)

โดยที่ค่าของความเป็นกรด – ด่างจะมีค่าตั้งแต่ 0 – 14 ซึ่งถ้าหากสารละลายมีค่าความเป็นกรด – ด่าง ต่ำกว่า 7 นั้น ก็หมายถึงสารละลายดังกล่าวมีสภาพเป็นกรด หรือถ้าหากสารละลายมีค่าความเป็นกรด – เบส มีค่าสูงกว่า 7 นั้นก็จะหมายถึงสารละลายนั้นมีสภาพเป็นด่าง หรือถ้าหากสารละลายนั้นมีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 7 ก็สามารถบอกได้ว่าสารละลายนั้นมีสภาพเป็นกลางและสามารถเขียนสรุปสั้นๆได้ว่า

- $pH < 7$  สารละลายมีสภาพเป็นกรด
- $pH = 7$  สารละลายมีสภาพเป็นกลาง
- $pH > 7$  สารละลายมีสภาพเป็นด่าง

หรืออาจจะเขียนเป็นสเกลได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สเกลบอกค่าความเป็นกรด – ด่าง

สภาพ	กรด	←—————→	กลาง	—————→	ด่าง									
ค่า pH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการบอกค่าความเป็นกรด - ต่างด้วยค่า pH แล้วยังสามารถบอกค่าของความเป็นกรด - ต่างของสารละลายได้โดยการใช้ค่า pOH (Potential of Hydroxyl ion) แทนได้อีกเช่นกัน โดยที่ค่าของ pOH คือค่าของปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{OH}^-$  ในสารละลาย ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (2.2)

$$pOH = -\log[\text{OH}^-]$$

(2.2)

โดยที่ pOH คือ ค่าความเป็นกรด - ต่าง

$\text{OH}^-$  คือ ปริมาณของไฮดรอกซิลไอออน (โมล/ลิตร)

ซึ่งเมื่อนำค่าปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนและความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายมาเขียนลงในตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อสารละลายมีปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) เพิ่มขึ้นก็จะทำให้สารละลายดังกล่าวมีสภาพเป็นกรดเพิ่มขึ้นไปด้วยและในทางตรงกันข้ามเมื่อมีปริมาณของไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) เพิ่มขึ้นก็จะทำให้สารละลายนั้นมีสภาพเป็นด่างเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่าความเป็นกรด - ต่างที่ความเข้มข้นของปริมาณ  $\text{H}^+$  และ  $\text{OH}^-$  ต่างๆกัน

$\text{H}^+$ โมล / ลิตร	pH	$\text{OH}^-$ โมล / ลิตร	pOH
$1 \times 10^0$	0	$1 \times 10^{-14}$	14
$1 \times 10^{-1}$	1	$1 \times 10^{-13}$	13
$1 \times 10^{-2}$	2	$1 \times 10^{-12}$	12
$1 \times 10^{-3}$	3	$1 \times 10^{-11}$	11
$1 \times 10^{-4}$	4	$1 \times 10^{-10}$	10
$1 \times 10^{-5}$	5	$1 \times 10^{-9}$	9
$1 \times 10^{-6}$	6	$1 \times 10^{-8}$	8
$1 \times 10^{-7}$	7	$1 \times 10^{-7}$	7
$1 \times 10^{-8}$	8	$1 \times 10^{-6}$	6
$1 \times 10^{-9}$	9	$1 \times 10^{-5}$	5
$1 \times 10^{-10}$	10	$1 \times 10^{-4}$	4
$1 \times 10^{-11}$	11	$1 \times 10^{-3}$	3
$1 \times 10^{-12}$	12	$1 \times 10^{-2}$	2
$1 \times 10^{-13}$	13	$1 \times 10^{-1}$	1
$1 \times 10^{-14}$	14	$1 \times 10^0$	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หลักการวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH - Measurements)

### 2.2.1 การวัดความเป็นกรด - ด่าง ด้วยกระดาษลิตมัส [16]

ในของเหลวหรือสารละลายส่วนใหญ่จะมีสภาพเป็นกรด - ด่างแตกต่างกันไป โดยส่วนมากแล้วเป็นสารที่อันตรายซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อน สิ่งเหล่านี้ไม่สามารถจำแนกออกได้ด้วยตาเปล่าและด้วยการชิม กระดาษลิตมัสเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตรวจสอบสภาพความเป็นกรด - ด่าง ของสารละลายได้และมีความรวดเร็วในการทดสอบ โดยกระดาษลิตมัสจะมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 2 สี ได้แก่สีฟ้ากับสีแดงและสีที่ได้จะได้อาจมาจากการย้อมอินทรีย์ ซึ่งในการทดสอบหากจะทดสอบความเป็นกรดนั้นจะถูกกำหนดให้ใช้กระดาษสีฟ้าหากกระดาษเปลี่ยนจะสีฟ้าเป็นสีแดงก็สามารถบ่งบอกได้ว่าสารละลายนั้นเป็นสภาพเป็นกรดและการทดสอบความเป็นด่างก็จะถูกกำหนดให้ใช้กระดาษสีแดงถ้าหากกระดาษเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีฟ้าก็แสดงว่าสารละลายนั้นมีสภาพเป็นด่าง และเมื่อสารละลายมีสภาพเป็นกลางเมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีแดงและสีฟ้าสารละลายจะไม่ทำปฏิกิริยากับกระดาษทำให้กระดาษไม่เปลี่ยนสีนั่นเอง ในใช้กระดาษลิตมัสในการทดสอบความเป็นกรด - ด่างของสารละลายจะทำให้สามารถจำแนกได้เพียง 3 ประเภท ได้แก่

1. สารละลายที่มีสภาพเป็นกรด คือ กระดาษเปลี่ยนจากสีฟ้าจะเปลี่ยนเป็นสีแดง
2. สารละลายที่มีสภาพเป็นด่าง คือ กระดาษเปลี่ยนจากสีแดงจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้า
3. สารละลายที่มีสภาพเป็นกลาง คือ สีกระดาษทั้งสีฟ้าและแดงจะไม่เปลี่ยนสี



รูปที่ 2.1 การวัดความเป็นกรด - ด่าง ด้วยกระดาษลิตมัส

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง ด้วยการตรวจวัดด้วยกระดาษลิตมัสจะบ่งบอกได้เพียงว่าสารละลายมีสภาพเป็นกรด ด่าง หรือมีสภาพเป็นกลางเท่านั้นจะไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าสารละลายชนิดใดที่มีสภาพความเป็นกรด - ด่าง มากหรือน้อยกว่ากัน ดังนั้นจะมีเครื่องมืออีกชนิดที่สามารถบ่งบอกได้นั้นก็คือกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ โดยจะอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง ด้วยกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ [16]

ในการวัดค่าความเป็นกรด - ด่างด้วยกระดาษลิตมัสที่มีข้อจำกัดคือสามารถบ่งบอกได้เพียงแค่ว่าสารละลายดังกล่าวมีสภาพเป็นกรด ด่าง หรือเป็นกลาง เท่านั้นไม่สามารถบ่งบอกปริมาณความเป็นกรดหรือด่างได้ ดังนั้นแล้วหากต้องการทราบปริมาณความเป็นกรด - ด่าง จึงจำเป็นที่จะต้องใช้การวัดด้วยกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator) โดยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์จะอยู่ในรูปของกระดาษเช่นเดียวกับลิตมัสต่างกันที่กระดาษที่ใช้ตรวจสอบของยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์จะเป็นสีเหลือง และการใช้งานก็จะคล้ายๆกับการวัดด้วยกระดาษลิตมัสโดยนำกระดาษไปแตะกับสารละลายที่ต้องการตรวจสอบจากนั้นอินดิเคเตอร์ก็จะมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและนำไปเทียบกับวงล้อสีก็จะสามารถบ่งบอกได้แล้วว่าสารละลายที่เราทำการตรวจสอบนั้นมีค่าความเป็นกรด - ด่าง เท่าไหร่ ข้อจำกัดของอินดิเคเตอร์ชนิดนี้คือค่าความเป็นกรด - ด่าง ที่วัดได้นั้นเป็นเพียงค่าอย่างคร่าวๆ เท่านั้นและความผิดพลาดจากการเทียบสีหรือเกิดสีที่ผิดเพี้ยนก็ยังคงเป็นข้อจำกัดของอินดิเคเตอร์ชนิดนี้เช่นกัน หากต้องการการวัดที่มีความละเอียดและแม่นยำแล้วจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่ชื่อว่าพีเอชมิเตอร์

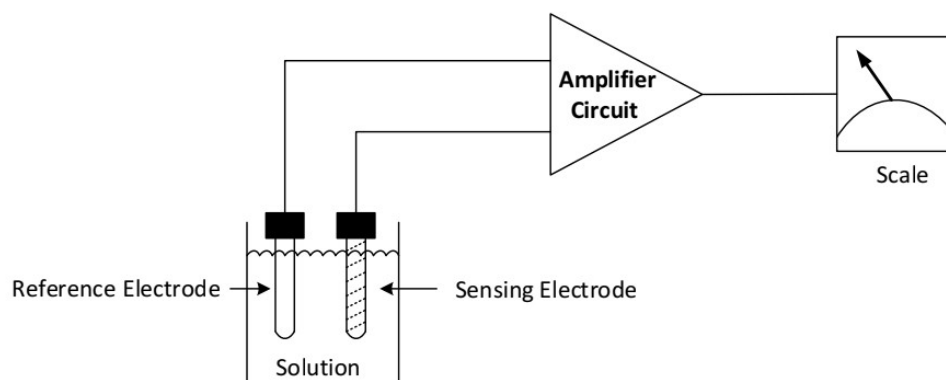


รูปที่ 2.2 การวัดค่าความเป็นกรด - ด่างด้วยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์

## 2.2.3 การวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง ด้วยเครื่องวัดพีเอชมิเตอร์ [17-18]

ในส่วนของหลักการวัดค่าพีเอชหรือค่าความเป็นกรด - ด่าง จะอาศัยหลักการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrical Potential) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดวัด (Sensing Electrode) และอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) ที่จุ่มอยู่ในสารละลายซึ่งความต่างศักย์ที่ได้นั้นจะเกิดขึ้นจากปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้นๆ โดยที่ความปริมาณความเข้มข้นของไอออนจะถูกเปลี่ยนให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วทำการขยายแรงดันให้มีค่าสูงขึ้นด้วยวงจรขยายแรงดันโดยเครื่องวัดพีเอชแล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าที่วัดได้ดังกล่าวไปแสดงผลเป็นค่าพีเอช และองค์ประกอบโดยรวมของเครื่องวัดพีเอชจะแสดงดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบโดยรวมของเครื่องวัดพีเอช

จากรูปที่ 2.3 จากเห็นได้ว่ามีส่วนที่สำคัญที่ทำให้วงจรนี้ครบวงจรและสามารถทำงานได้ก็คือส่วนของอิเล็กโทรดและส่วนของตัวเครื่องวัด โดยจะสามารถอธิบายแยกส่วนได้ดังนี้

1. อิเล็กโทรด ทำหน้าที่ในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย และที่สารละลายมีสภาพเป็นกลางหรือสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 จะส่งผลให้ที่อิเล็กโทรดวัดและอิเล็กโทรดอ้างอิงมีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ และเมื่อมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นหรือลดน้อยลงก็จะทำให้ความต่างศักย์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแปรผันไปตามปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน

2. ตัวเครื่องหรือ Potentiometer ในส่วนนี้จะทำหน้าที่หลักก็คือแปลงสัญญาณจากค่าความต่างศักย์ของไอออนเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าและทำหน้าที่ขยายสัญญาณความต่างศักย์ที่วัดได้ให้สูงขึ้นเพื่อนำไปแสดงผลที่มัลติเตอร์

การคำนวณหาค่าของพีเอชจะถูกดัดแปลงมาจากสมการของเนิร์นส์ (Nernst's Equation) ดังสมการที่ (2.3) ซึ่งเป็นการคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าโดยกำหนดให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 0 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยวัดเทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรด (Hydrogen Electrode) ซึ่งในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ไฮโดรเจนอิเล็กโทรดเพราะว่ามีขนาดใหญ่ ดังนั้น Nation Bureau Standard (NBS) จึงได้กำหนดค่าพีเอชบัฟเฟอร์มาตรฐานขึ้นมาใช้ โดยทำการวัดค่าพีเอชมาตรฐานด้วยขั้วแบบซิลเวอร์ – ซิลเวอร์คลอไรด์ Ag/AgCl เปรียบเทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรด

$$\Delta E = E_0 - \frac{2.3RT}{nF} \log a_i$$

(2.3)

โดยที่	$\Delta E$	คือ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้
	$E_0$	คือ ค่า Electrode potential มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Joules/mol-Kelvin)
T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
n	คือ จำนวนประจุของอิเล็กตรอน
F	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Coulombs/mol)
$a_i$	คือ อิออนที่วัดได้

