

การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันบนพื้นฐานของไดอะแฟรมด้วย สารไวแสงชนิด SU-8

Development of A Gauge Pressure Sensors Based on SU-8 Photoresist Diaphragm

กมลรัตน์ บุญประคอง พิทยา ดิกล้ำ นิमित ชมนาวัง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจด้วยกระบวนการทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันบนพื้นฐานของไดอะแฟรมที่เป็นสารไวแสงชนิด SU-8 เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็น โพลิเมอร์ มีค่าขึงมอดูลัสต่ำกว่าและราคาถูกกว่าซิลิกอน เหมาะสำหรับใช้เป็นตัวรับปริมาณอินพุตของตัวตรวจรู้ความดัน โดยลักษณะของตัวตรวจรู้ความดันมีไดอะแฟรมเป็นแผ่นวงกลมมีขนาดรัศมี 500 μm และมีความหนา 38 μm ซึ่งมีตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรจเกจอยู่ด้านบนไดอะแฟรม ในส่วนของสเตรจเกจนั้น ทำจากโลหะนิโครม (นิกเกิลผสมโครเมียม) มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง สร้างด้วยกระบวนการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ ลิโธกราฟี และกระบวนการลิฟออฟ มีค่าความต้านทานไฟฟ้า 4.404 $\text{k}\Omega$ ตัวตรวจรู้ความดันนี้สามารถวัดความดันในช่วง 30-180 kPa ที่อุณหภูมิ 25-60°C มีความไว 26 mV/kPa ค่าความแม่นยำ $\pm 10\%$ และเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 2.3 วินาที

คำสำคัญ : ไดอะแฟรม ตัวตรวจรู้ความดัน ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค กระบวนการลิโธกราฟี

Abstract

This paper presents a design and fabrication of a gauge pressure sensor by using MEMS processes. The sensor was developed base on SU-8 photoresist diaphragm. Since SU-8 photoresist is polymer material which is lower Young's modulus and manufacturing cost of fabrication than silicon, it must to be used as a material for polymeric detecting diaphragm in this work. The diaphragm is a circular shape which is under a strain gauge resistor. The strain gauge resistor made from NiCr (nickel-chromium) thin film via thermal evaporation, UV lithography, and lift-off process is resistance of 4.404 $\text{k}\Omega$ on a SU-8 diaphragm which is with a radius of 500 μm and a thickness of 38 μm . This low cost sensor can measure gas pressure between 30-180 kPa at 25-60°C. Furthermore, this sensor has sensitivity of 26 mV/kPa , accuracy $\pm 10\%$, and rise time in 2.3 second.

Keywords : diaphragm, pressure sensor, photolithography, MEMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

โดยทั่วไปตัวตรวจรู้ความดันในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนิยมสร้างด้วยซิลิกอน [1] แต่ยังมีวัสดุอื่นที่สามารถใช้ได้เช่น เซรามิก [2] หรือ พอลิเมอร์ เป็นต้น ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยในกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้พอลิเมอร์มากขึ้น ซึ่งไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ที่สร้างด้วยพอลิเมอร์นั้นมีการโก่งตัว (deflection) ที่มากกว่าซิลิกอน เพราะค่าขึงมอดูลัสที่น้อยกว่าและราคาต้นทุนในการสร้างนั้นต่ำกว่าซิลิกอน ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาตัวตรวจรู้ความดันที่ทำจากพอลิเมอร์ เช่น การใช้สาร polydimethylsiloxane (PDMS) และ polyethylene terephthalate (PET) เป็นไดอะแฟรม และมีสเตรจเงกแบบฟิล์มบางในไดอะแฟรม [3] ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมสร้างด้วย PDMS โดยมีคาร์บอนไฟเบอร์เป็นสเตรจเงก [4] ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างด้วย PMMA และมีคาร์บอนนาโนทิว (carbon nanotube) เป็นตัวต้านทานเพียโซ (Piezoresistive) [5] และตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างด้วย SU-8 เป็นไดอะแฟรมที่มีตัวต้านทานแบบเพียโซ [6]

