

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีต่อความไวของอุปกรณ์  
ตรวจจับความดันเป็ยโซรีซิสทีปแบบโครงสร้างเชิงผิว

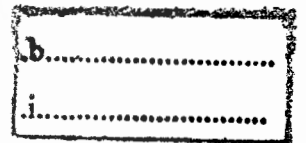
THE EFFECT OF POLYSILICON DIAPHRAGM THICKNESS TO  
THE SENSITIVITY OF SURFACE MICROMACHINING  
PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS



T107447



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 107447  
วัน,เดือน,ปี 29 ส.ค. 2553



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009-EN-M-043-182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE EFFECT OF POLYSILICON DIAPHRAGM THICKNESS TO  
THE SENSITIVITY OF SURFACE MICROMACHINING  
PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS**



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

**2009**

**KMITL 2009-EN-M-043-182**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีต่อความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดันเป็ย  
โซรีซิสทีปแบบโครงสร้างเชิงผิว

Thesis Title The Effect of Polysilicon Diaphragm Thickness to the Sensitivity of Surface  
Micromachining Piezoresistive Pressure Sensors

นักศึกษา นายบุญเกียรติ พิณัญญู

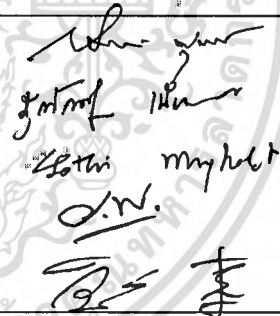
รหัสประจำตัว 51061303

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-048-182

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	

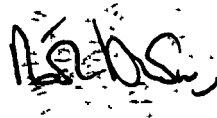
วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2552 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจท.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วันที่ 8 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2552

ลงชื่อ.....

<b>Thesis Title</b>	The Effect of Polysilicon Diaphragm Thickness to the Sensitivity of Surface Micromachining Piezoresistive Pressure Sensors
<b>Student</b>	Mr. Boonkue Phinyo
<b>Student ID</b>	51061303
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

## ABSTRACT

This thesis present the effect of polysilicon diaphragm thickness to the sensitivity of surface micromachining piezoresistive pressure sensors. The polysilicon diaphragm had an area of  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  with varying diaphragm thickness of 0.4, 0.8 and 1.5  $\mu\text{m}$  and the cavity depth 1.4  $\mu\text{m}$ . The testing conditions were under pressure from 1 mbar to 15 bar at temperature ranging from  $-20^\circ\text{C}$  to  $150^\circ\text{C}$ . From the result, polysilicon diaphragm thickness of 1.5  $\mu\text{m}$  had higher sensitivity than diaphragm thickness of 0.8  $\mu\text{m}$  and 0.4  $\mu\text{m}$  with value of  $1.432 \times 10^{-3}$  V/V/Bar,  $0.742 \times 10^{-3}$  V/V/Bar and  $0.174 \times 10^{-3}$  V/V/Bar respectively. The pressure sensors had the maximum linearity of 99.9 %FSO and the minimum of 99.5 %FSO, with only their difference in Temperature Coefficient of Resistance (TCR) of less than 16 ppm /  $^\circ\text{C}$ . In addition, the testing at higher temperature found that the Temperature Coefficient of Offset (TCO) increased with respect to the thickness of polysilicon diaphragm with the maximum value of 2.229 % /  $^\circ\text{C}$  FSO and the minimum of 0.436 % /  $^\circ\text{C}$  FSO. This is because a free standing polysilicon diaphragm will have higher expansion compared with the the ones sticking to the bottom of cavity, this followed in accordance with the analysis of result. Furthermore. the Temperature Coefficient of Sensitivity (TCS) was higher as the temperature increased, with the maximum equal to -2.164% /  $^\circ\text{C}$  FSO and the minimum equal to -0.067 % /  $^\circ\text{C}$  FSO. Therefore, the resulting pressure sensitivity will be lower at higher temperature.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและการให้คำปรึกษาจาก รศ.ดร.วิสุทธิ จิตรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์โย จากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยทุกด้านตั้งแต่ความรู้ในการวิจัย กระบวนการสร้างที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และนักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองและการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันและการให้คำปรึกษา มาโดยตลอด

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

บุญเกื้อ พิณโญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XIV
รายการสัญลักษณ์.....	XV
รายการศัพท์เทคนิค.....	XVIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	7
1.7 รายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	7
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี.....</b>	<b>9</b>
2.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์.....	9
2.2 อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค.....	9
2.2.1 ประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค.....	10
2.2.2 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค.....	10
2.3 สัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีฟตามยาวและสัมประสิทธิ์ตามขวาง.....	12
2.4 ตำแหน่งการวางตัวด้านทาน.....	14
2.5 ความเครียด ความเค้นและการแอ่นตัวของโพลีซิลิคอน ไดอะแฟรม.....	16
2.6 การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคแบบเปียโซรีซิสทีฟ.....	21
2.6.1 ตัวด้านทานโพลีซิลิคอน.....	22
2.6.2 ชั้นฉนวนกั้นระหว่างตัวด้านทานเปียโซรีซิสเตอร์กับไดอะแฟรม.....	25

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 โพลีซิลิคอนไดอะเฟรม.....	26
2.6.4 Cavity ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	27
2.7 ฟิล์มโพลีซิลิคอน.....	28
2.7.1 โครงสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน.....	28
2.7.2 คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอน.....	29
2.7.3 กระบวนการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน.....	30
2.8 กระบวนการสร้างตัวต้านทานเปียโซรีซิสทีฟชนิดยึงฝึงประจุ.....	31
2.8.1 กระบวนการยึงฝึงประจุ.....	32
2.8.2 การยึงฝึงประจุ.....	32
2.9 เทคนิคการแอนนีกหลังการยึงฝึงประจุ.....	34
2.10 วงจรวิทสโตนบริดจ์.....	36
2.10.1 วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์.....	36
2.10.2 วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์.....	37
2.10.3 วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฟลูบริดจ์.....	38
2.11 ความไวต่อการตอบสนอง.....	39
2.12 การหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้น.....	39
2.13 ฮีสเตอร์รีซิส.....	40
2.14 สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ.....	41
2.15 สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ.....	42
2.16 สัมประสิทธิ์ความไวต่อการตอบสนองของอุณหภูมิ.....	43
บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	44
3.2 เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ารุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer.....	47
3.3 ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	47
3.3.1 ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันสูง.....	47
3.3.2 ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันต่ำกว่า ความดันบรรยากาศ.....	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
4.1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
4.2 การออกแบบตัวต้านทานเปียโซรีซิสทีฟ ชนิดโพลีสไตรีเตอร์.....	51
4.3 การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ.....	52
4.4 ลำดับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ.....	53
4.5 ขั้นตอนการ Package บนแผ่น PCB.....	57
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	58
5.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อการเปลี่ยนค่าความ ต้านทาน $R_{cr}$ และ $R_M$ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	59
5.2 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์.....	62
5.3 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์.....	67
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	72
6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	72
6.2 การวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันการใช้งานของอุปกรณ์ ตรวจจับความดัน.....	79
6.2.1 การวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์.....	79
6.2.2 การวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันที่ความดันต่ำกว่าความดัน บรรยากาศตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์.....	82
6.3 การวิเคราะห์ความไวในการตอบสนองต่อความดัน.....	84
6.4 การวิเคราะห์ค่าฮิสเตอร์รีซิส.....	87
6.5 การวิเคราะห์ผลของการชดเชยอุณหภูมิ.....	87
6.5.1 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ.....	88
6.5.2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ.....	88
6.5.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ.....	89
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง.....	92

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....95

ประวัติผู้เขียน.....99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
VII  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 การเจริญเติบโตของตลาดเมมส์ทั่วโลก.....	1
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติข้อดีและข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบ เปียโซรีซิสทีป คาปาซิทีป และแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการสร้างแบบเชิงผิวและแบบบัลก์ของอุปกรณ์ ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค.....	11
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ.....	30
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ที่ใช้ในงานวิจัย.....	52
ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความหนาไดอะแฟรม.....	58
ตารางที่ 6.1 ข่านความดันการใช้งานและความเป็นเชิงเส้นที่ความดันสูง.....	82
ตารางที่ 6.2 ข่านความดันการใช้งานและความเป็นเชิงเส้นที่ความดันต่ำกว่า ความดันบรรยากาศ.....	84
ตารางที่ 6.3 ความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดัน ตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์.....	85
ตารางที่ 6.4 ความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดัน 1 มิลลิบาร์บาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์บาร์.....	85
ตารางที่ 6.5 ค่าฮิสเตอร์รีซิสของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	87
ตารางที่ 6.6 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ.....	88
ตารางที่ 6.7 สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ.....	89
ตารางที่ 6.8 สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ.....	90

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 การแอนด์ตัวของไดอะแฟรมที่เงื่อนไขความดันต่าง ๆ.....	4
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์ที่เปลี่ยนปริมาณทางฟิสิกส์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า.....	9
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ตรวจจับความดันเบี่ยงโซริซิสทีปโครงสร้างแบบบัลค์.....	11
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ตรวจจับความดันเบี่ยงโซริซิสทีปโครงสร้างแบบเชิงผิว.....	11
รูปที่ 2.4 ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุที่ประกอบด้วย (ก) แรงดึงตามยาว (ข) แรงดึงตามขวาง.....	13
รูปที่ 2.5 การกระจายค่าความเค้น ไดมอนด์ชั้นเลสใน 1 ควอทเรนที่บริเวณต่างๆ กับบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	15
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งการเกิดความเค้นมากที่สุดของ ไดอะแฟรม.....	16
รูปที่ 2.7 ไดอะแฟรมแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขณะที่ได้รับ ความดัน.....	17
รูปที่ 2.8 ตำแหน่งการแอนด์ตัวลงของ ไดอะแฟรมเมื่อ ได้รับ ความดัน.....	20
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโครงสร้างเชิงผิว.....	21
รูปที่ 2.10 โครงสร้างในการคำนวณหา Sheet Resistance.....	22
รูปที่ 2.11 ผลของความหนาของตัวต้านทานเบี่ยงโซริซิสเตอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าความต้านทาน.....	23
รูปที่ 2.12 ผลของความกว้างของตัวต้านทานเบี่ยงโซริซิสเตอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าความต้านทาน.....	23
รูปที่ 2.13 ผลของความยาวของตัวต้านทานเบี่ยงโซริซิสเตอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าความต้านทานที่ความหนาของตัวต้านทาน โพลีริซิสเตอร์.....	24
รูปที่ 2.14 ภาพด้านบนของเบี่ยงโซริซิสเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันสำหรับการต่อ เป็น โครงสร้างวิทส โคนบรีดจ์แบบฟลูบรีดจ์เพื่อเพิ่มความไวต่อการตอบสนอง.....	24
รูปที่ 2.15 ด้านบนของภาพตัดขวางของ ไดอะแฟรมและตัวต้าน โพลีริซิสเตอร์.....	25
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฉนวนที่กั้นระหว่างตัวต้านทาน โพลีริซิสเตอร์ กับไดอะแฟรมต่อความไวในการตอบสนองด้วยโปรแกรม ANSYS.....	25
รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS ของ Guckel และ Westergaard ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและการแอนด์ตัวของ ไดอะแฟรม.....	26
รูปที่ 2.18 ลักษณะของไดอะแฟรมที่ติดพื้นล่างของ Cavity.....	27