## 2.3 ทรานซิสเตอร์แบบมอส (MOSFET)

มอสทรานซิสเตอร์หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ามอสเฟต (Metal Oxide Semiconductors Field Effect Transistor : MOSFET) [19-20] ถูกสร้างขึ้นมาในช่วงปี ค.ศ. 1970 เป็นทรานซิสเตอร์ยุคที่สองหลังจากสร้างทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor : BJT) มาก่อนหน้านี้แล้วซึ่งเป็นมอสทรานซิสเตอร์จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเนื่องจากสร้างง่ายและมีขนาดเล็กกว่าทรานซิสเตอร์แบบบีเจที (BJT) ด้วยเหตุนี้มอสเฟตจึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำที่ปฏิวัติวงการอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมากจนนำไปสู่การสร้างวงจรรวมขนาดใหญ่ (Very Large Scale Integration : VLSI) ซึ่งเป็นหัวใจของหน่วยประมวลผลและหน่วยความจำ มอสเฟตสามารถทำงานได้เพียงแค่ออสแรงดันไฟฟ้าซึ่งแตกต่างจากทรานซิสเตอร์แบบ BJT ที่จะต้องใช้กระแสในการไบอัสให้ทำงาน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การออกแบบวงจรโดยใช้ออสเฟตนั้นมีขนาดวงจรที่เล็กกว่าเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานช่วยในการไบอัส โดยในการทำงานของมอสเฟตนั้นกระแสที่ไหลจะถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำทั้งสองด้านซึ่งจะเป็นการป้อนสนามไฟฟ้าให้มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวหรือเรียกว่า Field Effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้ควบคุมกระแสในสารกึ่งตัวนำ และผลของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนลจึงทำให้พาหะเคลื่อนที่ได้ภายใต้แชนแนลจึงส่งผลให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานได้ ดังนั้นแล้วทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า “ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า” หรือ Field Effect Transistor และที่นิยมเรียกกันโดยทั่วไปว่า FET หรือเรียกชื่ออุปกรณ์นี้เต็มๆว่า มอสเฟต (MOSFET) เพื่อให้รู้ว่าส่วนของเกตนันมีโครงสร้างแบบมอสและในส่วนของชั้นออกไซด์นั้นก็มีคุณสมบัติเป็นฉนวน

### 2.3.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต [21]

ในส่วนของมอสเฟตเราจะเราสามารถแบ่งชนิดได้อยู่ 2 ชนิดด้วยกัน เมื่อพิจารณาจากลักษณะและโหมดการทำงาน

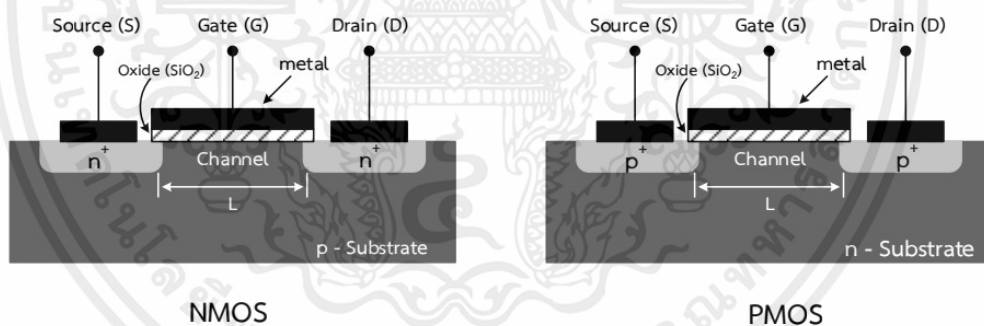
1. มอสเฟตชนิดเอ็นแฮนซ์เมนต์ (Enhancement MOSFET) หรือที่เรียกกันว่ามอสเฟตชนิดแชนแนลที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Channel MOSFET) นั่นก็คือมอสทรานซิสเตอร์ที่ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

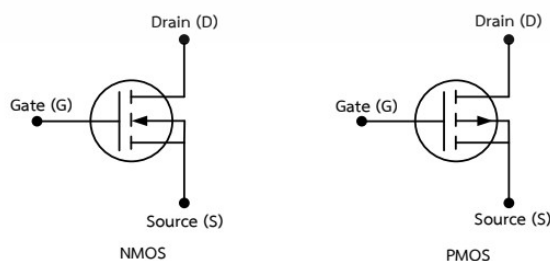
แรงดันศูนย์โวลท์ที่เกิดจะทำให้ไม่มีแขนแนลเกิดขึ้นจึงทำให้ไม่เกิดการไหลของกระแสตรง ดังนั้นจึงทำให้มอสทรานซิสเตอร์ดังกล่าวนั้นอยู่ในสถานะ OFF แต่เมื่อแรงดันที่เกิดนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจนแรงดันที่ผิวสัมผัส (Surface Potential) มีค่ามากพอทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดเหนี่ยวนำให้เกิดแขนแนลขึ้นที่ผิวของชั้นสารกึ่งตัวนำและส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสตรง

2. มอสเฟตชนิดดีพลีชัน (Depletion MOSFET) หรือมอสเฟตชนิดแขนแนลเกิดจากการแพร่สารเจือหรือ Diffusion Channel MOSFET หมายถึงมอสทรานซิสเตอร์ที่ซึ่งมีการเกิดแขนแนลขึ้นได้ถึงแม้ว่าแรงดันที่เกิดจะเป็นศูนย์ก็ตาม ซึ่งเป็นผลมาจากมีการแพร่ของอะตอมสารเจือเพื่อให้ออสเฟตนั้นเกิดเป็นแขนแนลนำกระแส ดังนั้นกระแสนก็จะไหลได้ถึงแม้แรงดันจะเป็นศูนย์

เมื่อพิจารณาจากชนิดของพาหะที่นำกระแสในมอสทรานซิสเตอร์แล้วนั้น พบว่าเรายังสามารถแบ่งมอสเฟตออกได้อีกเป็นสองชนิด ได้แก่ มอสเฟตชนิดเอ็นแขนแนล (n – Channel MOSFET) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเอ็นมอส (NMOS) และอีกชนิดคือมอสเฟตชนิดพีแขนแนล (p – Channel MOSFET) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าพีมอส (PMOS) โดยที่ทั้งเอ็นมอสและพีมอสมีกลไกในการนำกระแสที่แตกต่างกันนั่นคือเอ็นมอสนั้นกระแสจะเกิดจากการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในแขนแนลชนิดเอ็นและพีมอสก็จะเกิดการนำไฟฟ้าของโฮลในแขนแนลชนิดพี ลักษณะโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟตทั้งเอ็นและพีแขนแนลจะแสดงดังรูปที่ 2.4 และสัญลักษณ์จะแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของมอสเฟตชนิดเอ็นแขนแนลและชนิดพีแขนแนล



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอสเฟตชนิดเอ็นแขนแนลและชนิดพีแขนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 และ 2.5 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟตจะประกอบไปด้วย ฐานรอง (Substrate) ขั้วซอส (Source : S) และส่วนเดรน (Drain : D) ซึ่งระยะห่างระหว่างซอสกับเดรนถูกพิจารณาว่าเป็นความยาวของแชนแนล (L) โดยที่ขั้วซอสและเดรนจะถูกเจืออะตอมชนิดเอ็นอย่างเข้มข้น ( $n^+$ ) เข้าไปในฐานรองชนิดพี (กรณีที่เป็นพีมอสจะเจืออะตอม  $p^+$  ลงในฐานรองชนิดเอ็น) และจากนั้นสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสามคือ ซอส เกต และเดรน ตามลำดับ [22]

### 2.3.2 คุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรต - ต่างแบบโครงสร้างอีจีเพตนั้นโดยพื้นฐานของตัวอุปกรณ์แล้วมีคุณลักษณะเหมือนกันกับมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแชนแนล ซึ่งดังนั้นแล้วจะอธิบายรายละเอียดไว้เพียงแค่มอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลเท่านั้น

เมื่อพิจารณาในกรณีที่ไม่มีสถานะผิว (Surface State) ใดๆปรากฏขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างซิลิคอนที่เป็นฐานรองและซิลิคอนไดออกไซด์ที่เป็นชั้นฉนวน ( $Si - SiO_2$ ) ดังนั้นแล้วแรงดันที่เกตจึงมีค่าเป็นศูนย์ ( $V_{GS} = 0$ ) กล่าวได้ว่าไม่มีแชนแนลเกิดขึ้นถึงแม้ว่าแรงดันที่เดรนจะมีค่ามากกว่าศูนย์ก็ตาม ( $V_{DS} > 0$ ) และกระแสเดรนก็จะมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน ( $I_{DS} = 0$ ) ดังนั้นถือว่าทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสภาวะ OFF แต่เมื่อโหนดที่แรงดันเกตมีค่าเป็นบวก ( $V_{GS} > 0$ ) และมีค่ามากพอที่สนามไฟฟ้าที่ชั้นออกไซด์มีความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนลขึ้นได้ ( $V_{GS} > V_T$ ) จะทำให้แชนแนลที่เกิดขึ้นนั้นเชื่อมต่อระหว่างช่องทางเดินกระแสระหว่างเดรนและซอสได้ โดยกระแสเดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรกและเมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้นในที่สุดก็จะถึงค่าแรงดันพินชออฟ (Pinch off Voltage :  $V_P$ ) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าแรงดันอิ่มตัว (Saturation Drain Voltage :  $V_{DS(sat)}$ ) และเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.4) [22]

$$(V_{GS} - V_{DS(sat)}) = V_T \quad (2.4)$$

หรือ

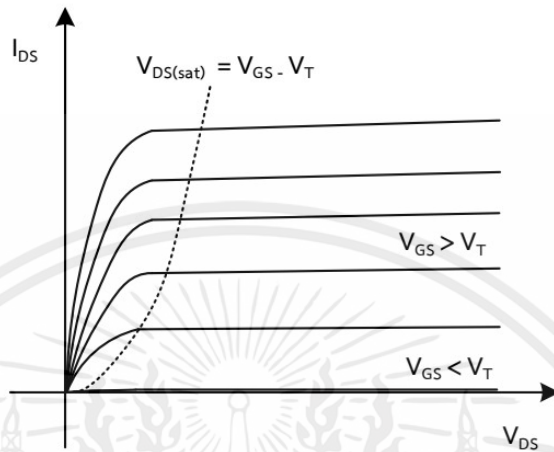
$$V_P = V_{DS(sat)} = (V_{GS} - V_T) \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.4) แรงดันอิ่มตัว  $V_{DS(sat)}$  จะแปรผันตามค่าของแรงดันเกต  $V_{GS}$  และเมื่อแรงดันเกตมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสเดรนอิ่มตัวก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังสมการที่ (2.6)

$$I_{DS(sat)} = \frac{V_{DS(sat)}}{R_{eff(n-ch)}} = \frac{V_{GS} - V_T}{R_{eff(n-ch)}} \quad (2.6)$$

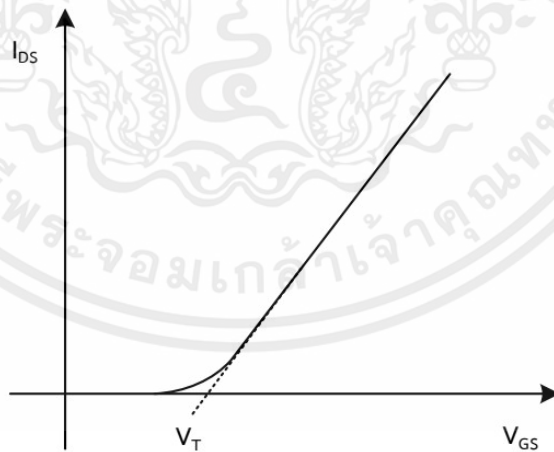
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นคุณสมบัติกระแสแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของมอสเฟตชนิดเอ็นเอานซ์เมนท์ชนิดเอ็นแซนแนลที่แรงดันเกตที่ค่าต่างๆ จึงจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของมอสเฟตชนิดเอ็นเอานซ์เมนท์ชนิดเอ็นแซนแนลในย่านไม่อิ่มตัวก็จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 กราฟลักษณะกระแสแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของมอสเฟตชนิดเอ็นแซนแนล ที่  $V_{GS}$  คงที่

จากกราฟในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนอิมิตัวนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันเดรน กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าแรงดันเดรนที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นก็จะส่งผลต่อค่ากระแสเดรนอิมิตัวให้มีค่าสูงขึ้นไปด้วย ในกรณีที่แรงดันเกตมีค่าคงที่



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์  $I_{DS} - V_{GS}$  ของมอสเฟตชนิดเอ็นแซนแนล ที่  $V_{DS}$  คงที่