SU-8 เป็นสารไวแสงชนิดลบมีลักษณะเป็นของเหลวเมื่อทำปฏิกิริยากับแสงแล้วจะมีลักษณะแข็งตัวขึ้น มีความยืดหยุ่นคล้ายวัสดุพอลิเมอร์ มีความทนต่อกรดเบสและความร้อนได้ดีกว่าวัสดุพอลิเมอร์อื่น เช่น PDMS และ PET และยังเป็นวัสดุที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เพราะมีราคาถูกกว่าทั้งซิลิกอน มีความสะดวกในการใช้งานและสามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (วัสดุ PMMA ต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นของรังสีเอ็กซ์)

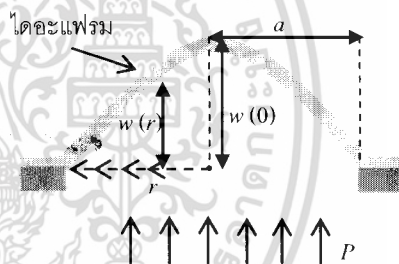
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างตัวตรวจรู้ความดันก๊าซ ต้นทุนต่ำที่ใช้วัดความดันก๊าซทั่วไป เช่น วัดความดันจากถังก๊าซ โดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นไดอะแฟรมรูปวงกลม เนื่องจากไดอะแฟรมรูปวงกลมมีประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อเทียบกับไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัส [7] มีขนาดไม่เกิน 1,000 μm สามารถวัด

ความดันก๊าซในช่วงไม่เกิน 30 psi (206 kPa) เทียบกับบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้อง

2. การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

2.1 การออกแบบ

ขนาดของไดอะแฟรมเป็นตัวกำหนดระดับย่านความดันที่วัดและความเครียดสูงสุดที่ไดอะแฟรมสามารถรับได้ และยังกำหนดความไวของตัวตรวจรู้อีกด้วย เมื่อให้ความดันที่ระนาบของแผ่นไดอะแฟรม ไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวขึ้นดังรูปที่ 1 อธิบายได้ตามสมการที่ (1) [8] เมื่อ w คือ ระยะโก่งตัวของไดอะแฟรม (m) P คือ ความดันก๊าซ (Pa) a คือ ความยาวรัศมีของไดอะแฟรม (m) r คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม (m) และ D คือความแข็งเชิงดัด (Flexural rigidity) กำหนดได้โดยสมการที่ (2)



รูปที่ 1 ลักษณะการโก่งตัวของไดอะแฟรม

$$w(r) = \frac{P}{64D} [a^2 - r^2]^2 \quad (1)$$

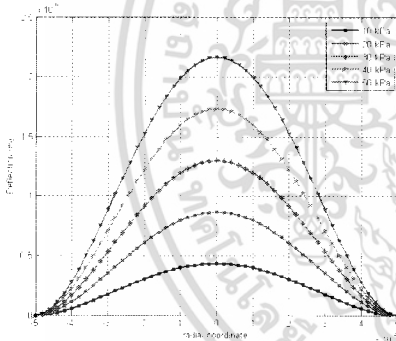
$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

เมื่อ E คือ ขึงมอดูลัส (Young's modulus) (Pa) h คือ ความหนาของไดอะแฟรม (m) และ ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) เมื่อนำค่า D จากสมการที่ (2) มาแทนในสมการที่ (1) จะได้สมการที่ (3)

$$w(r) = \frac{3(1-\nu^2)P}{16Eh^3} (a^2 - r^2) \quad (3)$$

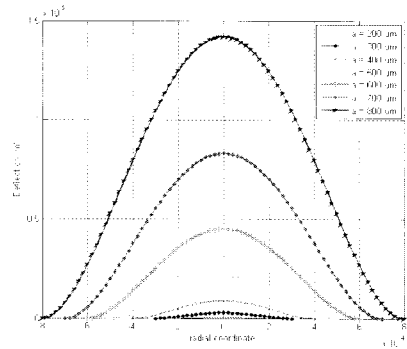
ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันด้วยสารไวแสง SU-8 มีค่าขึงมอดูลัสเท่ากับ 4.02 GPa และอัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.22 [9] จากสมการที่ (3) สามารถแทนแบบจำลองไดอะแฟรมเพื่อศึกษาผลของ