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.19 (ก) โครงสร้างโพลีซิลิคอน และ (ข) โครงสร้างผลึกซิลิคอน.....	28
รูปที่ 2.20 ผิวหน้าของโครงสร้างโพลีซิลิคอน.....	29
รูปที่ 2.21 โครงสร้างการทำเครื่องจักร LPCVD แบบเตาแบบแนวนอน.....	31
รูปที่ 2.22 เครื่อง LPCVD แบบเตาแบบแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ .....	31
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของเครื่องยิงฝิ่งประจุ.....	33
รูปที่ 2.24 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอร์นาส.....	33
รูปที่ 2.25 โครงสร้างของ เตาแบบแนวนอน.....	35
รูปที่ 2.26 เตาแอนนูลแบบแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	35
รูปที่ 2.27 ลักษณะการทำงานของวงจรวีทส โตนบริดจ์.....	36
รูปที่ 2.28 ลักษณะของวงจรวีทส โตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์.....	37
รูปที่ 2.29 ลักษณะของวงจรวีทส โตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์.....	38
รูปที่ 2.30 ลักษณะของวงจรวีทส โตนบริดจ์แบบฟลูบริดจ์.....	38
รูปที่ 2.31 รูปแบบและวิธีการหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	40
รูปที่ 2.32 กราฟของฮิสเตอร์รีซิสของเครื่องมือวัด.....	41
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM.....	45
รูปที่ 3.2 เครื่อง SEM รุ่น S-4700 ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	46
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ารุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer.....	47
รูปที่ 3.4 ระบบการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันสูง.....	48
รูปที่ 3.5 ระบบการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ.....	49
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซิสทีปที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
รูปที่ 4.2 ขนาดโครงสร้างของโพลีรีซิสเตอร์.....	51
รูปที่ 4.3 แบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันในงานวิจัย.....	52
รูปที่ 4.4 ลำดับขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	53
รูปที่ 4.5 ลำดับขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน (ต่อ) .....	54
รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางแสดงลำดับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีป.....	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.7 ลำดับการบรรจุอุปกรณ์ตรวจจับความดันลงแผ่น PCB .....	57
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน.....	59
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน.....	59
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน.....	60
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน.....	60
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน.....	61
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน.....	61
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน.....	63
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20 ถึง 120 องศาเซลเซียสที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน.....	63
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน.....	64
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20 ถึง 120 องศาเซลเซียสที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน.....	64
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน.....	65
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20 ถึง 120 องศาเซลเซียสที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน.....	65
รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 , 0.8 และ 1.5 ไมครอน.....	66
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน.....	67
รูปที่ 5.15 ผลของการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน.....	68
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน.....	68
รูปที่ 5.17 ผลของการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน.....	69
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน.....	69
รูปที่ 5.19 ผลของการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน.....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ ตรวจจับความดันที่ไคอะแฟรมหนา 0.4 , 0.8 และ 1.5 ไมครอน.....	70
รูปที่ 6.1 ด้านบนของโพลีซิลิคอนไคอะแฟรมที่มีความหนา (ก) 0.4 ไมครอน (ข) 0.8 ไมครอน และ (ค) 1.5 ไมครอน ที่สร้างจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	72
รูปที่ 6.2 ด้านหน้าของโพลีซิลิคอนไคอะแฟรม โพลีรีซิสเตอร์ตรวจจับความดัน และอุณหภูมิที่โพลีซิลิคอนไคอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน.....	73
รูปที่ 6.3 ภาพตัดขวางของโพลีซิลิคอนไคอะแฟรม ที่ความหนา 0.4 ไมครอน.....	74
รูปที่ 6.4 บริเวณตำแหน่งที่เริ่มคิดพื้นล่าง Cavity ของโพลีซิลิคอนไคอะแฟรมที่ความหนา 0.4 ไมครอน.....	74
รูปที่ 6.5 ภาพตัดขวางแสดงความลึกของ Cavity และความหนาของโพลีซิลิคอน ไคอะแฟรมที่ความหนา 0.4 ไมครอนบริเวณขอบของ Cavity.....	75
รูปที่ 6.6 ภาพตัดขวางของโพลีซิลิคอนไคอะแฟรม ที่ความหนา 0.8 ไมครอน.....	75
รูปที่ 6.7 ภาพตัดขวางแสดงการแอ่นตัวแบบคลื่นของของโพลีซิลิคอนไคอะแฟรม หนา 0.8 ไมครอน.....	76
รูปที่ 6.8 ภาพตัดขวางแสดงความลึกของ Cavity และความหนาของโพลีซิลิคอน ไคอะแฟรมที่ความหนา 0.8 ไมครอน.....	76
รูปที่ 6.9 ภาพตัดขวางของโพลีซิลิคอนไคอะแฟรม ที่ความหนา 1.5 ไมครอน.....	77
รูปที่ 6.10 ภาพตัดขวางแสดงความลึกของCavity และความหนาของโพลีซิลิคอนไคอะแฟรม ที่ความหนา 1.5 ไมครอน.....	77
รูปที่ 6.11 โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบความลึกของ Cavity เพื่อแก้ปัญหา การคิดพื้นของ ไคอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน.....	78
รูปที่ 6.12 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไคอะแฟรม หนา 0.4 ไมครอน ที่ข่านความดัน 1 ถึง 15 บาร์.....	79
รูปที่ 6.13 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไคอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน ที่ข่านความดัน 1 ถึง 7 บาร์.....	80
รูปที่ 6.14 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไคอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน ที่ข่านความดัน 8 ถึง 15 บาร์.....	80

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 6.15 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 ถึง 6 บาร์.....	81
รูปที่ 6.16 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน ที่ย่านความดัน 7 ถึง 15 บาร์.....	81
รูปที่ 6.17 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์.....	82
รูปที่ 6.18 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์.....	83
รูปที่ 6.19 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์.....	83
รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมกับความไวในการ ตอบสนองที่ความดัน 1 ถึง 2 บาร์.....	86
รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมกับความไว ในการ ตอบสนองที่ความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์.....	86
รูปที่ 6.22 ผลของค่า TCS ที่ทำให้ความไวในการตอบสนองความดันของอุปกรณ์ตรวจจับ ความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น.....	90
รูปที่ 6.23 ผลของค่า TCS ที่ทำให้ความไวในการตอบสนองความดันของอุปกรณ์ตรวจจับ ความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น.....	91
รูปที่ 6.24 ผลของค่า TCS ที่ทำให้ความไวในการตอบสนองความดันของอุปกรณ์ตรวจจับ ความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น.....	91

## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลไทย
a-Si	Amorphous Silicon	อะมอร์ฟิซิลิคอน
Å	Angstrom	อังสตรอม
CVD	Chemical vapor deposition	การปลูกฟิล์มด้วยไอสารเคมี
EMI	Electromagnetic Interference	การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
KOH	Potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
LPCVD	Low Pressure Chemical vapor deposition	การปลูกฟิล์มด้วยไอสารเคมีที่ความดันต่ำ
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-Systems	ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค
MBE	Molecular Beam Epitaxy	อีพีแท็กซี่ใช้ลำโมเลกุล
PCB	Printed Circuit Board	แผ่นลวดลายวงจร
PDE	Partial Differential Equation	สมการพหุคูณดิฟเฟอเรนเชียล
SEM	Scanning Electron Microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
TCO	Temperature Coefficient Offset	สัมประสิทธิ์ความออฟเซตของอุณหภูมิ
TCR	Temperature Coefficient Resistivity	สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ
TCS	Temperature Coefficient Sensitivity	สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
TPMS	Tire Pressure Monitor System	ระบบวัดความดันภายในล้อยางรถยนต์
µm	Micrometer	ไมโครเมตร

## รายการสัญลักษณ์

$P_A$	คือ	ความดันบรรยากาศ
$P_C$	คือ	ความดันภายในช่อง Cavity
$R_0$	คือ	ค่าความต้านทานเริ่มต้น
$R$	คือ	ค่าความต้านทาน
$GF$	คือ	เกจแฟคเตอร์
$\varepsilon$	คือ	ความเครียด
$P$	คือ	ความดัน
$h$	คือ	ความหนาของไดอะแฟรม
$\bar{E}$	คือ	สนามไฟฟ้า
$\rho$	คือ	พิกัดความต้านทาน
$\pi$	คือ	สัมประสิทธิ์เบี่ยงโซริซีฟที่ปเทนเซอร์
$J$	คือ	ความหนาแน่นกระแส
$\rho_1$	คือ	พิกัดความต้านทานเริ่มต้น
$\pi_1$	คือ	สัมประสิทธิ์เบี่ยงโซริซีฟที่ปตามยาว
$\pi_2$	คือ	สัมประสิทธิ์เบี่ยงโซริซีฟที่ปตามขวาง
$\sigma$	คือ	ความเค้น
$\sigma_{(x,y)}$	คือ	ตำแหน่งความเค้นบนไดอะแฟรม
$\bar{\sigma}_{(x,y)}$	คือ	ความเค้นโดเมนชั้นเลต
$a$	คือ	ความยาวของไดอะแฟรม
$\sigma_1$	คือ	ความเค้นตามยาว
$\sigma_2$	คือ	ความเค้นตามขวาง
$Y$	คือ	ยังโมดูลัส
$M$	คือ	โมเมนต์
$\Gamma$	คือ	แรงเฉือน
$\nu$	คือ	ค่าปัวซอง
$D_M$	คือ	แรงบิดของ โมเมนต์
$R_s$	คือ	ความต้านทานเชิงแผ่น
$W$	คือ	ความกว้างของตัวต้านทานโพสิทีฟิสเตอร์