ในกราฟที่ 2.7 นั้นสามารถแสดงค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) ของมอสเฟตได้ เนื่องจากแรงดันเกตที่ค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} < V_T$ ) กระแสเดรนจะมีค่าเป็นศูนย์ ( $I_{DS} \approx 0$ ) และในกรณีที่แรงดันเกตมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่าของแรงดันขีดเริ่มทำให้มีกระแสเดรนอิมิตัว ( $I_{DS(sat)}$ ) ค่าต่างๆ ดังนั้นแล้วแรงดันเกตที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่างๆ ที่ทำให้กระแสเดรนเริ่มไหลได้จึงถูกพิจารณาให้แรงดันดังกล่าวเป็นแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ (Threshold Voltage :  $V_T$ ) และนอกเหนือจากนี้กราฟลักษณะกระแสแรงดัน ( $I_{DS} - V_{GS}$ ) ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนซึ่งเป็นกระแสเอาท์พุทในวงจร และแรงดันเกตซึ่งเป็นแรงดันอินพุทโดยที่แรงดันเกตนั้นจะเป็นตัวควบคุมการไหลและปริมาณกระแสเดรนให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั่นเอง

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) แรงดันเดรน ( $V_{DS}$ ) แรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) และค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) สามารถอธิบายได้ด้วยการทำงานของมอสเฟตซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 ย่านการทำงานด้วยกัน ได้แก่ ย่านไม่อิ่มตัว (Non – Saturation Region) นั่นก็คือเมื่อ  $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$  และอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.7) และย่านอิ่มตัว (Saturation Region) เมื่อ  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$  อธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.8) [23]

$$I_{DS} = \beta \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (2.7)$$

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ พารามิเตอร์ของมอสเฟตและมีค่าดังสมการที่ (2.9)

$$\beta = C_i \cdot \mu_n \cdot \frac{W}{L} \quad (2.9)$$

โดยที่	$\mu_n$	คือ สภาพคล่องของประจุพาหะ
	$C_i$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อพื้นที่
	$W$	คือ ความกว้างของเกต
	$L$	คือ ความยาวของเกต
	$V_T$	คือ แรงดันขีดเริ่ม

โดยค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอีกค่าหนึ่งของอุปกรณ์มอสเฟตคือค่าแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งนั่นก็หมายถึงค่าของแรงดันไบอัสที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดสถานะ “สตริงอินเวอร์ชัน” กล่าวคือเป็นค่าแรงดันที่ทำให้มอสเฟตนั้นเริ่มทำงานได้ โดยแสดงดังสมการที่ (2.10)

$$V_T = V_{FB} - \frac{Q_{dm}}{C_i} + 2\psi_F \quad (2.10)$$

โดยที่	$\psi_F$	คือ ศักย์เฟอร์มิ
	$Q_{dm}$	คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณพลาสมาของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูงสุด
	$C_i$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อพื้นที่
	$V_{FB}$	คือ ค่าคงที่แรงดันแถบเรียบของมอสเฟต (Flat Band Voltage) จะมีค่าดังสมการที่ (2.11)

$$V_{FB(MOSFET)} = \phi_m - \phi_s \quad (2.11)$$

โดยที่	$\phi_m$	คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ
	$\phi_s$	คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

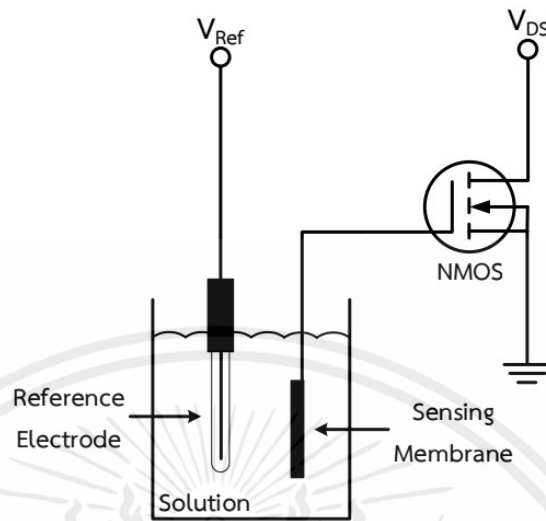
## 2.4 อุปกรณ์อีจีเฟต (EGFET)

### 2.4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของอุปกรณ์อีจีเฟต

อุปกรณ์กรตรวจวัดความเป็นกรด – ต่างแบบโครงสร้างอีจีเฟต (Extended-gate Field Effect Transistor : EGFET) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ถูกพัฒนามาจากพื้นฐานของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล (n – Channel MOSFET) หรือมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแชนแนล ถูกค้นพบโดย Van Der Spiegel โดยพัฒนาให้อุปกรณ์มอสเฟตนั้นสามารถตอบสนองต่อความเป็นกรด – ต่างได้โดยทำการเชื่อมต่อส่วนที่เรียกว่าเมมเบรนในการตรวจวัด (Sensing Membrane) เข้ากับขาเกตของมอสเฟต (Extended-Gate) โดยที่เมมเบรนจะทำหน้าที่ในการตรวจจับไฮโดรเจนไอออน ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนจะเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ถึงปริมาณความเป็นกรด – ต่างในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl Reference Electrode) จ่ายแรงดันที่คงที่ให้กับขาเกต ซึ่งทั้งเมมเบรนในการตรวจวัดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนั้นจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายที่ต้องการวัด ในส่วนของวัสดุที่ถูกนำมาเป็นเมมเบรนในการตรวจวัดนั้นก็จะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes), ทินออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>), พาลาเดียมออกไซด์ (PdO), รูทีเนียมไดออกไซด์ (RuO<sub>2</sub>) เป็นต้น และโครงสร้างแบบอีจีเฟตยังมีข้อดีในการผลิตและการทำงาน เช่น มีต้นทุนที่ต่ำใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิต, ง่ายต่อการผลิตและบรรจุภัณฑ์, โมสเฟตที่นำมาต่อใช้งานจะไม่ถูกสัมผัสกับสารเคมีจึงทำให้ใช้งานได้ยาวนาน, ไม่มีผลกระทบจากอิทธิพลของแสง [24-25] เป็นต้น



รูปที่ 2.8 โครงสร้างและการต่อใช้งานอุปกรณ์จีโอเฟต

#### 2.4.2 ลักษณะสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์จีโอเฟต

หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบโครงสร้างจีโอเฟตนั้นมี ส่วนประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักก็คือโมสเฟตแบบแอนฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแชนแนล โดยที่ โครงสร้างแบบจีโอเฟตนั้นเกิดจากการนำส่วนที่เรียกว่าเมมเบรนไปต่อเชื่อมเข้ากับขาคเกตของมอส (Extended-Gate) ซึ่งส่วนของเมมเบรนก็จะถูกจุ่มลงไปในการละลายพร้อมกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ และจะถูกทำให้ครบวงจรด้วยสารละลายที่ต้องการวัด

ในการทำงานในสภาพจะไม่อิ่มตัวของอุปกรณ์ (non – saturation region) ค่าของกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) จะขึ้นอยู่กับค่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชัน (Inversion Layer :  $\mu_n$ ) ค่าความจุ ไฟฟ้าของขนวนและค่าอัตราความกว้างต่อความยาวของช่องทางเดินกระแส (W/L Ratio) และ นอกเหนือจากนี้ยังขึ้นกับค่าของแรงดันขีดเริ่มโดยที่แรงดันขีดเริ่มเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับค่าฟังก์ชันงาน ของวัสดุ ( $\phi$ ) และในส่วนของคุณค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์มอสเฟตนั้นจะมีค่าที่คงที่จึงส่งผลให้กระแส เดรนขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกต ( $V_{GS}$ ) เพียงอย่างเดียวในสถานะที่แรงดันที่เดรนซอส ( $V_{DS}$ ) มี ค่าคงที่ แต่สำหรับในส่วนของอุปกรณ์จีโอเฟตแล้วค่าของแรงดันขีดเริ่มจะไม่ได้เป็นตัวแปรที่คงที่ โดยจะ สามารถเปรียบเทียบได้จากศักย์ที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายกับเมมเบรน โดยที่ศักย์ไฟฟ้าบริเวณ รอยต่อระหว่างเมมเบรนกับสารละลายจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อเมมเบรนนั้นสัมผัสกับสารละลายที่ สภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถหาค่าของการตอบสนองต่อสภาพความเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรต - ต่างของอุปกรณ์ได้โดยพิจารณาจากค่าแรงดันขีดเริ่ม และค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟต สามารถหาได้จากสมการที่ (2.12)

$$V_{T(EGFET)} = V_{T(MOSFET)} - \frac{\Phi_M}{q} + E_{REF} + \chi^{Sol} - \phi \quad (2.12)$$

โดยที่	$V_{T(EGFET)}$	คือ แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ EGFET
	$V_{T(MOSFET)}$	คือ แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์มอสเฟต
	$\frac{\Phi_M}{q}$	คือ ฟังก์ชันงานของเกตโลหะ
	$E_{REF}$	คือ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
	$\chi^{Sol}$	คือ Surface Dipole ของสารละลาย
	$\phi$	คือ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างสารละลายและเมมเบรน

และค่าของกระแสตรงต่อแรงดันที่เกตหรือแรงดันที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ( $V_{REF}$ ) นั้น ( $I_{DS} - V_{GS}$  or  $V_{REF}$ ) จะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.13)

$$I_{DS} = K_n [2(V_{REF} - V_{T(EGFET)})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (2.13)$$

โดยที่	$I_{DS}$	คือ กระแสตรง
	$K_n$	คือ ค่า Conduction Parameter มีค่าดังสมการที่ (2.14)
	$V_{REF}$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
	$V_{T(EGFET)}$	คือ แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟต
	$V_{DS}$	คือ แรงดันที่ขาเดรนขอส

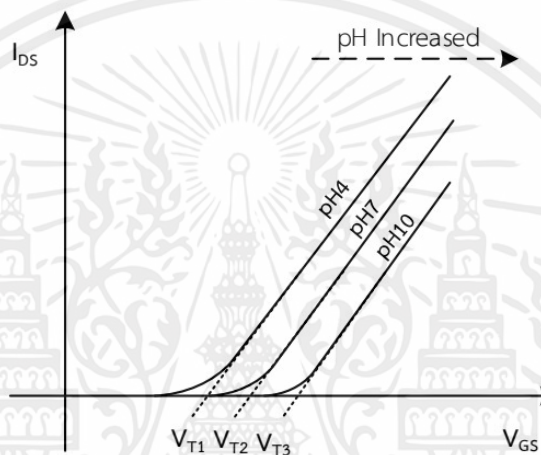
ค่าของ Conduction Parameter ( $K_n$ ) นั้นจะหาได้ดังสมการที่ (2.14)

$$K_n = \frac{W\mu_n C_{OX}}{2L} \quad (2.14)$$

โดยที่	$W/L$	คือ อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแซนแนล
	$\mu_n$	คือ ค่าความคล่องของอิเล็กตรอน
	$C_{OX}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์

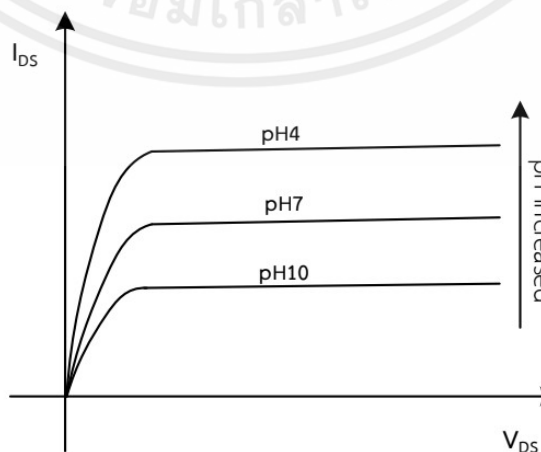
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกเหนือจากนี้แล้วความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จะไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมสารละลาย แต่จะขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นสารละลายกับเมมเบรน เมื่อผิวหน้าเมมเบรนสัมผัสกับไฮโดรเจนไอออนในสารละลายก็จะส่งผลให้กระแสตรงของอุปกรณ์อิจิเพตนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงและส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อิจิเพตนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตรงและแรงดันที่เกต ( $I_{DS} - V_{GS}$ ) เมื่อแรงดันเกตหรือแรงดันที่ทำการป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ค่าต่างๆจะแสดงดังในรูปที่ 2.9 และกราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอุปกรณ์อิจิเพตที่สารละลายมีสภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกันนั้นก็จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่สารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกัน ที่  $V_{DS}$  มีค่าคงที่

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าค่าของแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อิจิเพตนั้นมีค่าที่แปรผันไปตามค่าของสภาพความเป็นกรด - ด่างของสารละลายทำให้สามารถพิจารณาการตอบสนองของอุปกรณ์ต่อความเป็นกรด - ด่างได้