ความดันในช่วง 10-50 kPa ต่อการโค้งตัวของโคอะแฟรม โดยกำหนดให้โคอะแฟรมหนา 40 μm รัศมี 500 μm ได้กราฟลักษณะการโค้งตัวของโคอะแฟรมดังรูปที่ 2 คือเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น โคอะแฟรมจะโค้งตัวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อหาขนาดรัศมีโคอะแฟรมที่เหมาะสม ทำการจำลองให้โคอะแฟรมหนา 40 μm รัศมีตั้งแต่ 200-800 μm ที่ความดัน 50 kPa จะได้ผลดังรูปที่ 3 โคอะแฟรมที่มีขนาดใหญ่กว่าจะโค้งตัวได้มากกว่าขนาดเล็ก และเพื่อหาความหนาของโคอะแฟรมที่เหมาะสม ทำการจำลองโคอะแฟรมที่ความหนาต่างๆ โดยมีขนาดรัศมี 500 μm ที่ความดัน 50 kPa ได้ผลกราฟดังรูปที่ 4 คือ โคอะแฟรมที่มีความหนาน้อยกว่าจะสามารถโค้งตัวได้มากกว่า จากผลการจำลองทั้ง 3 สรุปได้ว่าขนาดโคอะแฟรมควรมีความหนาน้อย และมีขนาดรัศมีที่ใหญ่ จึงจะตอบสนองความดันได้ดี

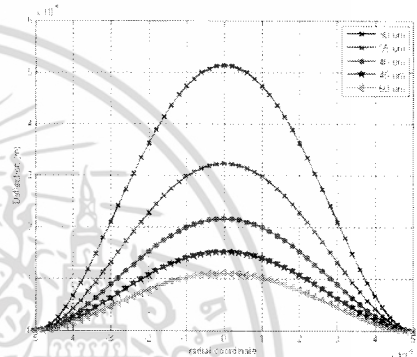


รูปที่ 2 การจำลองการโค้งตัวของโคอะแฟรมรูปวงกลม รัศมี 500 μm ที่ความดันระดับต่างๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกขนาดโคอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดันเป็นรูปวงกลมมีขนาดรัศมี 500 μm ซึ่งเป็นขนาดที่ทำให้ตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดไม่ใหญ่นเกินไปและสร้างได้ง่าย มีความหนา 40 μm ซึ่งเป็นการที่ความหนาที่สามารถสร้างได้ในห้องปฏิบัติการ ถ้าหากความหนาน้อยกว่านี้อาจทำให้โคอะแฟรมรับระดับแรงดันก๊าซได้ไม่มาก อาจทำให้โคอะแฟรมเกิดความเสียหายได้



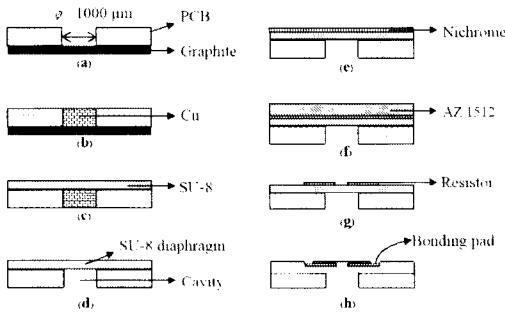
รูปที่ 3 การจำลองการโค้งตัวของโคอะแฟรมรูปวงกลม ที่มีขนาดรัศมีต่างกัน



รูปที่ 4 การจำลองการโค้งตัวของโคอะแฟรมรูปวงกลม รัศมี 500 μm ที่ความหนาต่างๆ

2.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

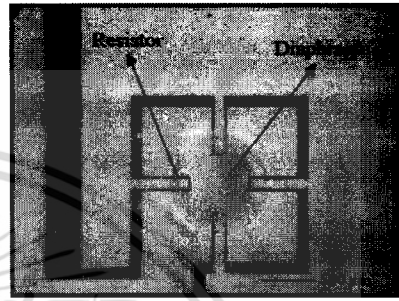
การสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างในห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟี มีขั้นตอนดังรูปที่ 5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างโคอะแฟรม ได้แก่ สารไวแสง SU-8 เครื่องหมุนเคลือบสารไวแสง (Spinner) เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) เพื่อทำการอบสารไวแสง เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต สารละลายทองแดง และชุดชุบโลหะ ส่วนในการสร้างตัวต้านทานไฟฟ้า ใช้โลหะนิโครมและเครื่องระเหยไอโหะในสุญญากาศ สารไวแสงชนิดบวก AZ เพื่อสร้างเป็นชั้นป้องกันในการสกัดโลหะ และสารละลายเพื่อทำการสกัดโลหะนิโครมให้เกิดตัวต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันในห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