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$l_p$	คือ	ความยาวของตัวต้านทาน โพลีรีซิสเตอร์
$t$	คือ	ความหนาของตัวต้านทาน โพลีรีซิสเตอร์
$\chi$	คือ	ค่าคงที่ของคุณสมบัติการยืดหยุ่นของวัสดุ
$\bar{\sigma}_{(x,y)}$	คือ	ความเค้นโคเมนชันเลส
$\sigma_{(x,y)}$	คือ	ตำแหน่งความเค้นบนโคอะเฟรม
$R_M$	คือ	ตัวต้านทานบนโคอะเฟรม
$R_{ref}$	คือ	ตัวต้านทานนอกโคอะเฟรม
$D$	คือ	ปริมาณสารเจือ หน่วย ไอออน / ซม <sup>2</sup>
$T$	คือ	เวลาในการยิงฝังประจุ
$I$	คือ	กระแสไอออน
$N$	คือ	จำนวนประจุต่อไอออน
$Q$	คือ	$1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมป์
$A$	คือ	เป็นพื้นที่หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
$V_s$	คือ	แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ของวงจรวีทสโตนบรอดจ์
$\Delta V$	คือ	การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเข้าที่พุทของวงจรวีทสโตนบรอดจ์
$\Delta P$	คือ	การเปลี่ยนแปลงความดัน
$S$	คือ	ความไวในการตอบสนองต่อความดัน
$NLi$	คือ	ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น
$V_o(P_i)$	คือ	เข้าที่พุทมากที่สุดเทียบกับเส้นตรงที่กำหนด
$V_o(P_m)$	คือ	เข้าที่พุทมากที่สุดของย่านการวัด
$P_i$	คือ	ความดันในช่วงความกว้างมากที่สุดเทียบกับเส้นตรงที่กำหนด
$P_m$	คือ	ความดันมากที่สุดของย่านการวัด
$R_1$	คือ	ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใด ๆ
$T_A$	คือ	อุณหภูมิห้อง
$T_1$	คือ	อุณหภูมิใด ๆ
$E_a$	คือ	พลังงานที่ทำการจ่าย
$k$	คือ	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์
$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ
$\beta$	คือ	สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$V_{FS}(T_A)$	คือ	เข้าที่พหุเต็มสเกลที่อุณหภูมิห้อง
$V_{FS}(T_1)$	คือ	เข้าที่พหุเต็มสเกลที่อุณหภูมิใด ๆ
$V_{OS}(T_A)$	คือ	เข้าที่พหุออฟเซตที่อุณหภูมิห้อง
$V_{OS}(T_1)$	คือ	เข้าที่พหุออฟเซตที่อุณหภูมิใด ๆ
$\rho_{corrected}$	คือ	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ถูกต้อง
$\rho_{measured}$	คือ	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้
F	คือ	แฟคเตอร์ความถูกต้อง
Forward 1 st	คือ	เข้าที่พหุขาขึ้นรอบแรก
Forward 2 nd	คือ	เข้าที่พหุขาขึ้นรอบสอง
Reverse 1 st	คือ	เข้าที่พหุขาลงรอบแรก



# รายการศัพท์เทคนิค

## ภาษาไทย

กระบวนการยิงฝังประจุ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การกระจัดมากที่สุด

การกัดแบบเปียก

การชดเชยอุณหภูมิ

การตรวจจับความสมดุล

การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

การหมุนตัว

การไอออไนเซชัน

การแอนนิลหลังการยิงฝังประจุ

เกจแฟกเตอร์

แกเลียมอาร์เซไนด์

กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง

ขดลวดทังสเตน

ขั้วไฟฟ้า

ขอบเขตเกรน

ความไวในการตอบสนองต่อความดัน

ความเค้นมากที่สุด

ความเป็นเชิงเส้น

ความเค้นไคแมนชันเลส

ความเค้นเฉือน

ความเค้นตามขวาง

ความเค้นในแนวตั้งฉาก

ความเค้นตามยาว

คาปาซิทีป

ความสม่ำเสมอของฟิล์ม

ความคมชัดลึกสูง

ความต้านทานเชิงแผ่น

## ภาษาอังกฤษ

Ion implantation

Scanning electron microscopy

Maximum displacement

Wet etching

Compensation

Null detector

Voltage detector

Spin

Ionization

Post anneal

Gauge Factor

Gallium-Arsenide

High spatial resolution

Tungsten filament

Metal contact

Grain boundary

Pressure sensitivity

Maximum stress

Linearity

Dimensionless Stress

Shear stress

Transverse stress

Normal stress

Longitudinal stress

Capacitive

Uniformity

High depth of field

Sheet-resistance

## รายการศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ความผิดพลาดจากเครื่องมือวัด	Instrumental error
ความผิดพลาดจากผู้วัด	Human errors
ค่าเข้าที่พหุเต็มสเกล	Full scale Output
โครงสร้างแบบบัลก์	Bulk
โครงสร้างแบบเชิงผิว	Surface
ช่องว่าง	Cavity
ชุดควบคุมอุณหภูมิ	Temperature control
ซ็อดคัมฟิลด์อิมิชัน	Schottky filed emission source
ไซเลน	Silane
ดีฟเลกชันคอยล์	Deflection coil
ดัชนีการยืดหดตัวของวัสดุ	Modulus of elastic of material
ไดอะแฟรม	Diaphragm
ตัวต้านทาน โพลีรีซิสเตอร์	Poly resistor
ตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ	Diffused resistor
ตัวต้านทานชนิดพินซ์	Pinched- resistor
ตัวต้านทานชนิดอพิแทกซ์เซียล	Epitaxial resistor
ตัวต้านทานแบบโมโนลิทิก	Monolithic resistor
ตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุ	Ion- implanted resistor
เตาแบบแนวนอน	Horizontal hot wall furnace
ท่อควอทซ์	Quartz tube
ท่อเร่งในการยิงฝังประจุ	Acceleration tube
โบรอน	Boron
เปียโซรีซิสทีป	Piezoresistive
ปริมาณสารเจือ	Dose
ปืนอิเล็กตรอน	Electron gun
ปืนอิเล็กตรอนแบบผลึก $LaB_6$	lanthanum hexaboride crystal
ปืนอิเล็กตรอนแบบ โคลด์ฟิลด์อิมิชัน	Cold field emission source
ปั๊มสุญญากาศ	Vacuum Pump

## รายการศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ผลึกรูปเดี่ยว	Single crystal
แผ่นฐานรอง	Substrate
โพลีคริสตอล	Poly crystal
โพลีซิลิคอน	Poly silicon
ฟอสฟอรัส	Phosphorus
เมมเบรน	Membrane
แม่เหล็กไฟฟ้า	Electromagnetic
ย่านความดัน	Pressure rang
ยังโมดูลัส	Young's modulus
รอยสัมผัสโอห์มิก	Ohmic contact
ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค	Micro-Electro-Mechanical Systems
ระบบความดันภายในล้อรถยนต์	Tire Pressure Monitor System
ระนาบผลึก	Lattice orientation
เลนส์ควอดรูโพล์	Quadruple-lens
เลนส์วัตถุ	Objective lens
วงจรรวม	Integrated Circuit
วงจรวีทสโตนบริดจ์	Wheatstone Bridge
วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์	Quarter Bridge Circuit
วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์	Full Bridge Circuit
วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์	Half Bridge Circuit
สภาพนำไฟฟ้า	Conductivity
สภาพต้านทานไฟฟ้า	Resistivity
สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ	Temperature Coefficient Resistivity
สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ	Temperature Coefficient Offset
สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ	Temperature Coefficient Sensitivity
สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสฟิฟตามยาว	Longitudinal Piezoresistive Coefficient

## รายการศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปตามขวาง	Transverse Piezoresistive Coefficient
แหล่งกำเนิดประจุ	Ion source
แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก	Source magnet
หน่วยเซลล์	Unit cell
หนังเทฟลอน	Teflon
อนาไลเซอร์แมกเนท	Analyzer magnet
อุปกรณ์ตรวจจับความดันจุดภาคเชิงผิว	Surface micromachined pressure sensor
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	Semiconductor device
อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเพียโซรีซิสทีป	Piezoresistive pressure sensor
ออปเจ็คทีป มูฟเอเบิล แอพเพอร์เจอร์	Objective movable aperture
แอกติเวชัน	Activation
อาร์เซนิค	Arsenics
แอกซ์แทรคชัน	Extraction
อาร์คแชมเบอร์	Arc chamber
แอกแทรคชันเพลท	Extraction plate
อินเตอร์สติเลียล	Interstitially
ฮิสเตอร์รีซิส	Hysteresis
แฟกเตอร์ความถูกต้อง	Correction factor

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

นับตั้งแต่มีการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันจุลภาคเชิงผิว (Surface micromachined pressure-sensor) ตัวแรก ในปี ค.ศ. 1950 [1] เป็นต้นมา ทำให้งานวิจัยทางด้านอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคถูกนำเสนอผลงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง และด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor device) และระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค หรือ เมมส์ (Micro-Electro-Mechanical Systems: MEMS) ได้ถูกออกแบบให้อยู่บนวงจรรวม (Integrated Circuit) และปัจจุบันได้มีการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันอยู่ในรูปของวงจรรวมสำหรับการค้าในเชิงพาณิชย์แล้ว โดยมีอัตราการเจริญเติบโตของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ดังตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงการเจริญเติบโตของตลาดเมมส์ทั่วโลกในปี ค.ศ 2002 และ 2007 [2]

ตารางที่ 1.1 การเจริญเติบโตของตลาดเมมส์ทั่วโลก

MEMS device	2002	2007
	Millions of U.S. Dollar	
Micro fluidics	1,404	2,241
Optical MEMS	702	1,826
RF MEMS	39	249
Other actuators	117	415
Inertial sensors	819	1,826
Pressure sensors	546	913
Other sensors	273	830
Total	3,900	8,300

โดยมีการนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค ไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และ อุตสาหกรรมการแพทย์ เป็นต้น

ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันในด้านต่าง เช่น การพัฒนาขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับความดันให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในบริเวณที่จำกัด การเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อความดัน (pressure sensitivity) ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นและการนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง ๆ โดยอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างขึ้นมีวัตถุประสงค์การนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น ความต้องการใช้อุปกรณ์ตรวจจับความดันสำหรับวัดความดันในหลอดเลือดหัวใจ[3-4] การนำไปวัดในระบบความดันภายในล้อรถยนต์ (Tire Pressure Monitor System :TPMS) [5] การนำไปวัดความลึกของระดับบ่อน้ำมัน [6] หรือการนำไปประยุกต์ใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก [7] เป็นต้น จากการประยุกต์ใช้งานที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าอุปกรณ์ตรวจจับความดันได้มีบทบาทต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม แต่ขีดความสามารถในการใช้งานยังมีข้อจำกัดไม่ว่าจะเป็นย่านความดันการใช้งานที่แคบ ไม่สามารถตรวจวัดความดันได้ทั้งความดันสูงและความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ภายในอุปกรณ์ตรวจจับความดันตัวเดียวกันได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันและไมโครโฟน[8-11] เพื่อศึกษาการทำงานและพฤติกรรมของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ก่อนนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดันจริง

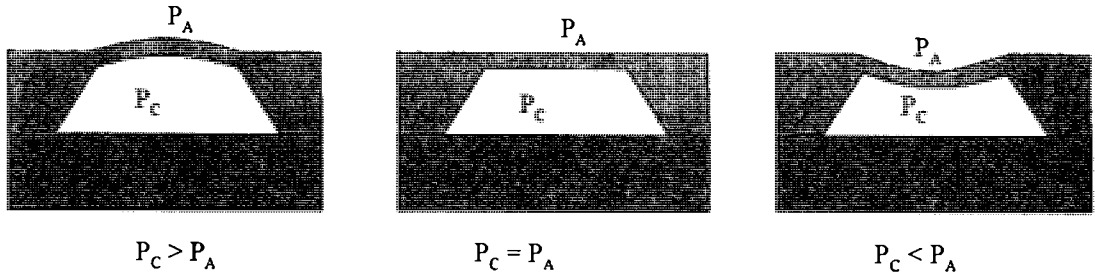
สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive pressure sensor) ที่มีโครงสร้างเชิงผิว โดยมีโพลีซิลิคอน (poly silicon) เป็นไดอะแฟรม (diaphragm) ที่มีขนาดความหนาต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของความไวในการตอบสนองต่อความดัน ซึ่งมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ตรวจจับความดันดังนี้ คือ มีการออกแบบสร้างตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์ (poly resistor) จากฟิล์มโพลีซิลิคอนด้วยเทคนิค LPCVD และทำการเจือสารด้วยกระบวนการยิงฝัประจุ เพื่อให้เป็นตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์[12]โดยออกแบบให้ตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์  $R_{xx}$  อยู่ด้านบนกึ่งกลางของขอบไดอะแฟรม ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นมากที่สุด สำหรับใช้ตรวจจับความดันและเปลี่ยนค่าความต้านทานเมื่อไดอะแฟรมเกิดแอ่นตัวขึ้น-ลง เนื่องจากความดันที่ตกลงบนไดอะแฟรมและสร้างตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์  $R_{xx}$  ให้อยู่ด้านบนของไดอะแฟรม สำหรับเป็นตัวต้านทานอ้างอิงตรวจจับอุณหภูมิ ดังนั้นตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นทั้งที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม ที่สร้างจากวัสดุและเทคนิคการสร้างเดียวกันย่อมมีการเปลี่ยนอุณหภูมิที่เท่ากัน อีกทั้งโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกันย่อมมีความไวในการตอบสนองต่อความดันที่ต่างกัน ซึ่งการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงย่อมมีผลกระทบต่อการทำงาน โดยหลักการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่ออุปกรณ์ตรวจจับความดันสามารถพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ (Temperature Coefficient Resistivity: TCR) มีค่าเป็นบวก หมายถึง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างเชิงเส้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีปริมาณการเติมอะตอมสารเจือแบบดีเจนเนอเรต โดยในทางทฤษฎีสำหรับตัวต้านทานโพสิทีฟซีสเตอร์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุเดียวกันและปริมาณสารเจือที่เท่ากัน อีกทั้งมีขนาดที่เท่ากันย่อมมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิที่เท่ากัน ดังนั้นผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิจึงควรมีค่าน้อยซึ่งจะทำให้การชดเชยอุณหภูมิมีประสิทธิภาพดี

2. สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ (Temperature Coefficient Offset :TCO) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่เลื่อนขึ้น-ลง จากค่าเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิใด ๆ เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าเดิมเมื่อนำไปใช้งานจริง โดยค่าออฟเซตที่ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง ผลลัพธ์ของค่าออฟเซตที่อุณหภูมิต่างกันควรมีค่าที่เท่ากันหรือต่างกันน้อยมากเพื่อให้การนำไปใช้งานได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากที่สุด

3. สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ (Temperature Coefficient Sensitivity : TCS) เป็นค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่เกิดจากอิทธิพลของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นค่าความไวแฝงที่เกิดจากอุณหภูมิ ไม่ใช่ความไวในการตอบสนองที่เกิดจากความดันเพียงอย่างเดียว ซึ่งในทางปฏิบัติความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิควรมีค่าเท่ากันตลอดย่านความดันและอุณหภูมิที่ใช้

เพื่อให้ย่านความดันในการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันครอบคลุมมากยิ่งขึ้นไม่เพียงต่อการตอบสนองที่ความดันสูงเพียงอย่างเดียว การใช้งานในช่วงความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ นับเป็นย่านความดันที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ซึ่งเป็นสิ่งที่ดีสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สามารถทำงานได้ทั้งสองย่านความดันเพียงในอุปกรณ์ตรวจจับความดันตัวเดียว และเนื่องจากช่อง Cavity ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันถูกซีล (Seal) ให้ภายในเป็นความดันสุญญากาศที่ความดัน 20 มิลลิทอร์ ซึ่งเป็นความดันอ้างอิงที่ใช้ในระหว่างกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน เมื่อในสภาวะความดันปกติไคอะแพรมแอ่นตัวลง เนื่องจากความดันภายในช่อง Cavity มีความดันน้อยกว่าความดันบรรยากาศ ( $P_A > P_C$ ) ดังนั้นการทำให้ไคอะแพรมอยู่ในสภาวะสมดุล ( $P_A = P_C$ ) จึงต้องใช้ปั๊มสุญญากาศดูดให้ความดันภายในแชมเบอร์ด้านนอกของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ให้เป็นความดันที่น้อยกว่าความดันภายในช่อง cavity ( $P_A < P_C$ ) ดังรูปที่ 1.1 เป็นการแอ่นตัวของไคอะแพรมที่มีเงื่อนไขความดันต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัติการยึดตัวของโพสิซีลิกอน ที่นำมาสร้างเป็นไคอะแพรมของอุปกรณ์ตรวจจับความดันจึงสามารถวัดความดันสูงและความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศได้



รูปที่ 1.1 การแอ่นตัวของไดอะแฟรมที่เงื่อนไขความดันต่าง ๆ [13]

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและพัฒนาสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซิสทีฟ ที่มีโครงสร้างแบบเชิงคมีพื้นที่โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด 100 x 100 ตารางไมครอน โดยมุ่งเน้นศึกษาและวิจัยความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม ที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อความดัน ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างขึ้นมีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอนซึ่งสร้างอยู่บนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นโดยมีช่อง Cavity หนา 1.4 ไมครอน โดยการทดสอบได้นำอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างเสร็จต่อเป็นวงจรวิศวะโทนบริดจ์แบบฮาร์ท์ฟบริดจ์ สำหรับการชดเชยอุณหภูมิและนำผลการทดลองมาวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อแสดงคุณลักษณะเฉพาะการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยทดสอบย่านความดันสูงและที่ย่านความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อให้การนำไปใช้งานได้หลากหลายและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับความดันเพียงตัวเดียว

โดยสรุปแล้ววิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

1. เพื่อศึกษาความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ
2. เพื่อศึกษาย่านความดันสำหรับการนำไปใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ที่มีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่ความหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน สำหรับการนำไปใช้งานจริง

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม ที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อความดันซึ่งในทางทฤษฎี ไดอะแฟรมที่ความหนาลดลงจะมีความไวในการตอบสนองที่

สูง และโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเชิงผิวที่มีช่องCavity สำหรับเป็นพื้นที่ว่างให้การเคลื่อนไหวของไดอะแฟรมที่สามารถแอ่นตัวขึ้น-ลงได้อย่างเชิงกล ตามแรงกดของความดันที่มากระทำกับไดอะแฟรม ซึ่งคุณสมบัติเช่นนี้ อุปกรณ์ตรวจจับความดันจึงสามารถวัดความดันที่สูงและความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศได้ภายในอุปกรณ์ตรวจจับความดันตัวเดียว

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีป ที่ใช้หลักการเปลี่ยนค่าความต้านทานเมื่อมีความดันกดบน โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีการแอ่นตัวขึ้น-ลงได้อย่างเชิงกล โดยบริเวณที่เกิดการกระจัดหรือแอ่นตัวมากที่สุด (maximum displacement) จะอยู่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของไดอะแฟรม และเกิดความเค้นมากที่สุด (maximum stress) บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของขอบไดอะแฟรมทั้งสองด้าน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม ที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยในทางทฤษฎีการเพิ่มความไวในการตอบสนองจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างที่ออกแบบในแต่ละส่วน ซึ่งประกอบด้วย การเพิ่มพื้นที่ของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมให้มากขึ้น[14-15] การลดความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม [15] การสร้างความหนาของชั้นฉนวนที่ชั้นระหว่างโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมกับโพลีรีซิสเตอร์ ให้มีขนาดความหนาที่เหมาะสม [3] และการออกแบบสร้างโพลีรีซิสเตอร์ให้มีมากกว่าหนึ่งตัวบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม [6] เป็นต้น แต่การเพิ่มในส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันย่อมมีผลดีและผลเสียต่างกัน เช่นการเพิ่มพื้นที่ของไดอะแฟรมจะทำให้อุปกรณ์ตรวจจับความดันมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ส่วนความหนาของชั้นออกไซด์ที่กั้นระหว่างโพลีซิลิคอนกับโพลีรีซิสเตอร์จะต้องมีความหนาที่เหมาะสม ซึ่งถ้ามีขนาดที่หนามากจะทำให้ความไวในการตอบสนองลดน้อยลง และถ้าบางมากจะทำให้เกิดปัญหาในระหว่างกระบวนการยิงฝังประจุสำหรับเป็นหน้าฉากป้องกันโพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมหรือเกิดสัญญาณรบกวนและความไวต่อการตอบสนองไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมจะเห็นว่าความหนาของไดอะแฟรมมีผลต่อความไวในการตอบสนอง แต่ไม่มีผลต่อขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่ทำให้มีความไวในการตอบสนองที่สูงขึ้นดังสมการที่ 1.1 ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่มีความสัมพันธ์กับค่าเกจแฟคเตอร์ (GF) ความเครียด ( $\epsilon$ ) ความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม ( $h$ ) [16] กับรัศมีของไดอะแฟรม ( $a$ )

$$\frac{\Delta R}{R_0} = GF \cdot \epsilon \left( \frac{a}{h} \right)^2 \quad (1.1)$$