รูปที่ 2.10 คุณลักษณะกระแสและแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ที่แรงดัน  $V_{GS}$  คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

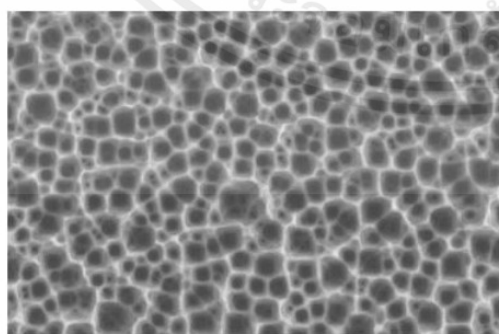
จากรูปที่ 2.10 ค่าของกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) ที่ค่าแรงดันเกตมีค่าคงที่นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับสภาพความเป็นกรดมากขึ้น เนื่องจากมีประจุบวกจากไฮโดรเจนอออน ( $H^+$ ) ที่มากขึ้นจึงทำให้เหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้มากขึ้นและส่งผลให้กระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเป็นกรด – ด่างของอุปกรณ์ได้ด้วยเช่นกัน

## 2.5 ทฤษฎีพอร์ซิลิคอน (Porous silicon)

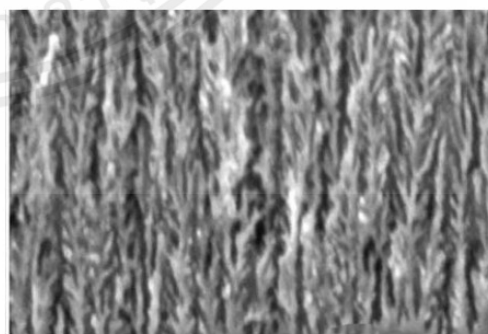
พอร์ซิลิคอนคือวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมากอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีโครงสร้างไม่มีระเบียบบนผลึกซิลิคอนซึ่งเกิดจากกระบวนการกัดผลึกซิลิคอน (Silicon Etching) ซึ่งโดยทั่วไปวิธีการกัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน (Anodization) โดยรูปร่างของพอร์ซิลิคอนจะมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะโดยจะได้อธิบายรายละเอียดดังกล่าวในส่วนต่อไป ซึ่งพอร์ซิลิคอนเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น อิเล็กทรอนิกส์ทางด้านแสง อิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์ อุปกรณ์ตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ ตลอดจนใช้เป็นเมมเบรน เป็นต้น

### 2.5.1 โครงสร้างพอร์ซิลิคอน

พอร์ซิลิคอนคือผลึกซิลิคอนที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากมายบนผลึกซิลิคอนซึ่งจะมีความแข็งแรงและเปราะ โดยขนาดของรูพรุนเหล่านี้จะมีขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตรและมีขนาดใหญ่สุดถึงระดับไมโครเมตร โดยภายในโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนนั้นก็จะมีขนาดของโครงสร้างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป โดยในรูปที่ 2.11 นั้นจะแสดงภาพตัวอย่างผิวหน้าและภาพถ่ายด้านข้าง [26-28] ของพอร์ซิลิคอนซึ่งในภาพที่แสดงจะเป็นการสร้างพอร์ซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดด้วยไฟฟ้าเคมีหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ากระบวนการแอโนไดซ์เซชัน (Anodization)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างชั้นพอร์ซิลิคอนจากการถ่าย SEM

(ก) ผิวหน้าของพอร์ซิลิคอน (ข) ภาพตัดขวางพอร์ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 การจำแนกประเภทของพอร์ซิลิคอน

พอร์ซิลิคอนเป็นผลึกซิลิคอนที่มีรูพรุนมากมายมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรไปจนถึงไมโครเมตรที่แทรกอยู่ตามผลึกซิลิคอน ซึ่งในการแบ่งประเภทของพอร์ซิลิคอนนั้นก็จะสามารถจำแนกออกได้ 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ จำแนกตามประเภทของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (Pore size), จำแนกตามลักษณะของรูพรุน (Pore type) และจำแนกตามรูปร่างของรูพรุน (Pore shape) โดยจะได้อธิบายรายละเอียดของการจำแนกแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้ [29]

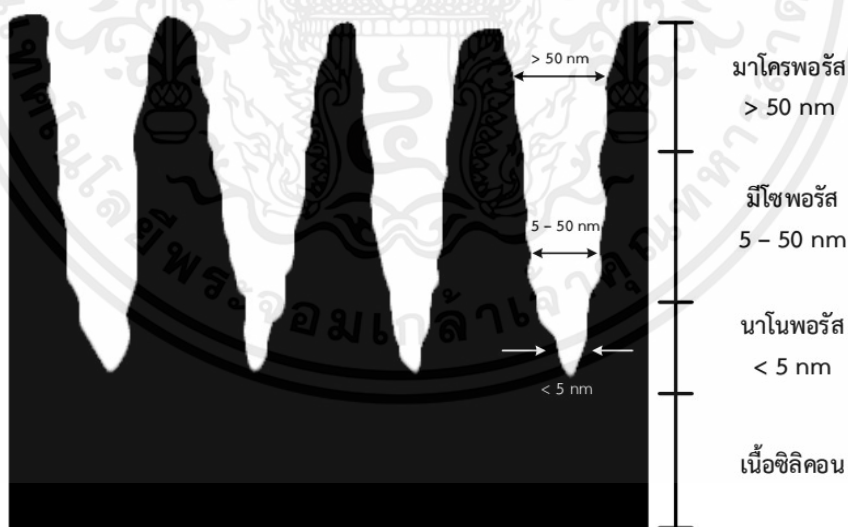
### 1. การจำแนกประเภทของพอร์ซิลิคอนตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Pore size)

ในการจำแนกประเภทพอร์ซิลิคอนในลักษณะนี้สามารถจำแนกย่อยได้เป็นอีก 3 ลักษณะดังนี้

1.1 ไมโครพอร์ซิลิคอน (microporous silicon) คือชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยรวมใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตรขึ้นไป

1.2 มีโซพอร์ซิลิคอน (mesoporous silicon) คือชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยรวมอยู่ในช่วง 5 นาโนเมตรถึง 50 นาโนเมตร

1.3 นาโนพอร์ซิลิคอน (nanoporous silicon) คือชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยรวมน้อยกว่า 5 นาโนเมตรลงไป



รูปที่ 2.12 ภาพตัวอย่างโครงสร้างพอร์ซิลิคอนที่จำแนกตามประเภทของรูพรุน

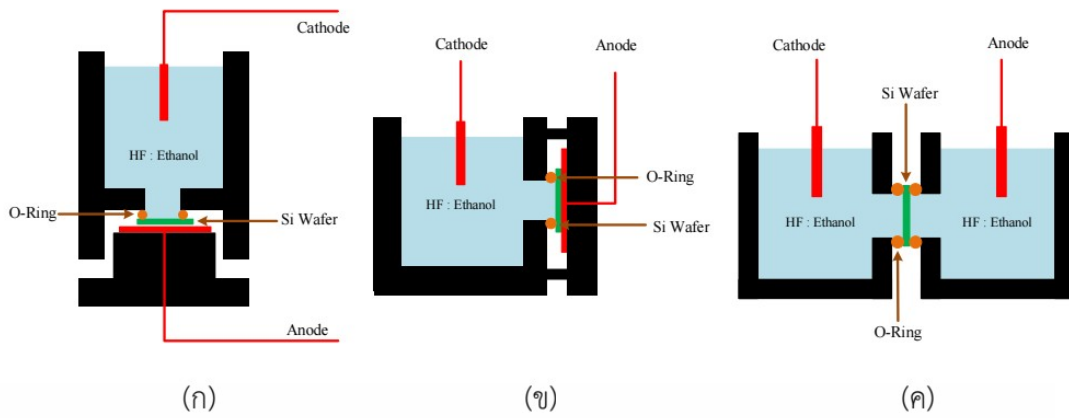
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เทคนิคการสร้างพอร์สซิลิคอน (Formation Technique)

ในการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นโดยทั่วไปแล้วจะมีวิธีการสร้างหลายวิธีการสร้างด้วยกัน [30-34] เช่นการสร้างด้วยการสร้างด้วยการสลายตัวของก๊าซไฮโดรเจนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave plasma decomposition  $\text{SiH}_4$ ), การสร้างด้วยการสลายตัวของก๊าซไฮโดรเจนด้วยเลเซอร์ (Laser Breakdown  $\text{SiH}_4$ ), การสร้างด้วยคลื่นความถี่สูง (Frequency Spark), การสร้างด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching หรือ Anodization) และการสร้างด้วยการกัดด้วยกรด (Stain Etching) ซึ่งในบรรดาวิธีการสร้างที่ได้ยกตัวอย่างมานั้นวิธีการที่นิยมใช้การมากที่สุดได้แก่วิธีการสร้างด้วยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งกระบวนการนี้เป็นวิธีที่สร้างได้ง่ายและสามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่ายและสามารถเตรียมได้ง่ายในห้องแล็บอีกทั้งยังไม่ต้องพึ่งพาเครื่องมือที่มีราคาสูง

### 2.6.1 วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching , Anodization)

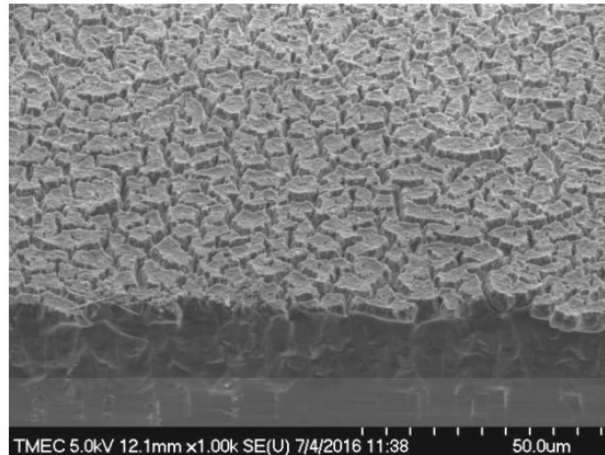
กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี [35-36] หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ากระบวนการแอโนไดซ์เซชัน (Anodization) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีข้อดีคือสามารถควบคุมปฏิกิริยาในกระบวนการกัดได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการนี้มีความสม่ำเสมอ (Uniform) ทั่วทั้งแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เนื่องจากทำการควบคุมด้วยสนามไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถเตรียมได้ง่ายในห้องแล็บและมีต้นทุนในการสร้างที่ต่ำ โดยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะประกอบไปด้วยแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) จุ่มอยู่ในสารละลายแล้วทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่คงที่ให้กับเซลล์ไฟฟ้าเคมีดังกล่าว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีก็จะเงื่อนไขต่างๆ ในการสร้าง ยกตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF), ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, เวลาในการกัด ตลอดจนผสมเอทานอลกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเพื่อทำหน้าที่ช่วยในการลดแรงตึงผิวและทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสัมผัสกับซิลิคอนได้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้วซิลิคอนเวเฟอร์ที่ผ่านการสร้างด้วยกระบวนการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นจะเกิดเป็นรูพรุนมากมายบนผิวหน้าของซิลิคอนและมีความสม่ำเสมอ อีกทั้งยังสามารถควบคุมความพรุนและความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการสร้างแบบการกัดด้วยกรด ซึ่งตัวอย่างภาพตัดขวางของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ภาพตัดขวางตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สร้างพอร์ซิลิคอน

- (ก) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์เดี่ยวแนวตั้ง  
 (ข) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์เดี่ยวแนวนอน  
 (ค) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์คู่แนวนอน

จากรูปที่ 2.13 จะแสดงเซลล์ไฟฟ้าเคมี 3 รูปแบบ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายจะเห็นว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้ง 3 รูปแบบนั้นมีรูปลักษณะที่ต่างกันออกไปซึ่งแต่ละรูปแบบก็จะมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบที่ต่างกัน จาตรูปที่ 2.13 (ก) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์เดี่ยวแนวตั้ง (Single tank vertical cell) จะมีจุดเด่นคือเซลล์ไฟฟ้าเคมีลักษณะนี้ง่ายต่อการฉายแสงช่วยกระตุ้นการเกิดโฮลในกระบวนการกัดได้ (ในกรณีที่ต้องการใช้แสงช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการกัด) ซึ่งเมื่อเทียบกับเซลล์ไฟฟ้าเคมีในรูปที่ 2.13 (ข) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์เดี่ยวแนวนอน (Single tank horizontal cell) เห็นว่าในกรณีที่ต้องการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดก็จากสามารถทำได้ยากกว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์เดี่ยวแนวตั้งซึ่งตั้งนั้นแล้วโดยทั่วไปจะนิยมใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์เดี่ยวแนวตั้งมากกว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์เดี่ยวแนวนอน ในส่วนของรูปที่ 2.13 (ค) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์คู่แนวนอน (Double tank cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ได้ทำการพัฒนามาจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทงค์เดี่ยวแนวนอนซึ่งข้อได้เปรียบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้นั้นจากรูปจะเห็นได้ว่าการเติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงไปสองด้านทั้งด้านหน้าแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์และด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์อีกทั้งยังไม่มี การขัดขั้วไฟฟ้าเข้าไปที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอนทำให้เซลล์ชนิดนี้มีความเครียดของวัสดุที่บริเวณ O-ring จึงทำให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้มีการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดอื่นที่ได้กล่าวมา ซึ่งชั้นพอร์ซิลิคอนที่ได้จากการสร้างด้วยกระบวนการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะแสดงดังรูปที่ 2.9

