บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน การสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันเพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี โดยมีโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีแบบประกอบด้วย ฐานรองซิลิคอนชนิดพีที่สร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนอยู่บนผิวหน้า และมีขั้วโลหะที่เป็นอลูมิเนียมอยู่บนชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่าย เหมาะที่จะนำไปใช้สร้างเป็นวงจรรวมต่อไปในอนาคต

ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 3 แบบ โดยส่วนแรก คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ผสมกับน้ำบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับเอทานอลที่อัตราส่วน 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตร ส่วนที่สอง คือ ระยะเวลาในการสร้าง 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ส่วนที่สาม คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2, 10 mA/cm^2, 15 mA/cm^2, 20 mA/cm^2, 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 จากนั้นนำชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่ได้มาทดสอบความสม่ำเสมอ หาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน และความลึกของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน

จากการทดสอบความสม่ำเสมอ พบว่าชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่สร้างจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับน้ำบริสุทธิ์มีความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับเอทานอล พบว่าชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากเอทานอลไปช่วยลดแรงตึงผิวของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำให้ลดจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถเข้าถึงผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนได้ดี จึงได้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ โดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลที่เหมาะสมเป็น 4:1 โดยปริมาตร ทำให้ได้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอและไม่เปราะบางแตกหักง่าย

เมื่อทำการทดลองถึงผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการแอโนไดซ์เซชันจะส่งผลทำให้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น และมีความลึกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น และทำการทดลองถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดเซชันจะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่ความลึกของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนยังคงมีค่า

ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันมากขึ้น ทำให้พาหะโฮลบริเวณผิวซิลิคอนขณะทำการกัดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการแอโนไดซ์เซชันนั้นใช้เวลาเท่าเดิม แต่จากการทดลองข้างต้นยังไม่สามารถสรุปได้ว่า เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนเท่าใด ถึงจะเหมาะสมที่จะนำมาตรวจจับไอระเหยของสารเคมี จึงได้ทำการทดลองหาค่าเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการตรวจจับไอแอลกอออล์

อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือ ระยะเวลาในการแอโนไดซ์เซชันเป็น 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ส่วนที่สอง คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันเป็น 5 mA/cm^2, 10 mA/cm^2, 15 mA/cm^2, 20 mA/cm^2, 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 จากนั้นนำอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีมาทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน

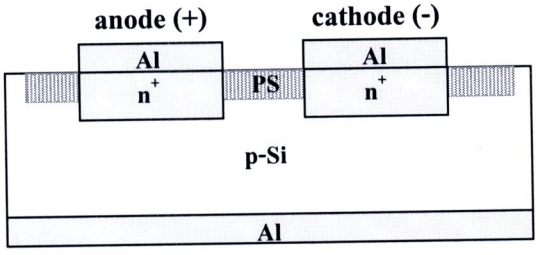
จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน พบว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนมีการตอบสนองต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แต่อุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนไม่มีการตอบสนองต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แล้วทำการทดลองถึงผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นประมาณ 3 μA ใช้เวลาในการอิ่มตัวในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการตกกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งเป็นเวลาในการแอโนไดซ์เซชันที่เหมาะสมที่สุด และทำการทดลองถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm^2 มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นประมาณ 3.1 μA ใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันที่เหมาะสมที่สุด

อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 69% ความลึกประมาณ 4.19 μm ทำการศึกษาถึงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีแบบต่อเนื่อง และทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm และ 1000 ppm ตามลำดับ พร้อมทั้งทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

ที่เปอร์เซ็นต์ระเหยของสารเคมีผสมกับน้ำเป็น 100%, 75%, 50%, 25% และน้ำ 100 % ตามลำดับ และทำการตรวจจับไอสารเคมีต่างชนิดกันโดยใช้ ไอน้ำ, ไอเอทานอล, ไอเมทานอล และ ไอไอโซโพรพิวระเหยของสารเคมี ในการทดสอบ

จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน พบว่าเมื่อทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีแบบต่อเนื่องปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงการตรวจจับจะมีค่าที่สอดคล้องกัน และอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนนี้ สามารถทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี และเปอร์เซ็นต์ระเหยของสารเคมีต่างๆ กันได้ รวมทั้งสามารถตรวจจับไอของสารเคมีต่างชนิดกันได้อีกด้วย

อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างแบบง่ายๆ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนเมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แต่อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนนี้มีข้อเสียอยู่ที่มีขั้วไฟฟ้าอยู่บนชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนส่งผลทำให้รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนมีค่าความต้านทานที่สูง ซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นอย่างมาก จึงควรสร้างให้ขั้วไฟฟ้าอยู่บนเนื้อซิลิคอนเพื่อช่วยลดค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสลง โดยใช้โครงสร้างที่มีชั้น n^+ เพิ่มเข้ามาจากโครงสร้างเดิม แสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่ปรับปรุงแล้ว

จากรูปที่ 6.1 เป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่ทำการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อลดค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสลง โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสระหว่าง n^+ กับชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน เมื่อชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจจับไอสารเคมีได้หลายชนิด และนำไปใช้ร่วมกับวงจรรวมต่างๆ ในการตรวจจับความชื้นได้อีกด้วย