- 1) นำแผ่นพิมพ์วงจร (PCB) สกัดทองแดงให้หมดแล้ว เจาะรูขนาดครึ่งมิลลิเมตร 500 μm นำแกรไฟต์ประกบติดด้านหลังของแผ่นพิมพ์วงจรดังรูปที่ 5 (a)
- 2) นำไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อเติมโลหะทองแดงลงในรู จากนั้นนำแผ่นแกรไฟต์ออกจัดบริเวณทองแดงให้เรียบเสมอ ดังรูปที่ 5 (b)
- 3) หมุนเคลือบ (Spin) สารไวแสง SU-8 เบอร์ 2050 [10] ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อให้สารไวแสงแข็งตัวเป็นพอลิเมอร์ สารไวแสงชั้นนี้จะเป็นไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ ดังรูปที่ 5 (c)
- 4) ทำการสกัดทองแดงด้วยสารละลายเคมี จะได้ไดอะแฟรม SU-8 ดังรูปที่ 5 (d)
- 5) นำไปเคลือบโลหะนิโครมด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ เพื่อเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 5 (e)
- 6) หมุนเคลือบสารไวแสง AZ 1512 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อให้เกิดลวดลายตัวต้านทานไฟฟ้า จากนั้นล้างสารไวแสง (Develop) ด้วยสารละลายเคมีจะเกิดลายตัวต้านทานขึ้น รูปที่ 5 (f)
- 7) สกัดโลหะนิโครมเป็นลวดตัวต้านทานไฟฟ้าด้วยสารละลายเคมี $\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{DI Water}$ (1:1:3) แล้วล้างสารไวแสง AZ ออกให้หมด ได้ตัวต้านทานไฟฟ้ามีค่า $4.404 \text{ k}\Omega$ ดังรูปที่ 5 (g)
- 8) หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 เบอร์ 2002 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตให้แข็งตัวทั้งแผ่น แต่เปิดฉายเฉพาะบริเวณที่ใช้ในการเชื่อมต่อสายไฟเพื่อใช้ในการวัดผล สารไวแสงชั้นนี้ใช้เป็นชั้นป้องกันตัวต้านทานไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 (h)

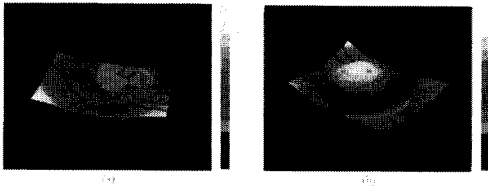
เมื่อทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันเสร็จสิ้นแล้วจะได้ลักษณะชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 6 โครงสร้างตัวตรวจรู้เป็นไดอะแฟรมรูปวงกลมที่สร้างด้วยสารไวแสง SU-8 ขนาดครึ่งมิลลิเมตร 500 μm หนา 38 μm มีตัวต้านทานไฟฟ้าพาดผ่านเข้าไปบริเวณไดอะแฟรมทั้งหมดสี่ตัว มีค่าความต้านทานไฟฟ้า $4.404 \text{ k}\Omega$



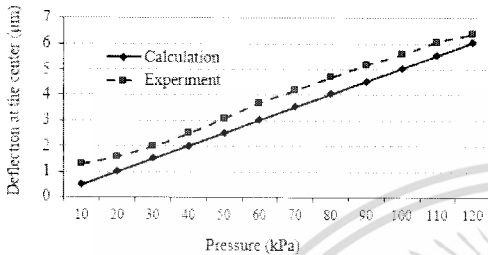
รูปที่ 6 ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

3. การทดสอบและผลการทดสอบ

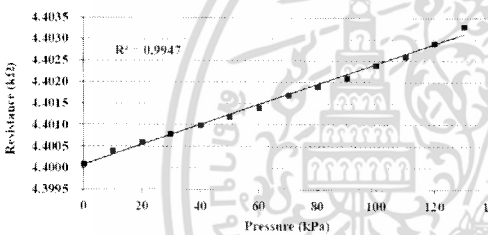
ทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน โดยปล่อยก๊าซไนโตรเจนทางด้านล่างของตัวตรวจรู้ ไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นจะเกิดการโก่งตัวดังรูปที่ 7 ซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดความหนา และเปรียบเทียบการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมจากการคำนวณและตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นที่มีความหนา 38 μm ได้กราฟดังรูปที่ 8 เห็นได้เมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นระยะ โกงตัวของไดอะแฟรมเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ค่าที่วัดได้นั้นมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ $0.58 \mu\text{m}$ และเมื่อไดอะแฟรมโก่งตัวสูงขึ้นจะทำให้เกิดความเครียดขึ้นที่ตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจที่อยู่บนไดอะแฟรม จึงเป็นผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามความเครียดที่เกิดขึ้น ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันที่ได้รับ แสดงดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $0.0269 \Omega/\text{kPa}$