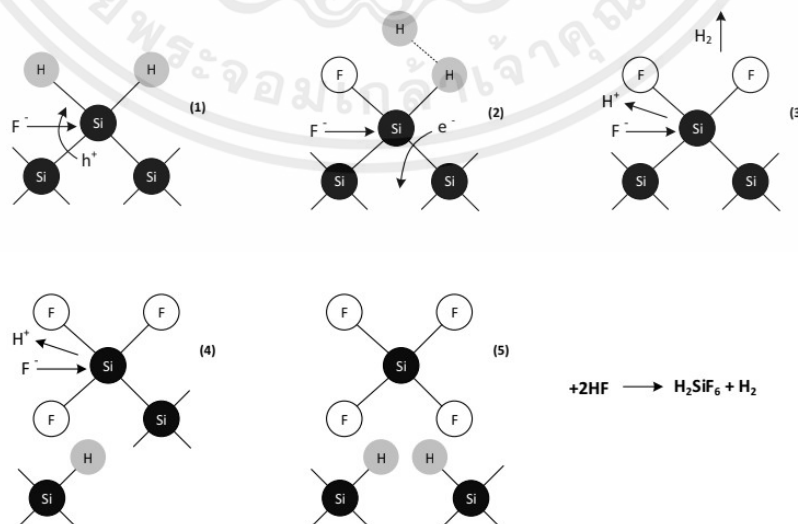


รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างด้วยกระบวนการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี

## 2.7 กลไกในการเกิดพอร์ซิลิคอน (Porous Silicon Mechanisms) [37]

### 2.7.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน

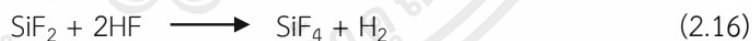
เมื่อจุ่มผลึกซิลิคอนลงไปนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในสภาวะปกติในส่วนของผิวหน้าของผลึกซิลิคอนนั้นจะยังไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัดผิวหน้าหรือเข้าทำปฏิกิริยาต่อผลึกซิลิคอน แต่เมื่อนำผลึกซิลิคอนมาบรรจุอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีลักษณะการไบอัสแบบแอโนดิก ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั้นจะถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเข้าทำปฏิกิริยากัดกร่อนจนบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ มากมายบนผิวหน้าของผลึกซิลิคอนซึ่งรูพรุนเหล่านี้เราจะเรียกว่า ชั้นพอร์ซิลิคอน โดยที่ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวจะอธิบายได้ดังรูปที่ 2.15



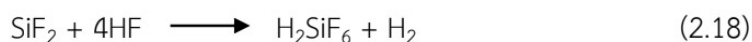
รูปที่ 2.15 ปฏิริยาทางเคมีและกลการกัดผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.15 ในช่วงเริ่มต้นเมื่อยังไม่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ละลายในน้ำของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์นั้นจะถูกปกคลุมไปด้วยพันธะของไฮโดรเจน ซึ่งจะมีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนนั้นไม่สามารถเข้าไปทำลายพันธะระหว่างซิลิคอนและอะตอมไฮโดรเจนได้ (Si - H) เมื่อทำการโอบัสให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีมีลักษณะการโอบัสเป็นแบบแอโนดิกนั้น กล่าวคือมีการป้อนศักย์บวกให้กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์จนทำให้พาหะโฮลเคลื่อนที่มายังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ในขณะนั้นสัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกอยู่นั้นส่งผลให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนถูกทำลาย และอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในขณะนั้นเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนจนเกิดเป็นพันธะระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน (Si - F) ดังขั้นตอนในลำดับที่ 1 และจากอิทธิพลการโพลาริซ (Polarizing) ของฟลูออรีนที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลให้ฟลูออรีนอีกตัว (F<sup>-</sup>) ที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเข้าทำลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนที่ยังเหลืออยู่ในแขนอีกข้างเช่นกันและมีการเกิดขึ้นของโมเลกุลไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีการปล่อยอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังแอโนด ซึ่งแสดงไว้ในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 และส่งผลให้ หลังจากนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอนของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F Group) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 ส่งผลให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนที่ผิวกับซิลิคอนตัวถัดมานั้นมีความแข็งแรงลดลง ซึ่งดังนั้นแล้วพันธะเคมีดังกล่าวนั้นก็就会被ทำลายลงได้โดยอิออนของฟลูออรีนและเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาใหม่ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ ขั้นตอนที่ 4 หลังจากที่ผ่านมาขั้นตอนนี้ไปแล้วอะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์พร้อมๆกับการเกิดขึ้นเป็นพันธะเคมีใหม่ระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนที่อยู่เป็นลำดับถัดมาต่อไป ดังแสดงในขั้นตอนที่ 5 ในส่วนของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเขียนได้ดังต่อไปนี้



จากสมการข้างต้นสามารถเขียนรวมได้เป็น



จากสมการเคมีที่ได้กล่าวมาเมื่อข้างต้นแล้วนั้น จะเริ่มต้นจากปฏิกิริยาที่ 2.15 ที่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Si) เป็นสารตั้งต้นอยู่ในสารละลายไฮโดรฟลูออริก ซึ่งในปฏิกิริยาเคมีในการกัดนี้จะอาศัยพาหะโฮล (h<sup>+</sup>) เป็นหลักในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้เกิด SiF<sub>2</sub> บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{SiF}_2$  ขึ้นกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ 2.16 และได้ผลออกมาเป็น  $\text{SiF}_4$  หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์และในระหว่างกระบวนการกัดที่เกิดขึ้นจะสังเกตเห็นได้ว่าการเกิดขึ้นของก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ระหว่างการกัดเกิดขึ้น สุดท้ายจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{SiF}_4$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็น  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  ที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังสมการที่ 2.17 และสามารถเขียนรวมได้ใหม่ดังสมการที่ 2.18

## 2.8 ความพรุนของพอร์ซิลิคอน (Porosity of Porous silicon)

วัสดุโดยทั่วไปที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดต่างๆ มากมายกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุเอง ดังนั้นแล้วก็จะถือได้ว่าวัสดุดังกล่าวนี้เป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าของความพรุนที่ว่ามันสามารถแบ่งได้ถึงลักษณะและขนาดของโครงสร้างวัสดุต่างๆคร่าวๆได้ โดยสามารถหาจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของวัสดุต่อช่องว่างภายในโครงสร้างของวัสดุ

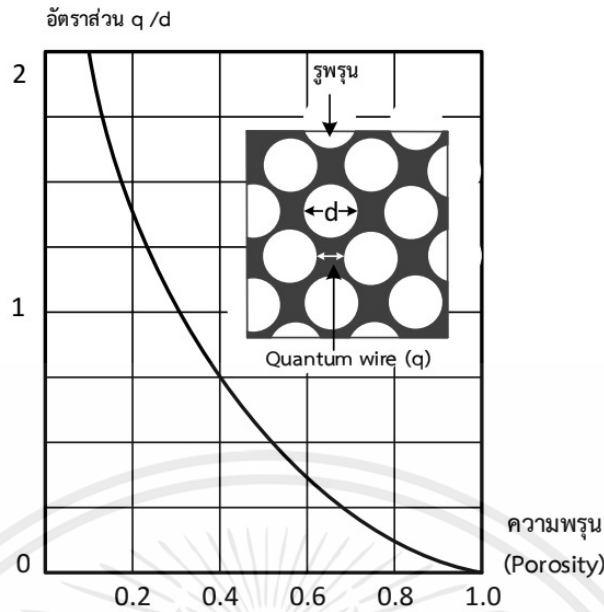
พอร์ซิลิคอนก็คือผลึกซิลิคอนที่มีรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมากมายบนเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งขนาดของรูพรุนนั้นจะอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยเนื้อของผลึกซิลิคอนที่อยู่ในระดับนาโนเมตรนี้แสดงคุณสมบัติทางผลของขนาดควอนตัม (Quantum size effect) ในเชิง 1 มิติ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างผลึกซิลิคอนกับขนาดของรูพรุนก็จะมีผลต่อความพรุนและความหนาของชั้นพอร์ซิลิคอน [38] โดยความพรุนของพอร์ซิลิคอนจะจำลองได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพจำลองพอร์ซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน

จะเห็นว่าขนาดของเนื้อซิลิคอนและขนาดของรูพรุนนั้นจะส่งผลต่อค่าความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนด้วย กล่าวได้ว่าหากเนื้อซิลิคอนนั้นถูกกัดจนมีขนาดเล็กแล้ว ขนาดของรูพรุนก็จะมีขนาดที่เพิ่มขนาดและค่าของความพรุนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามกันไปด้วยโดยแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอนกับขนาดของรูพรุนที่มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน

## 2.9 การดักจับไฮโดรเจนไอออนของชั้นพอร์สซิลิคอน

อุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบโครงสร้างอีจีพีดีในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างแบบง่าย โดยมีส่วนประกอบหลักๆ อยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ

### 1. ส่วนเมมเบรนในการดักจับไฮโดรเจนไอออน

ในส่วนนี้พอร์สซิลิคอนจะถูกใช้เป็นการดักจับปริมาณไฮโดรเจนไอออนในสารละลายซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพความเป็นกรด - ด่าง ของสารละลาย ซึ่งพอร์สซิลิคอนนั้นโดยพื้นฐานแล้วจะเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุนเล็กๆ จำนวนมากบนผิวหน้าของผลึกซิลิคอน ทำให้สามารถดักจับเอาไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่ในสารละลายเข้ามาทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของพอร์สซิลิคอนได้ดีกว่าวัสดุที่มีพื้นผิวเรียบ

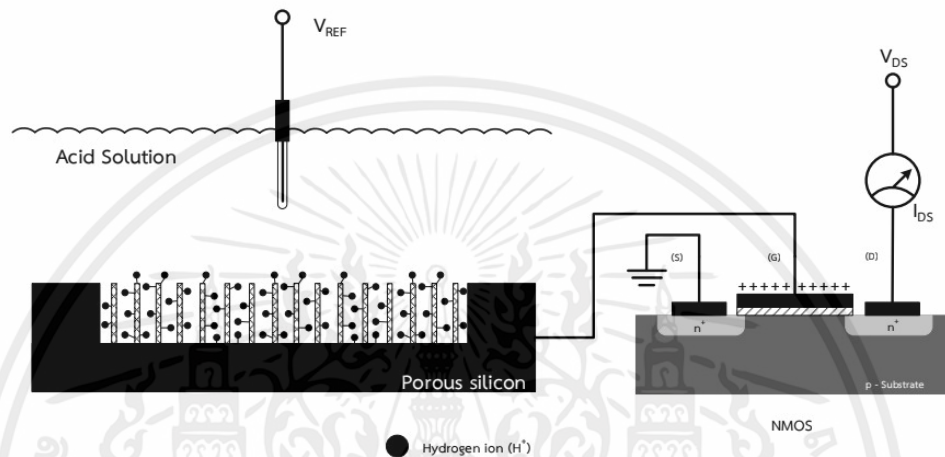
### 2. ส่วนของมอสเฟต

ในส่วนของมอสเฟตนี้จะถูกใช้เป็นส่วนขยายสัญญาณทางไฟฟ้าและแสดงลักษณะการเปลี่ยนเป็นทางไฟฟ้าเมื่อเมมเบรนที่ใช้ตรวจวัดนั้นอยู่ในสภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกันออกไป โดยขั้วเกตของมอสเฟตจะถูกเชื่อมต่อกับเมมเบรนที่ใช้ในการตรวจวัดไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย

โดยหลักการตรวจจับไฮโดรเจนไอออนของชั้นพอร์สนั้นจะสามารถอธิบายได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิคอนนั้นจะมีพันธะแขวนขาดอยู่บริเวณผิวซึ่งในลักษณะดังกล่าวนี้จะทำให้มีระดับพลังงานหนึ่งที่เรียกว่าสถานะผิว (Surface State) เกิดขึ้น เมื่อพอร์สซิลิคอนที่ทำหน้าที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