เมื่อ  $a/h \gg 1$  จะทำให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันมีค่าสูงขึ้น

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาในงานวิจัยนี้มีขอบเขตงานวิจัย เพื่อศึกษาความหนาของโพลีซิติคอนไดอะแฟรมที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ย่านความดัน (Pressure rang) ในการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันในแต่ละขนาดความหนา ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) และการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1.5.1 การศึกษาความหนาของโพลีซิติคอนไดอะแฟรมที่มีผลต่อความไวในการตอบสนอง

ความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับความดันนับเป็นสิ่งที่ต้องการในงานวิจัยนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับความดันให้มากยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้สร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันให้มีพื้นที่ของโพลีซิติคอนไดอะแฟรมขนาด 100 x 100 ตารางไมครอนและมีไดอะแฟรมหนาต่างกัน 3 ค่า คือความหนา 0.4 ไมครอน 0.8 ไมครอน และ 1.5 ไมครอน โดยใช้เงื่อนไขในการทดลองที่ความดันตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 15 บาร์โดยนำผลการทดลองในแต่ละความหนามาเปรียบเทียบความไวในการตอบสนองต่อความดันตามย่านความดันที่ใช้งาน

### 1.5.2 การศึกษาย่านความดันในการใช้งานและความเป็นเชิงเส้น ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ความดันนับเป็นตัวแปรที่สำคัญในการนำไปใช้งานในด้านการแพทย์ สำหรับการตรวจจับความดันในหลอดเลือดหัวใจระหว่างการใส่บอลูนในการวิเคราะห์การอุดตันของเส้นเลือด การนำไปใช้ในการวัดความดันลือดรถยนต์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะการขับขี่รถยนต์ลดจนความปลอดภัยสำหรับการใช้รถยนต์บนถนนให้มากยิ่งขึ้นหรือการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิเช่น การทดสอบอัตราการรั่วซึมของระบบท่อน้ำ เพื่อตรวจสอบผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปใช้งานและการตรวจสอบการอุดตันของเครื่องกรองอากาศ ซึ่งเป็นการลดภาระการทำงานของเครื่องกรองอากาศได้ จากลักษณะงานที่ได้กล่าวมานี้ อุปกรณ์ตรวจจับความดันมีย่านความดันการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งย่านการทำงานตามลักษณะความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับความดันภายในล้อรถยนต์ในระบบ TPMS หรือ งานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ใช้ย่านความดันเดียวกัน ซึ่งย่านความดันที่ใช้ในรถยนต์ 4 ล้อใช้ย่านความดันตั้งแต่ 1 ถึง 6 บาร์และความดันรถบรรทุก 10 ล้อใช้ย่านความดัน 1 ถึง 13 บาร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทดสอบที่ความดันตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 15 บาร์ เพื่อให้ครอบคลุมกับการนำไปใช้ในระบบ TPMS ทั้งรถยนต์ 4 ล้อและรถบรรทุก 10 ล้อ อีกทั้งสามารถนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ใช้ย่านความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

### 1.5.3 การศึกษาผลของการชดเชยอุณหภูมิ

เทคนิคการชดเชยอุณหภูมิ (Compensation) ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซิสทีปที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการชดเชยอุณหภูมิ ด้วยการต่ออุปกรณ์ตรวจจับความดันให้เป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์ (Half Bridge circuit) ที่มีเงื่อนไขในการทดลองที่ช่วงความดันตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ถึง 15 บาร์ ที่อุณหภูมิตั้งแต่  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $120^{\circ}\text{C}$  และวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ได้จากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้มี 3 ประการ ดังนี้

1. การสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพสิซีลิกอนไดอะแฟรมขนาดต่างกัน ทำให้ได้อุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีความไวในการตอบสนองต่อความดันและย่านความดันสำหรับการใช้งานที่ต่างกัน จึงสามารถนำไปใช้กับงานที่หลากหลายและมีประสิทธิภาพต่อการนำไปใช้งาน
2. ศึกษาการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ซึ่งทำให้ได้ค่าผลลัพธ์จากการชดเชยอุณหภูมิมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และสามารถนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน เพื่อนำไปประกอบกับการนำไปใช้งานได้ดียิ่งขึ้น
3. เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับความดันต่อไปในอนาคต

### 1.7 รายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งรายละเอียดของเนื้อหาออกเป็น 7 บทซึ่งในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำที่กล่าวถึงงานวิจัยของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคตัวแรกที่เริ่มมีการสร้างขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 จนถึงปัจจุบันที่มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกตีพิมพ์มากมายตลอดจนการผลิตเพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งได้มีการพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดันให้มีขนาดที่เล็กลง เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน การเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อความดันเพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาความหนาของโพสิซีลิกอนไดอะแฟรมที่มีผลต่อความไวในการตอบสนอง อีกทั้งการศึกษาศักยภาพของค่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าที่แท้จริง หลังจากนั้นได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย การดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย และสุดท้ายจะกล่าวถึงส่วนของเนื้อหาทั้งหมดเพื่อให้ผู้อ่านได้ทราบถึงขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งได้กล่าวถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค รวมทั้งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค สัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีฟตามยาวและสัมประสิทธิ์ตามขวาง ตำแหน่งการวางตัวด้านทาน ความเครียด ความเค้นและการแอ่นตัวของโพลีซิลิคอน ไดอะแฟรม การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคแบบเปียโซรีซิสทีฟ Cavity ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ฟิล์มโพลีซิลิคอน โครงสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอน กระบวนการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน กระบวนการสร้างตัวด้านทานเปียโซรีซิสทีฟชนิดยิงฝิ่งประจุ กระบวนการยิงฝิ่งประจุ การยิงฝิ่งประจุ เทคนิคการแอนนิลหลังการยิงฝิ่งประจุ วงจรวีทสโตนบริดจ์ วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์ วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์ วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฟลูบริดจ์ ความไวในการตอบสนอง การหาค่าความเป็นเชิงเส้น ซีสเคอร์รี่ซิส สัมประสิทธิ์ค่าออฟเซตของอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดัน เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องโฟร์พอยโทรอป ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันสูง ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย การออกแบบตัวด้านทานโพลีรีซิสเตอร์ การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ ลำดับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน และขั้นตอนการ Packages บนแผ่น PCB ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการทดลองและผลการทดลองของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ เพื่อแสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ได้จากการทดลอง อาทิเช่น การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีผลต่อพฤติกรรมการทำงานด้วย SEM การวิเคราะห์ความไวในการตอบสนองต่อความดัน ความเป็นเชิงเส้น ย่านความดันในการใช้งาน และสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ในการชดเชยอุณหภูมิ

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะในงานวิจัยทั้งหมด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในงานวิจัยและการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันในอนาคต

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์

หลักการทำงานทั่วไปของเซนเซอร์ คือ มีหน้าที่ในการตรวจจับและเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ที่วัดได้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด อาทิเช่น สนามแม่เหล็ก ความร้อน ความดันและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น การทำงานของเซนเซอร์มีส่วนช่วยให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้เปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันเบี่ยงโซลิดสเตตจะทำหน้าที่ตรวจจับรับรู้การแอ่นตัวขึ้น-ลงอย่างเชิงกลของไดอะแฟรมให้เป็นค่าความต้านทาน ซึ่งเกิดจากความเค้นและความเครียดภายในโพลีสไตรออร์ที่อยู่ด้านบนของไดอะแฟรม [17] โดยเซนเซอร์ทั่วไปมีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์ที่เปลี่ยนปริมาณทางฟิสิกส์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

### 2.2 อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค

อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค เป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เชิงกลซึ่งใช้เทคโนโลยีการสร้างเช่นเดียวกับวงจรรวมในระดับไมโครเมตร ด้วยความสามารถในการทำงานและมีขนาดเล็ก จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในบริเวณที่ขนาดเล็กทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการแพทย์และอุตสาหกรรมรถยนต์ ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและความต้องการนำไปใช้งานจึงได้มีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง การเพิ่มย่านการทำงานและความไวในการตอบสนองต่อความดันให้สูงมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในด้านต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการผลิตในเชิงพาณิชย์แล้ว

## 2.2.1 ประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค

โดยทั่วไปอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคที่นิยมใช้งานในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิดแต่ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอหลักการทำงานอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือชนิดที่ใช้หลักการพื้นฐานของเปียโซเรซิสทีฟ (Piezoresistive) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขณะที่มีการแอ่นตัวขึ้น-ลงของไดอะแฟรมเมื่อได้รับความดัน ชนิดที่สองใช้หลักการพื้นฐานของคาปาซิทีฟ (Capacitive) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของตัวเก็บประจุขณะที่มีการแอ่นตัวของไดอะแฟรมเมื่อได้รับความดัน และชนิดที่สามใช้หลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic) ซึ่งทั้งสามชนิดมีลักษณะคุณสมบัติที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2.1 [18]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติข้อดีและข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบ เปียโซเรซิสทีฟ คาปาซิทีฟ และแม่เหล็กไฟฟ้า

Piezoresistive	Capacitive	Electromagnetic
Simple fabrication	Simple mechanical structure	Structural complexity varies
Low cost	Low cost	Complex packaging
Voltage or current driver	Voltage driver	Current driver
Simple measurement circuit	Requires electronic circuit	Simple control circuits
Low-output impedance	Susceptible to EMI	Susceptible to EMI
High – temperature dependence	Low– temperature dependence	Low– temperature dependence
Small sensitivity	Large dynamic range	Sensitivity $\propto$ magnetic field
Insensitive to parasitic resistance	Sensitive to parasitic capacitance	Insensitive to parasitic inductance
Open loop	Open or closed loop	Open or closed loop
Medium power consumption	Low power consumption	Medium power consumption

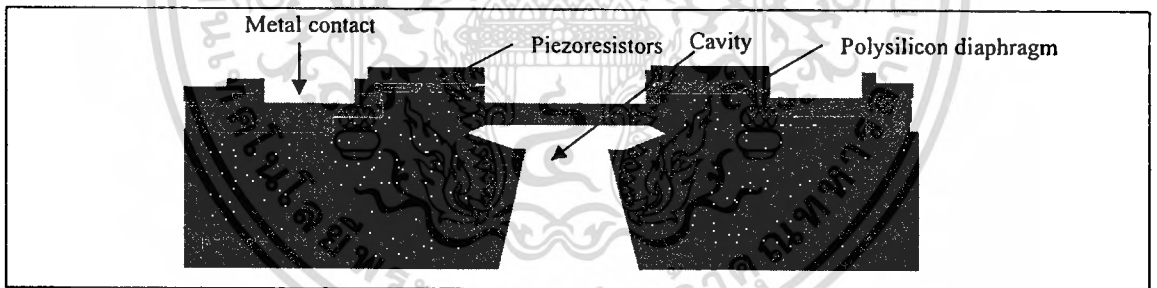
## 2.2.2 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค

เมื่อพิจารณาเทคโนโลยีในการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันในปัจจุบันจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือโครงสร้างแบบบัลค์ ( bulk ) [19-20] ซึ่งอาศัยการกัดเปิดช่อง Cavity บริเวณด้านหลังของแผ่นฐานรอง ( Substrate ) ด้วยวิธีการกัดแบบเปียก ( Wet etching ) ด้วยสารเคมี KOH และ TMAH และโครงสร้างแบบเชิงผิว ( Surface ) [21-22] จะใช้วิธีการกัดเปิดช่อง Cavity ที่หน้าแผ่นโดยอาศัยการกัดเปิดรูและทำการกัดด้วยสารเคมีหลังจากนั้นสร้างชั้นต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์

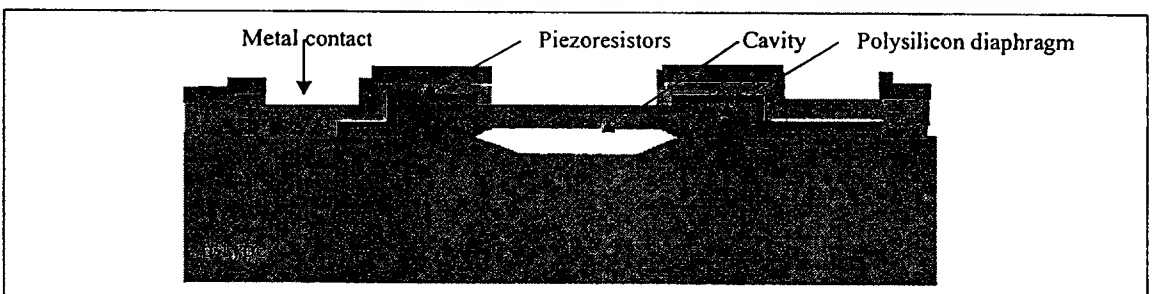
ตรวจจับความดันดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของโครงสร้างทั้งสองชนิด สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับความดันเฉพาะหลักการพื้นฐานทางด้านเปียโซรีซิสทีปที่มีโครงสร้างแบบเชิงผิวเนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและสอดคล้องกับเทคโนโลยีของ TMEC

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการสร้างแบบเชิงผิวและแบบบัลก์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค [23]

Parameter	Surface	Bulk
Mechanical properties	Good	Superior
Cost : Low volume	Fair	Good
Cost : High volume	Good	Fair
Dimensional control	Better	Good
CMOS integration	Good	Fair
Packaging	Fair	Fair
Size	Smaller	small



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ตรวจจับความดันเปียโซรีซิสทีปที่มีโครงสร้างแบบบัลก์



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ตรวจจับความดันเปียโซรีซิสทีปที่มีโครงสร้างแบบเชิงผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟตามยาวและสัมประสิทธิ์ตามขวาง [24]

เมื่อมีแรงใด ๆ มากระทำกับวัสดุแล้วทำให้วัสดุนั้นมีความเค้นเกิดขึ้น พบว่าสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) และความเค้น ( $\sigma$ ) ดังสมการที่ 2.1

$$\vec{E} = \rho J + \pi \rho J \sigma \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ พิกัดความต้านทาน

$\pi$  คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่เพนเซอร์

สำหรับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางใด ๆ ในโครงผลึก เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.1 จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E} = \rho_0 J_1 + \pi_1 \rho_0 J_1 \sigma_1 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\rho_0$  คือ พิกัดความต้านทานเริ่มต้นและ  $\pi_1$  คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ตามยาว (Longitudinal Piezoresistive Coefficient) และจากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับสภาพความต้านทานและความหนาแน่นของกระแสดังสมการที่ 2.3

$$\vec{E} = \rho J \quad (2.3)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.3 ลงในสมการที่ 2.2 จะได้ว่า

$$\rho_1 J_1 = \rho_0 J_1 + \pi_1 \rho_0 J_1 \sigma_1 \quad (2.4)$$

หรือ

$$\rho_1 = \rho_0 + \pi_1 \rho_0 \sigma_1 \quad (2.5)$$

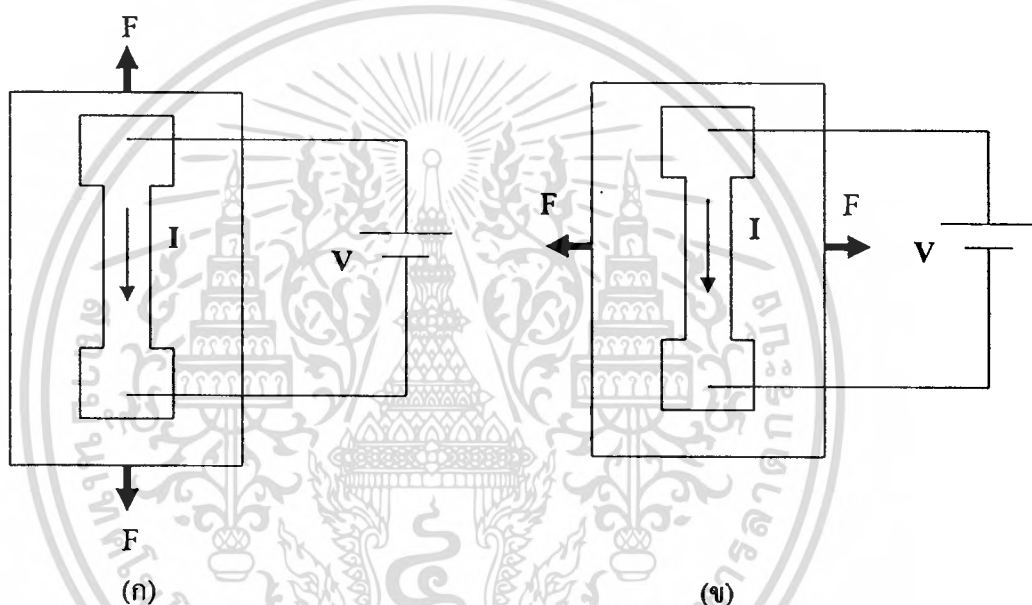
$$\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} = \pi_1 \sigma_1 \quad (2.6)$$

$$\left( \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right)_1 = \pi_1 \sigma_1 \quad (2.7)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อกำหนดให้  $\pi_t$  คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ตามขวาง (Transverse Piezoresistive Coefficient) ดังนั้นจากสมการที่ 2.2 ถึง 2.7 จะได้ว่า

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)_i = \pi_i \sigma_i \tag{2.8}$$

จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 พบว่าทั้งสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ไปตามยาวและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ฟตามขวาง เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุแล้วทำให้เกิดความเค้นขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กับอัตรา การเปลี่ยนแปลงของสภาพความต้านทานในวัสดุ ซึ่งขึ้นกับทิศทางของแรงที่มากระทำกับไดอะแฟรม โดยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ไปตามยาวนี้จะเกิดขึ้น เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุดังรูปที่ 2.4 (ก) และ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ฟตามขวางจะเกิดเมื่อมีแรงตามขวางมากระทำกับวัสดุดังรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุที่ประกอบด้วย (ก) แรงดึงตามยาว (ข) แรงดึงตามขวาง และสามารถหาความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนค่าความต้านทาน ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในแนวขนานและตั้งฉากบริเวณสี่ด้านของไดอะแฟรมตามลำดับ

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_L = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \tag{2.9}$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_P = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \tag{2.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจาก โพลีรีซิสเตอร์ถูกสร้างจาก โพลีซิลิคอนที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธี LPCVD จะมีลักษณะไม่เป็นผลึกเดี่ยว แต่จะเป็นผลึกแบบหลายรูป ซึ่งมีทั้งระนาบ (100) และระนาบ (111) ดังนั้น สำหรับกรณีที่เป็นผลึกแบบ Polycrystalline การคำนวณหาอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสามารถใช้สมการ 2.11 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับค่าเกจแฟกเตอร์ (Gauge Factor :GF) ความเครียด (Strain :  $\varepsilon$ ) ที่เกิดขึ้น และค่าของยัง โมดูลัส (Young's modulus:Y) [25]

$$\frac{\Delta R}{R_0} = GF \cdot \varepsilon \quad (2.11)$$

เมื่อ 
$$\varepsilon = \frac{6(l_p - l_{p_x})P}{Wl^2Y} \quad (2.12)$$

โดยที่ W คือ ความกว้างของโพลีรีซิสเตอร์,  $l_p$  คือ ความยาวของโพลีรีซิสเตอร์,  $l_x$  คือ การยืดออกของโพลีรีซิสเตอร์ที่ตำแหน่งใด ๆ ส่วน  $l$  คือ ความหนาของโพลีรีซิสเตอร์และ P คือความดัน

## 2.4 ตำแหน่งการวางตัวต้านทาน

เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรมแล้ว ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัวลงทำให้เกิดความเค้นขึ้นในตัวต้านทาน ซึ่งประกอบด้วยความเค้นตามความยาว ( $\sigma_x$ ) และความเค้นตามขวาง ( $\sigma_y$ ) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.13

$$\sigma_{(x,y)} = \bar{\sigma}_{(x,y)} \left[ \frac{a}{h} \right]^2 P \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\sigma_{(x,y)}$  คือ ตำแหน่งความเค้นบนไดอะแฟรม

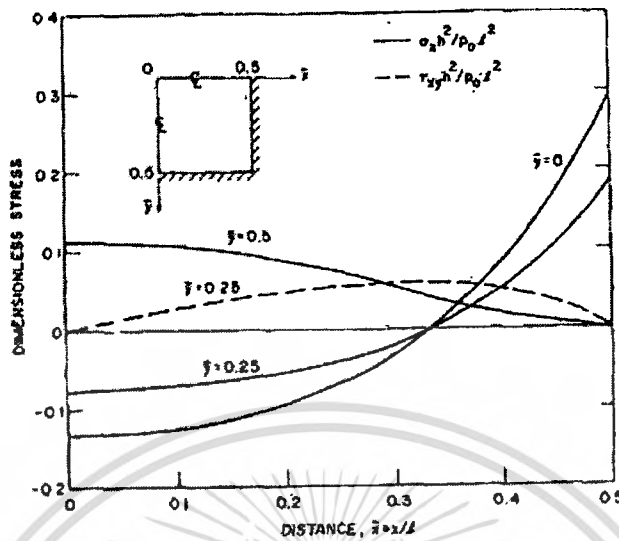
$\bar{\sigma}_{(x,y)}$  คือ ความเค้น ไดเมนชันเลส (Dimensionless Stress)