รูปที่ 7 ภาพการวัดโก่งตัวของ ไดอะแฟรมรูปร่างกลมจาก เครื่องวัดความหนา (a) 0 kPa (b) 120 kPa



รูปที่ 8 กราฟค่าการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของตัวตรวจรูที่ สร้างขึ้นและค่าจากการคำนวณ

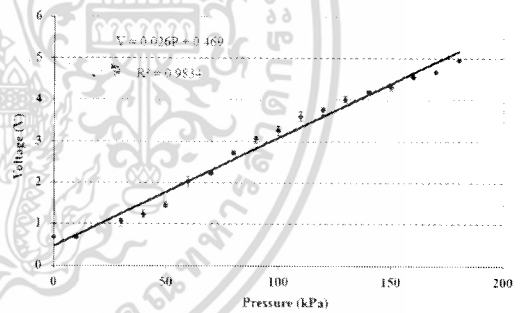


รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน ไฟฟ้าและความดันก๊าซ

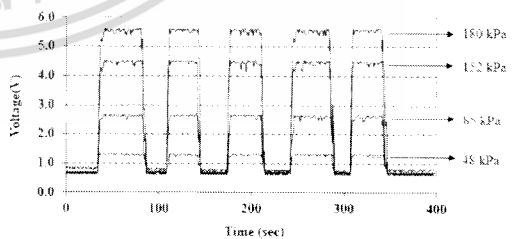
ทำการสอบเทียบ (Calibration) ตัวตรวจรูความดันที่ สร้างขึ้นกับตัวตรวจรูเชิงพาณิชย์ MPX 5700 ซึ่งสามารถ วัดความดันได้ในช่วง 0-700 kPa ค่าความไว 6.4 mV/kPa ช่วงเวลาในการตอบสนอง 1 ms ค่าความแม่นยำ ±2.5% ค่า Full scale output 4.7 V และค่า Full scale span 4.5 V ที่อุณหภูมิ 0-85°C โดยเริ่มจากการปล่อยก๊าซไนโตรเจน ให้ก๊าซไหลไปยังตัวตรวจรูความดันที่สร้างขึ้นและ MPX 5700 พร้อมกับ ตัวตรวจรูที่สร้างขึ้นได้ทำการต่อกับวงจร วิสโตมบริดจ์และวงจรขยายสัญญาณ และต่อกับบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่ออ่านค่าความดันก๊าซพร้อมกัน ทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิห้อง ได้กราฟรูปที่ 10 ตัว ตรวจรูที่สร้างขึ้นนั้นเริ่มตอบสนองที่ความดันก๊าซ 30 kPa ค่าความแม่นยำ ±10% ค่า Full scale output 4.95 V Full scale span 4.28 V ความไว 26 mV/kPa ค่าคลาดเคลื่อน

±7.3kPa เมื่อเทียบกับ MPX5700 ซึ่งค่าความไวขึ้นอยู่กับ ชนิดของโลหะที่ใช้ทำเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า ซึ่งสเตรกเจก นิยมใช้โลหะนิโครม เนื่องจากมีความไวของสเตรกเจกสูง และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานต่ำ

เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) เช่น ผลตอบสนอง (Response) การกลับคืนสภาพเดิม (Recovery) หรือ ความล้า (Fatigue) ของตัวตรวจรูความ ดัน ทำการทดสอบโดยป้อนความดันก๊าซที่ระดับความดัน ต่างๆในรูปแบบขั้นบันได ทำซ้ำ 4 ครั้ง แล้วจับสัญญาณ แรงดันเอาต์พุตโดยใช้ออสซิลโคปป์บันทึกลักษณะ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 11 เวลาในการ ตอบสนองเท่ากับ (Rise time) 2.3 วินาที ค่าความคลาด เคลื่อนเท่ากับ ±0.5 วินาที ชนิดโลหะของตัวต้านทาน ไฟฟ้าและความหนาของ ไดอะแฟรมมีผลต่อการ ตอบสนอง หากไดอะแฟรมมีความหนาน้อยจะทำให้ ตอบสนองทางเวลาน้อยด้วย