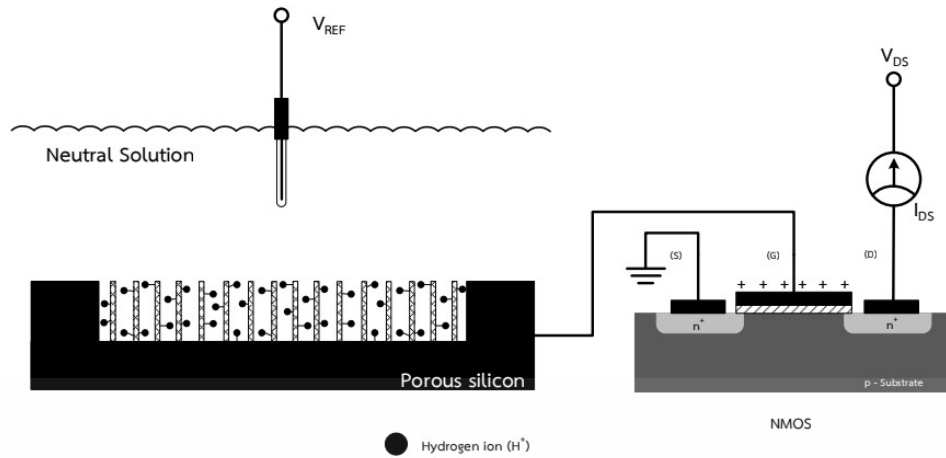
เป็นเมมเบรนที่ใช้ตรวจวัดถูกจุ่มลงไปในสารละลายที่มีไฮโดรเจนไอออนอยู่ก็จะทำให้ไฮโดรเจนไอออนเข้ามาจับตัวกับผนังที่เป็นรูพรุนซึ่งมีพันธะแชนขาดและทำให้เกิดการเหนี่ยวนำพาหะที่บริเวณผิวของพอร์ซิลิคอนมากขึ้น ทำให้เกิดสถานะผิวมากขึ้น จนทำให้ชั้นพอร์ซิลิคอนนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นและเมื่อพอร์ซิลิคอนที่ทำหน้าที่เป็นเมมเบรนถูกต่อเข้ากับขั้วเกตของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์ เมนท์ชนิดเอ็นแชนแนลก็จะทำให้มอสเฟตนั้นแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไปภายใต้สภาพความเป็นกรด – ต่างที่แตกต่างกันออกไป อธิบายได้ดังรูปที่ 2.18, 2.19 และ 2.20



รูปที่ 2.18 ลักษณะการตอบสนองของอีจีเฟตภายใต้สภาพความเป็นกรด

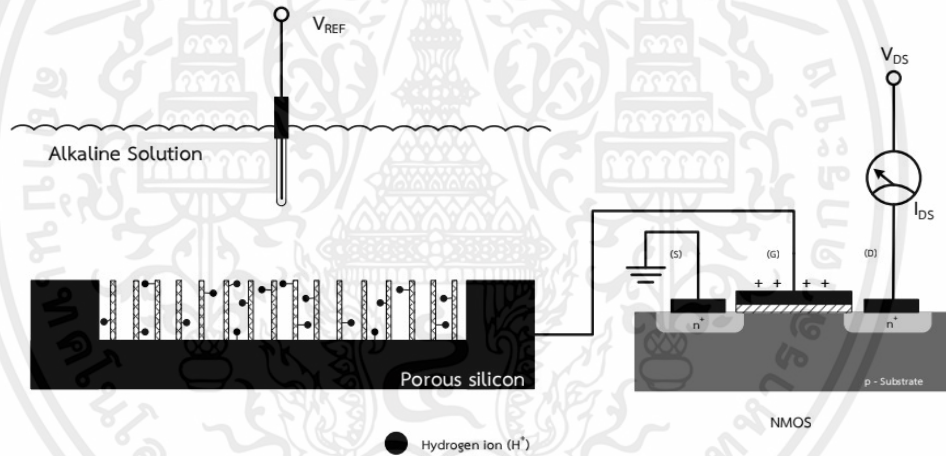
จากรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อพอร์ซิลิคอนอยู่ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดนั้นภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรดนี้ก็ประกอบไปด้วยไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จำนวนมากซึ่งไฮโดรเจนไอออนนั้นก็จะมีประจุเป็นบวกจึงทำให้พอร์ซิลิคอนมีศักย์บวกเพิ่มขึ้น ดังนั้นแล้วเมื่อพอร์ซิลิคอนที่ทำหน้าที่เป็นเมมเบรนถูกต่อเข้ากับขั้วเกตของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลแล้วนั้นจะส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้มากขึ้นและเมื่อวัดกระแสเดรนที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นไปด้วย

ในรูปที่ 2.19 เมื่อเมมเบรนของอีจีเฟตซึ่งในที่นี้คือพอร์ซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นกลางปริมาณของไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่างที่ทำการวัดจะมีปริมาณที่น้อยลงดังนั้นจึงส่งผลให้ผิวพอร์ซิลิคอนมีศักย์บวกน้อยลงและทำให้การเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้น้อยลงและกระแสเดรนที่ได้ก็จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการตรวจวัดภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรด



รูปที่ 2.19 ลักษณะการตอบสนองของอิจิเฟตภายใต้สภาพความเป็นกลาง

สุดท้ายเมื่ออยู่ภายใต้สภาพความเป็นด่างการตอบสนองของอุปกรณ์อิจิเฟตจะสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะการตอบสนองของอิจิเฟตภายใต้สภาพความเป็นด่าง

จากรูปที่ 2.20 เมื่อเมมเบรนของอิจิเฟตซึ่งในที่นี้คือพอร์สซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นด่างซึ่งมีปริมาณของไฮโดรเจนออกไซด์ในสารละลายตัวอย่างที่ทำการวัดจะมีปริมาณที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดและเป็นกลาง ดังนั้นก็จะส่งผลให้ผิวพอร์สซิลิคอนมีศักย์บวกน้อยลงไปอีกเมื่อเทียบกับสารละลายที่มีสภาพความเป็นกรดและเป็นกลาง ดังนั้นแล้วการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้ก็จะน้อยลงและส่งผลกระทบให้กระแสเดรนที่ได้ก็จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการตรวจวัดภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรดและเป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงกระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี และกระบวนการสร้างหัววัดความเป็นกรด – ด่าง โดยโครงสร้าง EGFET (extended gate field effect transistor) เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ รวมถึงหัวข้อการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากพอร์สซิลิคอนที่ค่าความพรุนต่างๆที่มีผลต่อกระแสและแรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟต

#### 3.1 กระบวนการสร้าง

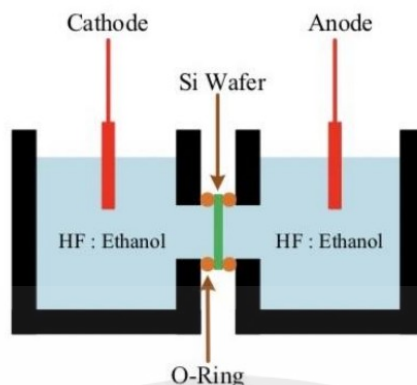
##### 3.1.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี (Anodization)

ในการสร้างพอร์สซิลิคอนโดยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมากเนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างที่ต่ำและหาวัสดุในการสร้างเซลล์ไฟฟ้าเคมีได้ง่ายซึ่งโดยทั่วไปแล้วเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นได้ทำมาจากเทฟลอน โดยกระบวนการดังกล่าวมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า กระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้สามารถควบคุมปฏิกิริยาในการกัดและตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการกัดได้ง่าย เช่น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการกัด เป็นต้น ซึ่งทำให้เราสามารถควบคุมความหนา และความลึกของชั้นพอร์สซิลิคอนได้ตามต้องการ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำชุดกัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แวนอนมาทำการสร้างพอร์สซิลิคอน



รูปที่ 3.1 ภาพตัวอย่างชุดกัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางของชุดกัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่ควานอน

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่จากภาพจะเห็นได้ว่าซิลิคอนเวเฟอร์จะมีสัมผัสกับสารละลายทั้งสองด้านและมีขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจุ่มลงไปในการละลายทั้งสองด้านโดยซิลิคอนเวเฟอร์จะอยู่ตรงกลางระหว่างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทั้งสองด้านและมีโอริงเป็นส่วนป้องกันการรั่วซึมของสารละลายเช่นกัน โดยซิลิคอนเวเฟอร์ทางด้านขั้วแคโทดจะถูกกัดจนเป็นรูพรุนจนเกิดเป็นพอร์ซิลิคอนเมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านตัวกลางสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

### 3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน

ในการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนเวเฟอร์ก่อนที่จะนำไปสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ชนิดพี ที่มีระนาบ (100) และมีสภาพความต้านทานไฟฟ้า 4 – 10 โอห์ม-เซนติเมตร ( $\Omega$ -cm) มาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยจำเป็นที่จะต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นอันดับแรกเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอยู่ก่อนจะนำเข้าสู่กระบวนการสร้างต่อไป โดยขั้นตอนการทำความสะอาดมีดังต่อไปนี้

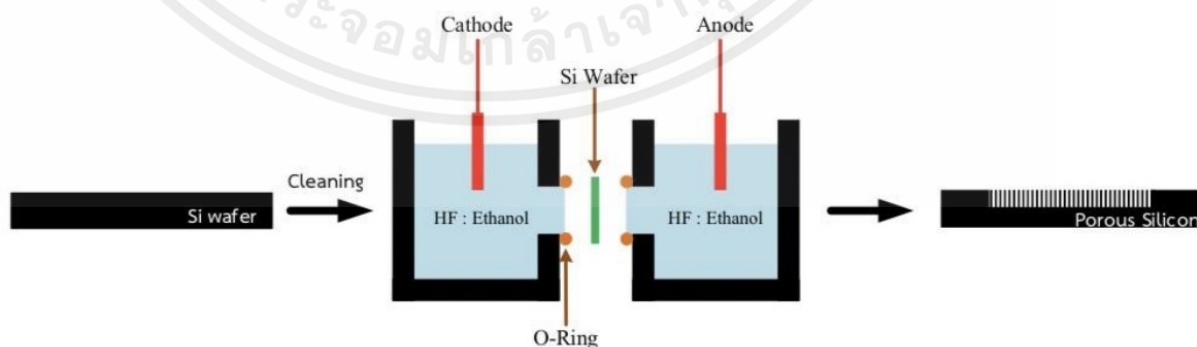
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water)
- ต้มในกรดไนตริก (nitric acid :  $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกเศษโลหะหนักที่ผิวหน้าของซิลิคอนเวเฟอร์
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน
- ล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 5% เป็นเวลา 20 วินาที เพื่อกำจัดชั้น Native Oxide
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 3.1.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนด้วยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ในกระบวนการนี้จะทำการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนโดยนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วมาใส่ในชุดกัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งคูแวนอนซึ่งซิลิคอนเวเฟอร์จะถูกประกบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองด้านโดยมีแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์อยู่ตรงกลาง จากนั้นทำการเติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงไปทั้งด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์ไฟฟ้าเคมี หลังจากนั้นจุ่มขั้วไฟฟ้าแอโนดลงไปที่ด้านหลังของเซลล์ไฟฟ้าเคมี และจุ่มขั้วไฟฟ้าแคโทดลงไปที่ด้านหน้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าและกำหนดเวลาในการแอโนไดซ์เซชันตามเงื่อนไขต่างๆที่ได้กำหนดไว้ โดยกระบวนการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนโดยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งคูแวนอนนี้จะแสดงดังรูปที่ 3.3