$a$  คือ รัศมีของไดอะแฟรม

$h$  คือ ความหนาของไดอะแฟรม

$P$  คือ ความดันที่ให้กับไดอะแฟรม

จากสมการที่ 2.13 จะเห็นว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของไดอะแฟรม ความหนาของไดอะแฟรม และความดันที่ป้อนให้กับไดอะแฟรมแล้วยังขึ้นอยู่กับความเค้น ไดเมนชันเลสเป็นส่วนสำคัญอีกด้วยซึ่งค่าของความเค้น ไดเมนชันเลสนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามตำแหน่งการวางตัวต้านทานบนไดอะแฟรมดังรูปที่ 2.5



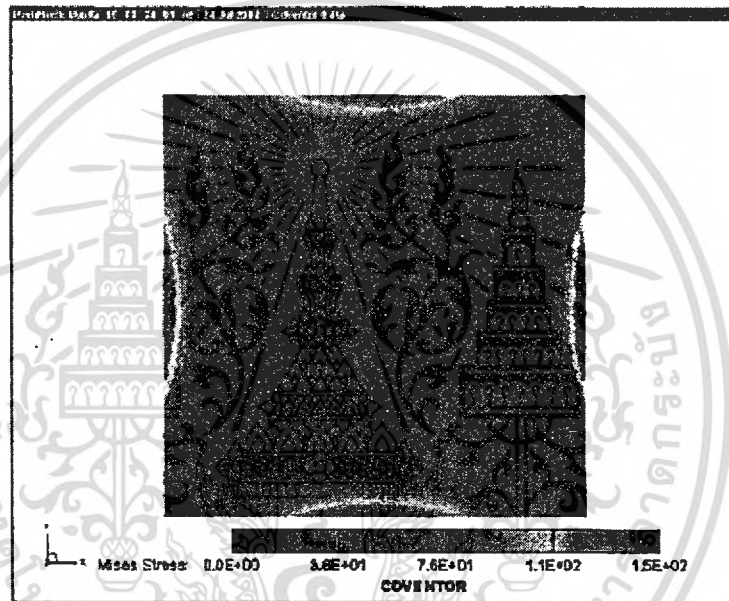
รูปที่ 2.5 การกระจายค่าความเค้นโดเมนชั้นเลสใน 1 คอทเรนที่บริเวณต่าง ๆ กับบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากรูปที่ 2.5 เป็นกราฟแสดงการกระจายค่าความเค้นโดเมนชั้นเลสใน 1 คอทเรนที่บริเวณต่าง ๆ กับด้านบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความเค้นโดเมนชั้นจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของไดอะแฟรมทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นเมื่อป้อนความดันให้กับไดอะแฟรมจะทำให้ความเค้นตามความยาวและความเค้นตามขวางเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยที่ความเค้นตามความยาวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ตำแหน่ง  $\bar{x} = 0, \bar{y} = 0.5$  บนไดอะแฟรมและความเค้นตามขวางที่ตำแหน่ง  $\bar{x} = 0.5, \bar{y} = 0$  บนไดอะแฟรม และเมื่อแทนค่าความเค้นโดเมนชั้นเลสที่ตำแหน่งดังกล่าวลงในสมการที่ 2.13 จะทำให้สามารถคำนวณหาความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวางได้ดังสมการที่ 2.14 และ 2.5 ดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma(0,0.5) \\ &= 0.155 \left[ \frac{l}{h} \right]^2 p \end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma(0.5,0) \\ &= 0.294 \left[ \frac{l}{h} \right]^2 p \end{aligned} \tag{2.15}$$

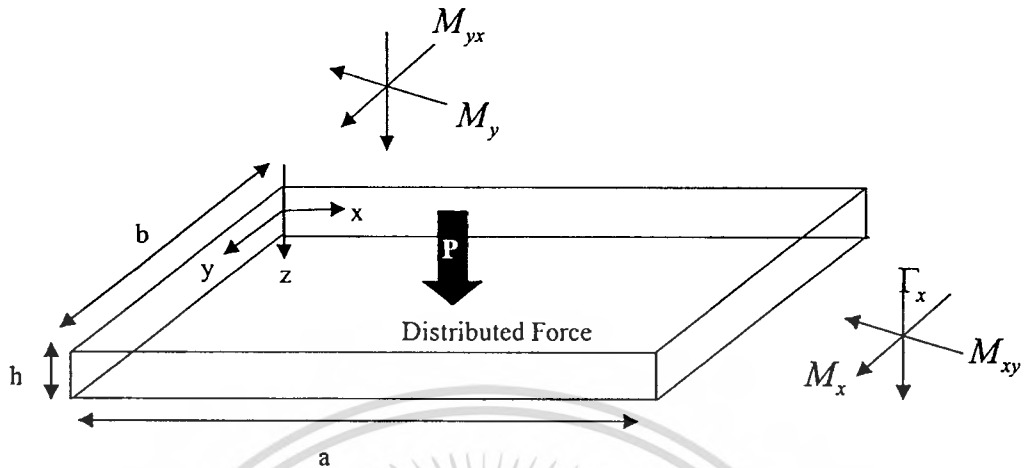
เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรม ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัวลง ทำให้มีความเค้นเกิดขึ้นซึ่งบริเวณตำแหน่งขอบของไดอะแฟรมจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุดดังสมการที่ 2.14 และ 2.15 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบการวางตำแหน่งของตัวด้านทานบนไดอะแฟรม จึงควรออกแบบให้ตัวด้านทานอยู่ชิดขอบไดอะแฟรม เพื่อให้เกิดความเค้นในตัวด้านทานมากที่สุด ใน 1 ควอทแรน ดังนั้นเมื่อพิจารณาครบทั้ง 4 ควอทแรน บริเวณที่เกิดความเค้นในตัวด้านทานมากที่สุด คือ บริเวณกึ่งกลางของขอบไดอะแฟรมดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งการเกิดความเค้นมากที่สุดของไดอะแฟรม [26]

## 2.5 ความเครียด ความเค้นและการแอ่นตัวของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม [15]

ขนาดของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่ใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน สามารถบ่งบอกย่านความดันที่ตรวจจับได้ ค่าความเครียดมากที่สุด และความไวในการตอบสนองตามที่ออกแบบไว้ อาทิเช่น โมเดลแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส หรือเป็นแบบแผ่นเพลท ซึ่งบริเวณขอบทั้งสองถูกหนีกับฐานรอง เมื่อมีแรงดันกดบนไดอะแฟรมทำให้เปลี่ยนรูปร่างเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โคอะแฟรมแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งได้รับความดัน

ภายใต้ความดันที่กดทางด้านบนโคอะแฟรมที่เท่ากันหมดทุกทิศทาง ทำให้โคอะแฟรมเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและแอ่นตัวขึ้น-ลง ทำให้เกิดความเค้นในแนวตั้งฉาก ( normal stress ) นั่นคือ  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  และ  $\sigma_{yz}$  ความเค้นเฉือน ( shear stress ) คือ  $\tau_{xy}$  และ  $\tau_{yx}$  ซึ่งความเค้น  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  และ  $\tau_{yx}$  เป็นผลที่เกิดจากโมเมนต์  $M$  ส่วนความเค้น  $\sigma_x$ , และ  $\sigma_{yz}$  เป็นผลที่เกิดจากแรงเฉือน  $\Gamma$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} z\sigma_x dz, M_y = \int_{-h/2}^{h/2} z\sigma_y dz, M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} z\sigma_{xy} dz$$

$$M_{yx} = \int_{-h/2}^{h/2} z\sigma_{yx} dz, \Gamma_x = \int_{-h/2}^{h/2} z\sigma_x dz, \Gamma_y = \int_{-h/2}^{h/2} z\sigma_y dz \quad (2.16)$$

จากกฎที่สองของนิวตัน (Newton 's second law ) ทำให้แรงและโมเมนต์ทั้งหมดมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.17

$$\Gamma_x = \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y}, \Gamma_y = \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y}, \frac{\partial \Gamma_x}{\partial x} + \frac{\partial \Gamma_y}{\partial y} = -P \quad (2.17)$$

โดยที่  $P$  เป็นแรงหรือความดันที่กดบนโคอะเฟรมที่เท่ากันหมดทุกระนาบ ซึ่งจากสมการที่ 2.17 สมมติให้ฟิล์มโพลีซิลิคอนมีความสมมาตรเท่ากันหมดนั่นคือ  $M_{xy} = M_{yx}$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความดันและโมเมนต์ดังสมการที่ 2.18

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -P \quad (2.18)$$

โดยการแทนสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.18 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวตั้งฉากและความดันดังสมการที่ 2.19

$$\int_{-h/2}^{h/2} z \left( \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} \right) dz = -P \quad (2.19)$$

จากกฎของคอร็ชอฟ (kirchoff) ซึ่งสมมติให้  $\gamma_x \equiv 0$  และ  $\gamma_y \equiv 0$  ซึ่งทำให้ความเครียดสามารถนำมาเขียนในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{vmatrix} = -z \begin{vmatrix} \partial^2 u / \partial x^2 \\ \partial^2 u / \partial y^2 \\ \partial^2 u / \partial x \partial y \end{vmatrix} \quad (2.20)$$

โดยสมมติให้โพลีซิลิคอนมีความยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นและมีผลกระทบในทิศทางในแนวแกน  $z$  เพียงเล็กน้อยและจากสมการที่ 2.20 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{vmatrix} = \frac{1}{Y} \begin{vmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{vmatrix} \quad (2.21)$$

โดยที่  $\nu$  เป็นอัตราส่วนปัวซองของของวัสดุที่นำมาสร้างเป็นโคอะเฟรม และแทนสมการที่ 2.20 ลงในสมการที่ 2.21 และสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.22

$$\begin{vmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{vmatrix} = \frac{Yz}{1-\nu^2} \begin{vmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \partial^2 u / \partial x^2 \\ \partial^2 u / \partial y^2 \\ \partial^2 u / \partial x \partial y \end{vmatrix} \quad (2.22)$$

ซึ่งความหนาแน่นของความดันที่มากระทำกับไดอะแฟรม จะมีความเกี่ยวข้องกับการแอ่นตัวขึ้น-ลงของไดอะแฟรม โดยการแทนสมการที่ 2.22 ลงในสมการที่ 2.19 จะได้

$$\int_{-h/2}^{h/2} \frac{Yz^2}{1-\nu^2} dz \left( \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \right) = P \quad (2.23)$$