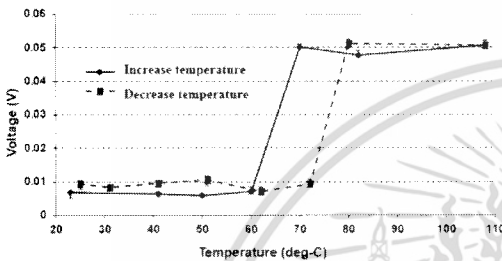
รูปที่ 10 กราฟแรงดันเอาต์พุตและความดันก๊าซ



รูปที่ 11 กราฟผลการตอบสนองทางเวลา

อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ไฟฟ้าของโลหะผสม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โลหะ ผสมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำการศึกษาผล ของอุณหภูมิโดยการนำตัวตรวจรูที่สร้างขึ้นมาทดสอบ โดยใส่ไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ทำการวัด

แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยไม่ป้อนก๊าซ เริ่มวัดที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 10°C จนถึง 100°C จากนั้นลดอุณหภูมิลง ทำซ้ำเช่นเดียวกันที่แต่ละอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ของแต่ละอุณหภูมิแสดงผลดังรูปที่ 12 แรงดันไฟฟ้าคงที่ในช่วง $25-60^{\circ}\text{C}$ และเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 60°C เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ตัวตรวจรู้สามารถวัดความดันก๊าซได้ในช่วงอุณหภูมิ $25-60^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ

4. สรุป

ในบทความนี้ได้ทำเสนอตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นไดอะแฟรม โดยตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดครึ่งมี $500\ \mu\text{m}$ ตัวต้านทานไฟฟ้าสร้างด้วยโลหะนิโครม สามารถวัดความดันก๊าซได้ในช่วง $30-180\ \text{kPa}$ ที่อุณหภูมิ $25-60^{\circ}\text{C}$ มีเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 2.3 วินาที ค่าความแม่นยำ $\pm 10\%$ และค่า Full scale output $4.95\ \text{V}$, full scale span $4.28\ \text{V}$ ซึ่งค่าความไวนี้เหมาะสมกับการวัดความดันในช่วงไม่สูงมากนักและเวลาในการตอบสนองนั้นมีค่ามากกว่าของตัวตรวจรู้เซิงพาณิชย์ Motorola MPX 5700 แต่ยังสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] L. Lin, A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors,

Journal of MEMS Systems, Vol.8, No.4, pp. 514-522, December 1999.

[2] L. Janovsky and R. Bauer, Absolute Pressure Sensors in CERMET Thick Film Technology, 26th International Spring Seminar on Electronics Technology, pp. 448-451, 2003.

[3] J. Kim, J. Lee, and B. Choi, Fabrication and Characterization of Strain Gauge Integrated Polymeric Diaphragm Pressure Sensors, International journal of precision engineering and manufacturing, Vol. 14, No. 11, pp. 2003-2008, Nov 2013.

[4] D. Lee and Y. Choi, A novel pressure sensor with a PDMS diaphragm, Microelectronic Engineering 85 pp. 1054-1058, 2008.

[5] C.K.M. Fung, M.Q.H. Zhang, R.H.M. Chan and W.J. Li, A PMMA-based micro pressure sensor chip using carbon nanotubes as sensing elements, IEEE, 2005.

[6] H.S. Ko, C.W. Liu, and C.W. Gau, Novel Fabrication of a Pressure Sensor with Polymer Material and Evaluation of its Performance, J. Micromech. Microeng. pp. 1640-1648, 2007.

[7] R. Khakpour, Solmaz R. M. Mansouri and A.R. Bahadorimehr, Analytical Comparison for Square, Rectangular and Circular Diaphragms in MEMS Applications, International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications, pp 297-299. 2010

[8] S. Timoshenko, and S.W. Krieger, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.

[9] T. Hsu, MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, 2nd edition, John Wiley, 2008.

[10] Microchem Corporation. www.microchem.com