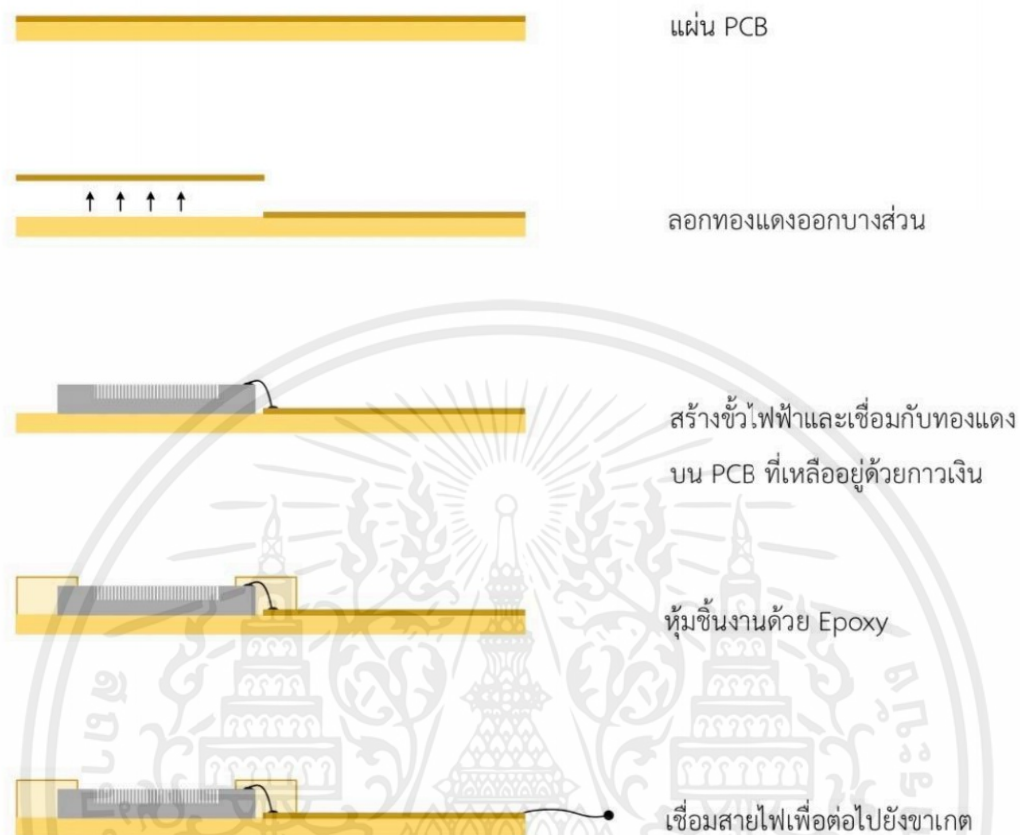
รูปที่ 3.3 การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งคูแวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

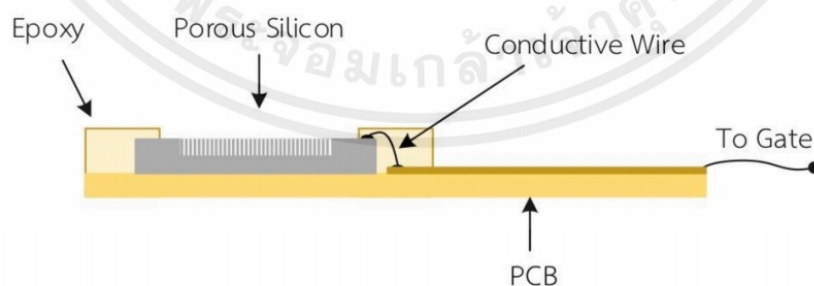
### 3.1.4 การศึกษาขั้นตอนการสร้างหัววัดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่าง โครงสร้าง EGFET โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างหัววัดความเป็นกรด – ด่าง สำหรับใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรดต่างแบบโครงสร้าง extended – gate filed effect transistor (EGFET) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้นำพอร์สซิลิคอนมาใช้เป็นหัววัดดังกล่าว ซึ่งพอร์สซิลิคอนที่จะได้ทำการสร้างและนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะมีข้อได้เปรียบคือมีขั้นตอนการสร้างที่ง่าย สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความพรุน ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้มาร์กหรือกระจกตอนแบบในการสร้างเนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการให้พอร์สซิลิคอนที่ได้นั้นเกิดขึ้นแบบสุ่มและเกิดขึ้นทั่วผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ และไม่ต้องพึ่งเครื่องมือราคาแพง อีกทั้งยังมีต้นทุนการสร้างที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการผลิตเมมเบรนแบบอื่นๆ โดยในขั้นตอนการสร้างหัววัดความเป็นกรด – ด่าง ของงานวิจัยนี้จะได้อธิบายได้ตามขั้นตอนดังที่จะได้อธิบายต่อไปนี้

- ก). นำพอร์สซิลิคอนที่ผ่านการสร้างด้วยกระบวนการแอโนไดซ์เซชันแล้วไปทำความสะอาดด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 5 นาที
- ข). นำพอร์สซิลิคอนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์แล้วไปเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- ค). นำแผ่นปริ้นทองแดง (PCB) มาทำการลอกชั้นทองแดงออกดังในรูปที่ 3.4
- ง). นำพอร์สซิลิคอนที่เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนแล้ววางบนแผ่น PCB ในส่วนที่ทำการลอกชั้นทองแดงออกแล้ว
- จ). ทำขั้วไฟฟ้าบนผิวหน้าซิลิคอนด้วยกาวเงิน (Silver Paste)
- ฉ). ทำการหุ้มชิ้นงานด้วยกาวอีพ็อกซีเพื่อกันน้ำโดยเหลือไว้เพียงส่วนของพอร์สซิลิคอนเพื่อใช้เป็นส่วนในการตรวจจับความเป็นกรด – ด่าง (Sensing Area)
- ช). เชื่อมสายไฟจากทองแดงเพื่อใช้สำหรับต่อใช้งานไปยังขาเกตของมอสเฟต

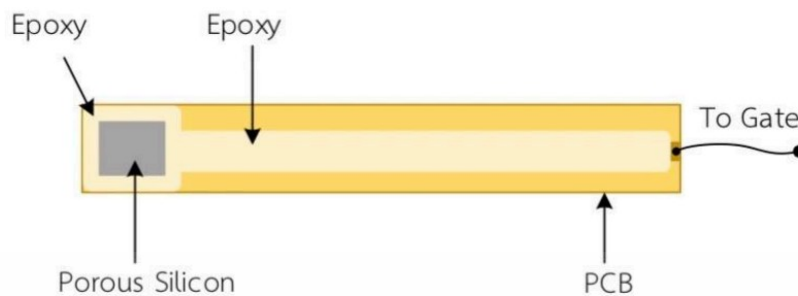


รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างหัววัดความเป็นกรด-ด่าง แบบโครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์ซซิลิคอน



รูปที่ 3.5 แสดงหัววัดความเป็นกรด-ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์ซซิลิคอน(มุมมองด้านข้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงหัววัดความเป็นกรด-ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์ซิลิคอน(มุมมองด้านบน)

จากรูปจะเห็นได้ว่าการสร้างหัววัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้าง EGFET ที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรนนั้นมีขั้นตอนการสร้างที่น้อยขั้นตอนและไม่ยุ่งยาก มีการแพ็คเกจที่ง่ายอีกด้วย



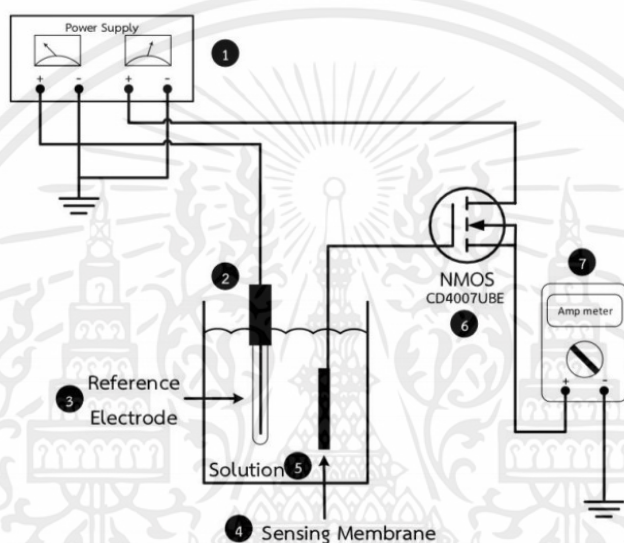
รูปที่ 3.7 แสดงหัววัดความเป็นกรด-ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์ซิลิคอน

## 3.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

### 3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด - ด่าง

#### โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอน

ในการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน เป็นเมมเบรนจะใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการศึกษาดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด-ด่าง โครงสร้าง EGFET

จากรูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้

1. Power Supply
2. บรีกเกอร์
3. ขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) จาก TMEC
4. หัววัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอน
5. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 4 , 7 , 10
6. NMOS เบอร์ CD4007UBE Texas Instrument
7. มัลติมิเตอร์

โดยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด – ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอนนี้จะทำการโดยเริ่มจากเสียบหัววัดที่ได้สร้างขึ้นเข้ากับขาเกตของมอสเฟตแล้วจุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่นำมาทดสอบ จากนั้นจุ่มขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงลงในสารละลายบัฟเฟอร์เช่นเดียวกันโดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงกับหัววัดให้มีค่าคงที่ จากนั้นทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง ( $V_{Ref}$ ,  $V_G$ ) และจ่ายแรงดันให้เข้ากับเดรน ( $V_{DS}$ ) และขาซอสต่อเข้ากับขั้วบวกของมัลติมิเตอร์ และขั้วลบของมัลติมิเตอร์ลงกราวด์แล้วทำการบันทึกค่าต่างๆที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายการเซตอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรดต่างๆ โครงสร้าง EGFET

## บทที่ 4

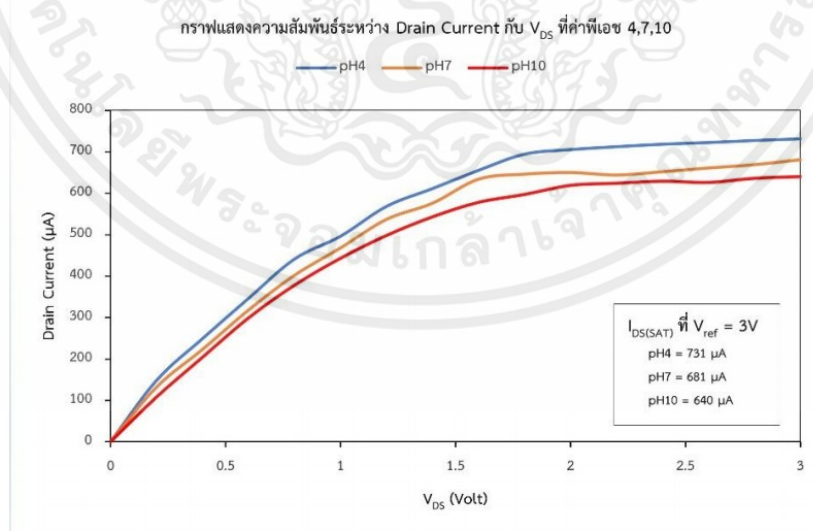
### ผลการทดลอง

#### ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มข้นแบบโครงสร้าง EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน

จากการทดลอง เราสามารถวัดหาความเข้มข้นแบบโครงสร้าง EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนได้ โดยใช้โหมดของความไวการตอบสนองต่อค่าพีเอช ในที่นี้ค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองมีค่า 4,7 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งโหมดของความไวการตอบสนองจากการทดลองสามารถสรุปได้เป็น 2 โหมด ได้แก่ โหมดกระแสและโหมดแรงดัน

#### 4.1 ความไวการตอบสนองของกระแสที่มีต่อค่าพีเอช (โหมดกระแส)

ในโหมดกระแสจะเป็นความสัมพันธ์กันระหว่างกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเดรน ( $V_{DS}$ ) ในค่าพีเอช 4,7 และ 10 ดังแสดงในรูป 4.1 โดยการทดสอบในสารละลายที่มีค่า pH4 กระแสเดรนอิ่มตัวเท่ากับ 731  $\mu\text{A}$  ที่สารละลาย pH7 กระแสเดรนอิ่มตัวเท่ากับ 681  $\mu\text{A}$  และที่สารละลาย pH10 ได้กระแสเดรนอิ่มตัวเท่ากับ 640  $\mu\text{A}$  เมื่อ  $V_{ref}$  มีค่าเท่ากับ 3 V

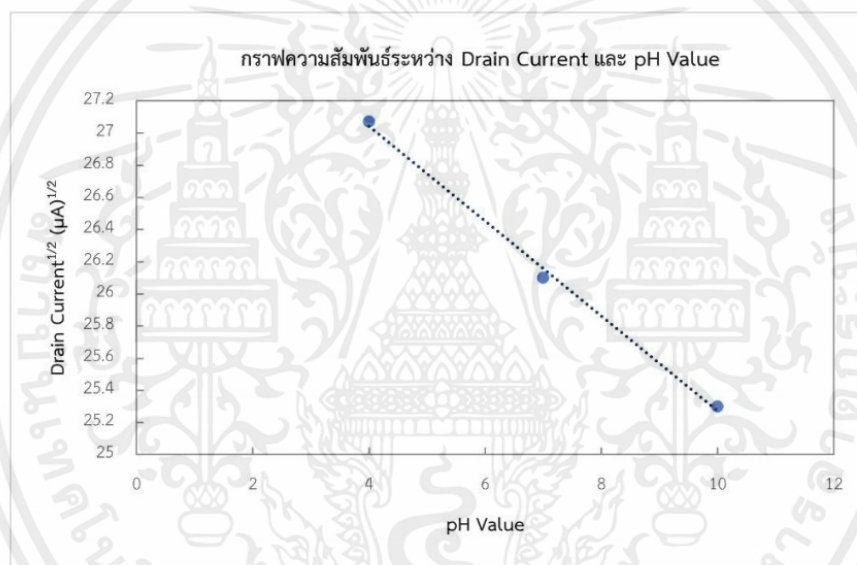


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรนที่ค่าพีเอช 4,7 และ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าพีเอชน้อย กระแสเดรนที่ได้ก็จะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับเมื่อค่าพีเอชมีค่ามาก เป็นผลมาจากการแตกตัวของสารละลายโดยในสารละลายที่มีค่าพีเอชน้อยสามารถแตกตัวให้  $H^+$  ที่เป็นประจุบวก ได้มากกว่าสารละลายที่มีค่าพีเอชมากซึ่งพอลิเมอร์สามารถตรวจจับและใช้เป็นการส่งประจุไปสู่ขาคัด ได้ ทำให้กระแสเดรนที่ได้มีค่ามากกว่า

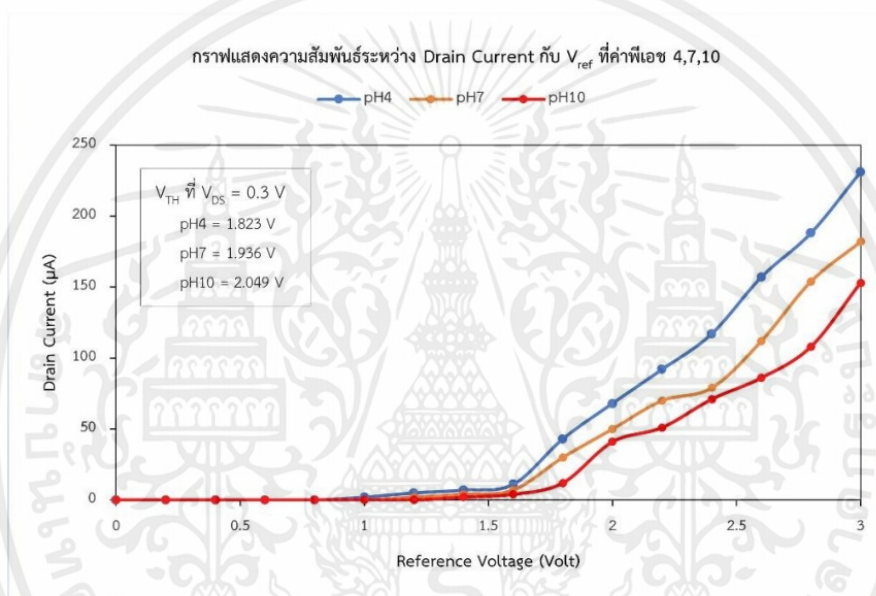
สำหรับค่าความไวต่อค่าพีเอชในโหมดกระแส สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนอิมิตัวและค่าของพีเอช ดังที่แสดงในรูป 4.2 จากสมการเส้นตรงได้ค่าความไวเท่ากับ  $0.293 \mu A^{1/2}/pH$  ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้น อยู่ที่ 99.72%



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและค่าพีเอช

## 4.2 ความไวการตอบสนองของแรงดันที่มีต่อค่าพีเอช (โหมตแรงดัน)

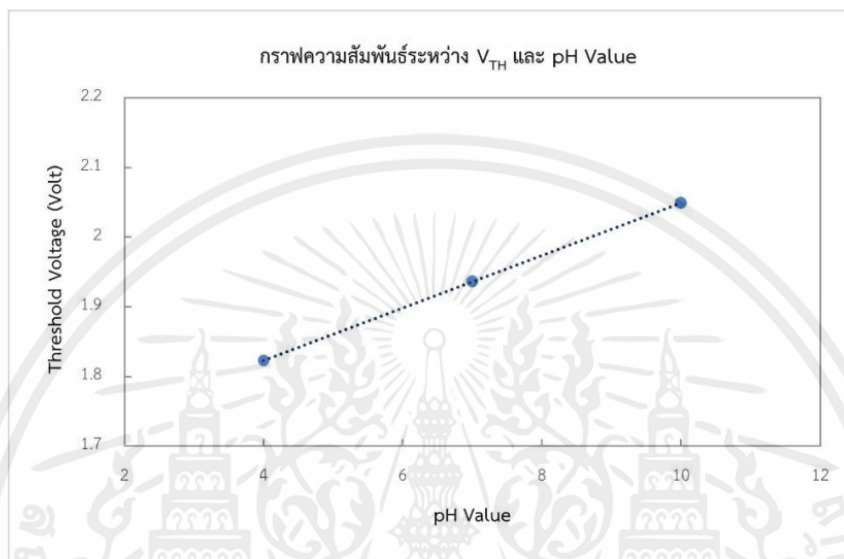
ในโหมตแรงดันไฟฟ้าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับค่าพีเอช โดยแสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันอ้างอิงดังแสดงในรูป 4.3 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันอ้างอิงที่ค่าพีเอช 4,7 และ 10 เมื่อแรงดันเดรน 0.3 V ทำให้ได้ค่าแรงดันขีดเริ่มที่สารละลายค่าพีเอชต่างๆ สารละลายที่มีค่า pH4 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ 1.823 V ที่สารละลาย pH7 มีแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ 1.936 V และที่สารละลาย pH10 มีแรงดันขีดเริ่ม 2.049 V



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับค่าแรงดันอ้างอิงที่ค่าพีเอช 4,7 และ 10

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าแรงดันขีดเริ่มที่ค่าพีเอช 4 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าพีเอช 7 และ 10 เป็นผลมาจากการแตกตัวของสารละลายที่ได้ประจุบวกมากกว่าทำให้พอร์สซิลิคอนเมมเบรนสามารถตรวจจับและส่งประจุไปยังขาเกตได้มากกว่าทำให้มีค่าแรงดันขีดเริ่มที่น้อยกว่า จากทฤษฎีหากนำไปวัดที่สารละลายค่าพีเอชน้อยลงไปอีกก็จะได้ค่าแรงดันขีดเริ่มที่น้อยลงด้วยเช่นกัน

สำหรับความไวการตอบสนองของแรงดันที่มีต่อค่าพีเอชสามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและค่าพีเอช ดังแสดงในรูป 4.4 จากสมการความไวของแรงดันต่อค่าพีเอช ( $\frac{\Delta V_{TH}}{\Delta pH}$ ) ได้ค่าความไวเท่ากับ 37.6 mV/pH และมีความเป็นเชิงเส้นอยู่ที่ 99.78 %



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนกับค่าพีเอช

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของการใช้พอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนของอุปกรณ์อีจีเฟตและผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อีจีเฟต พบว่าการนำชั้นพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้เป็นเมมเบรนของอุปกรณ์วัดความเป็นกรด - ด่างแบบอีจีเฟต ทำให้อุปกรณ์มีการตอบสนองต่อความเป็นกรดต่างได้ดีขึ้น เนื่องจากโครงสร้างพอร์สซิลิคอนมีลักษณะเป็นรูพรุนทำให้สามารถดูดซับเอาสารละลายเข้ามาทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นและด้วยโครงสร้างที่ผิวหน้ามีพันธะแขนขาที่มากจึงทำให้จับกับไฮโดรเจนไอออนในสารละลายได้มากขึ้น จึงทำให้อุปกรณ์ตอบสนองต่อความเป็นกรดต่างได้ดี และเมื่อใช้พอร์สซิลิคอนที่มีความพรุนสูงจะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มเพิ่มขึ้นแต่กระแสเดรนจะน้อยลงเนื่องจากพอร์สซิลิคอนเมื่อความพรุนสูงจะทำให้มีค่าความต้านทานสูงขึ้น กระแสจึงไหลผ่านได้น้อยลงและต้องใช้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้น

นอกจากนี้จากการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้สารละลายที่มีค่าพีเอช 4,7 และ 10 ตามลำดับ วัดความไวของการตอบสนองต่อค่าพีเอชโดยการเปลี่ยนแปลงของโหมดกระแสและแรงดัน จากค่าที่ได้ ความไวของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน( $I_{DS}$ ) และค่าพีเอชคือ  $0.293 \mu A^{1/2}/pH$  และมีความเป็นเชิงเส้นที่ 99.72 % ในโหมดแรงดัน ค่าความไวที่วัดได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม( $V_{TH}$ ) กับค่าพีเอชคือ  $37.6 mV/pH$  และมีความเป็นเชิงเส้นอยู่ที่ 99.78% แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนโครงสร้าง EGFET สามารถตอบสนองในค่าพีเอชที่แตกต่างกันได้

## บรรณานุกรม

- [1] A. Uhlir, Tech. J., vol. 35 1956, pp. 333-347, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2565.
- [2] L.T. Canham, Appl. Phys. Lett., vol. 57, 1990, pp. 1046-1048, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2565.
- [3] U. Gosele. and V. Lehmann, Material Chemistry and Physics, vol. 40,1995, pp. 253-259, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2565.
- [4] O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi, Surface Science Reports, vol. 38, 2000, pp.1-126, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2565.
- [5] . Herino, G. Bomchi, K. Barla and C. Bertrand, J. Electrochem. Soc. Solid State and Technology, vol. 14, 1987, pp. 1994, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2565.
- [6]H. Richter, Z.P. Wang and L. Ley, Solid State Commun., vol. 39, 1981, pp. 25-629, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2565.
- [7] I.H. Campbell and P.M. Fauchet, Solid State Commun., vol. 58, 1986, pp.739-741, สืบค้นเมื่อ 13 กันยายน 2565.
- [8] Y. Kanemitsu, H. Uto and Y. Masumoto, Phys. Rev. B., vol.48, 1994, pp.2827-2830, สืบค้นเมื่อ 13 กันยายน 2565.
- [9] [www.researchgate.net/publication/354086796\\_Fabrication\\_and\\_Characterization\\_of\\_In09Ga01O\\_EGFET\\_pH\\_Sensors/fulltext](http://www.researchgate.net/publication/354086796_Fabrication_and_Characterization_of_In09Ga01O_EGFET_pH_Sensors/fulltext), สืบค้นเมื่อ 22 กันยายน 2565.
- [10] Palit, S.; Singh, K.; Lou, B.S.; Her, J.L.; Pang, S.T.; Pan, T.M. Ultrasensitive dopamine detection of indium-zinc oxide on PET, สืบค้นเมื่อ 22 กันยายน 2565. flexible based extended-gate field-effect transistor. Sens. Actuators B 2020, 310, 127850. [CrossRef] , สืบค้นเมื่อ 25 กันยายน 2565.
- [11] Bergveld, P. Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements. IEEE. Trans. Biomed. Eng.1970, 17, 70–71. [CrossRef] , สืบค้นเมื่อ 25 กันยายน 2565.
- [12] Keeble, L.; Moser, N.; Manzano, J.R.; Georgiou, P. ISFET-based sensing and electric field actuation of DNA for on-chip detection:review. IEEE Sens. J. 2020, 20, 11044–11065. [CrossRef] , สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2565.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Cho, S.K.; Cho, W.J. Ultra-high sensitivity pH-sensors using silicon nanowire channel dual-gate field-effect transistors fabricated by electrospun polyvinylpyrrolidone nanofibers pattern template transfer. *Sens. Actuators B* 2021, 326, 128835. [CrossRef], สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2565.
- [14] van der Spiegel, J.; Lauks, I.; Chan, P.; Babic, D. The extended gate chemically sensitive field effect transistor as multi-species microprobe. *Sens. Actuators A* 1983, 4, 291–298. [CrossRef], สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2565. 22 กันยายน 2565.
- [15] Baldi, A.; Bratov, A.; Mas, R.; Dominguez, C. Electrostatic discharge sensitivity tests for ISFET sensors. *Sens. Actuators B* 2001, 80, 255–260. [CrossRef], 14 ตุลาคม 2565.
- [16] Young, S.J.; Lai, L.T.; Tang, W.L. Improving the performance of pH sensors with one-dimensional ZnO nanostructures. *IEEE Sens.* 2019, 19, 10972–10976. [CrossRef], สืบค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2565.
- [17] Batista, P.D.; Mulato, M. ZnO extended-gate field-effect transistors as pH sensors. *Appl. Phys. Lett.* 2005, 87, 143508. [CrossRef], สืบค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2565.
- [18] Yang, C.C.; Chen, K.Y.; Su, Y.K. TiO<sub>2</sub> nano flowers based EGFET sensor for pH sensing. *Coatings* 2019, 9, 251. [CrossRef], สืบค้นเมื่อ 21 ตุลาคม 2565.
- [19] Tanumihardja, E.; Olthuis, W.; Van den Berg, A. Ruthenium oxide nanorods as potentiometric pH sensor for organs-on-chip purposes. *Sensors* 2018, 18, 2901. [CrossRef], สืบค้นเมื่อ 21 ตุลาคม 2565.