หรือ

$$\left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right) u = \frac{P}{D_M} \quad (2.24)$$

โดย  $D_M$  เป็นแรงบิดของโมเมนต์

$$D_M = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{Yz^2}{1-\nu^2} dz \quad (2.25)$$

$$D_M = \frac{Yh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.24 สามารถนำไปใช้หาการแอ่นตัว ขึ้น - ลง ของไดอะแฟรมและสามารถหาค่าความเค้นภายในไดอะแฟรมจากสมการที่ 2.22 หรือ ความเครียดในสมการที่ 2.21 แต่อย่างไรก็ตามสมการที่ 2.24 ซึ่งประกอบด้วยสมการของ PDE ดังนั้นต้องใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อหาการบิดตัว ความเค้นและความเครียดคนไดอะแฟรม สำหรับไดอะแฟรมสี่เหลี่ยมจัตุรัสการบิดแบบแอ่นตัวขึ้น-ลงอย่างเชิงกลจะมีความสัมพันธ์กับความดัน นั่นคือ [27]

$$\Delta P = \frac{Yh^3}{(1-\nu^2)a^4} \left[ 4.20 \frac{u}{h} + 1.58 \frac{u^3}{h^3} \right] \quad (2.27)$$

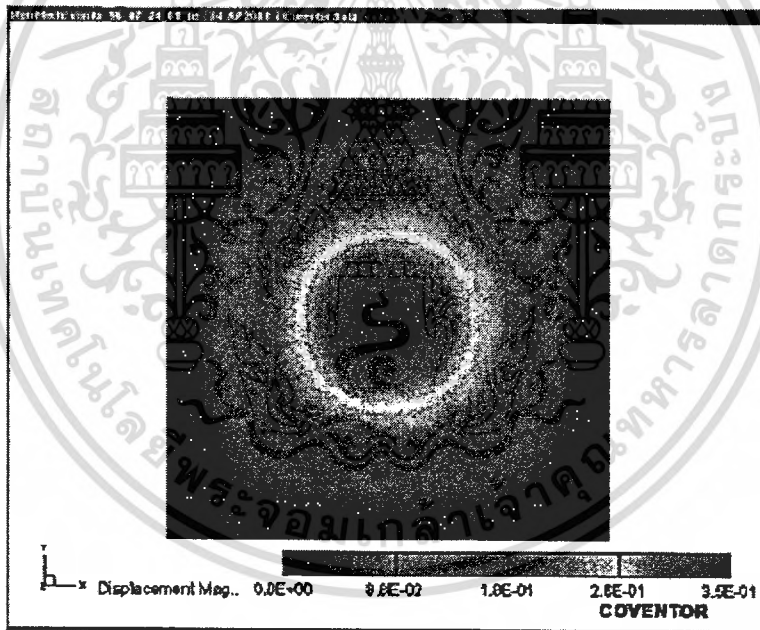
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $a$  เป็นรัศมีของไดอะแฟรม  $u$  เป็นการแอ่นตัวของไดอะแฟรมซึ่งปรกติการแอ่นตัวขึ้น-ลงอย่างเชิงกลจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางของไดอะแฟรมแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยมีความเป็นเชิงเส้น 0.3 % ใน 1 ควาทแรนของความหนาไดอะแฟรม [27-28]

$$u_{Max} = \frac{Pa^4(1-\nu^2)}{4.2Yh^3} \quad (2.28)$$

เมื่อแทนค่ามอดูลัสของยังและค่าปัวซองของวัสดุสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

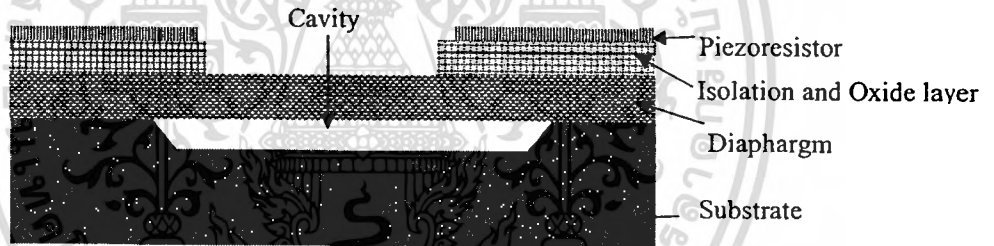
$$u_{Max} = \frac{2.857Pa^4}{D_M} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งการแอ่นตัวลงของไดอะแฟรมเมื่อได้รับความดัน [26]

## 2.6 การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคแบบเปียโซรีซิสทีป

สำหรับปัจจัยในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคแบบเปียโซรีซิสทีปต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน เพื่อให้ได้อุปกรณ์ตรวจจับความดันตรงกับการทำงานมากที่สุด โดยพิจารณาทั้งขนาด ความไวในการตอบสนอง ลักษณะตำแหน่งและสภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้งาน สำหรับในงานวิจัยนี้จะเน้นการนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันไปใช้ในการวัดความดันภายในล้อยนต์ ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบให้มีขนาดเล็กและให้มีความไวในการตอบสนองความดันที่สูงและมีย่านการทำงานที่ความดันที่กว้าง โดยการออกแบบจะต้องคำนึงถึงโครงสร้างในแต่ละส่วนของการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ซึ่งหลักการออกแบบที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้มีบางกรณีเป็นผลที่ได้จากโมเดลการจำลองการทำงาน ซึ่งไม่ใช่ผลจากการสร้างจริงทั้งหมดดังนั้นต้องพิจารณาจากตามหลักความเป็นจริง เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างที่มีเงื่อนไขเฉพาะในแต่ละขั้นตอนที่ใช้สร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน สำหรับการพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันเพื่อให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันที่สูงสามารถพิจารณาจากองค์ประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.9



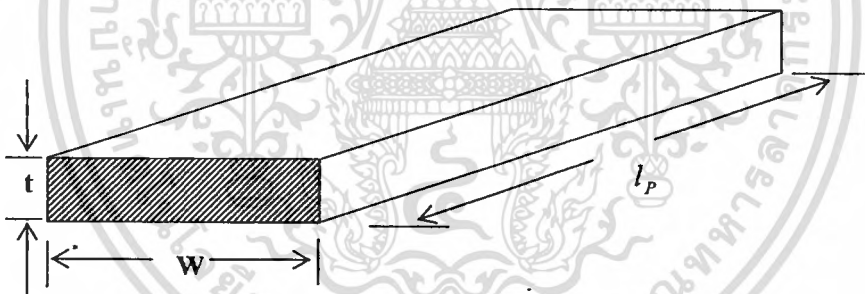
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโครงสร้างเชิงผิว

จากภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยพิจารณาด้านบนสุดเป็นเปียโซรีซิสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานที่เกิดจากการยิงฝั่งประจุหรือการแพร่สารเจือทำให้มีสภาพการนำทางไฟฟ้า และเมื่อมีความดันกดด้านบนของ ไดอะแฟรม ทำให้เกิดความเครียดและความเค้นในเปียโซรีซิสเตอร์ ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเกิดขึ้น โดยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับขนาดความยาว ความกว้างและความหนาของตัวต้านทานโพสิทีฟซิสเตอร์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป ซึ่งค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปแสดงถึงความไวในการตอบสนองต่อความดัน ที่มีความสัมพันธ์กับชั้นฉนวนที่ชั้นระหว่างชั้น โพสิทีฟซิสเตอร์กับด้านบนของไดอะแฟรม รวมถึงขนาดของพื้นที่ที่ไดอะแฟรม ความหนาของไดอะแฟรมและความลึกของ Cavity ที่อยู่ด้านล่างของไดอะแฟรม โดยพิจารณาในแต่ละชั้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีผลต่อความไวต่อการตอบสนองดังนี้

### 2.6.1 ตัวต้านทานโพลีซิลิไซด์

ตัวต้านทานที่ถูกสร้างอยู่บนวงจรรวมหรือในเซนเซอร์ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ ตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ (diffused resistor) ตัวต้านทานชนิดพินช์ (pinched-resistor) ตัวต้านทานชนิดอพิแทกซ์เซียล (epitaxial resistor) และ ตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุ (ion-implanted resistor) โดยตัวต้านทานทั้งสามชนิดแรกได้กล่าวไว้ในงานวิจัย [24] แล้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงกล่าวถึงตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุที่ใช้ในงานเท่าวิจัยนี้เท่านั้น สำหรับตัวต้านทานในสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นแบบโมนอลิธิค (monolithic resistor) ส่วนความต้านทานสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการนำไปวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเรามักเรียกว่า ความต้านทานเชิงแผ่น (sheet-resistance) โดยพิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำที่มีค่าการกระจายความต้านทานอย่างสม่ำเสมอที่ระยะความยาว  $l_p$  กว้าง  $w$  และ ความหนา  $t$  แสดงในรูปที่ 2.10 โดยความต้านทานรวมสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.30

$$R = \frac{\rho l_p}{t w} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.10 โครงสร้างในการคำนวณหา Sheet Resistance

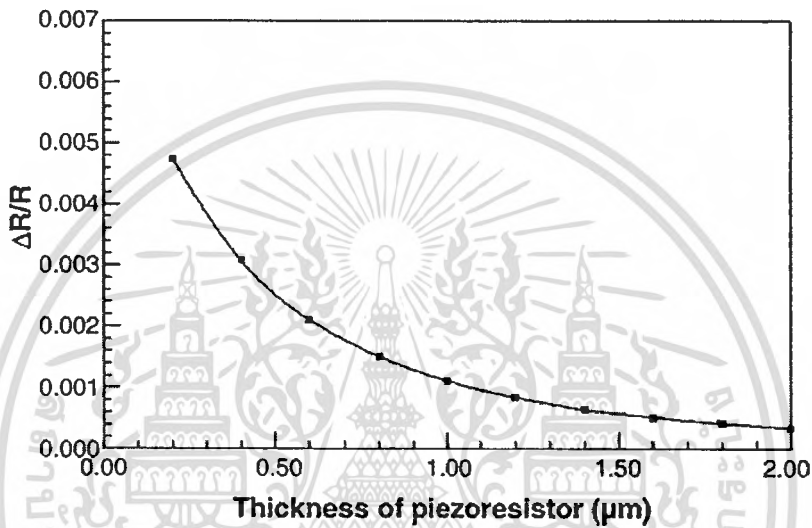
โดยที่  $\rho$  (ohm-cm) คือ สภาพความต้านทาน (resistivity) ของวัสดุ เพื่อความสะดวกได้ทำการกำหนดตัวแปร  $R_s$  (ohm/ $\square$ ) ซึ่งเรียกว่า ความต้านทานเชิงแผ่น (ohm/ $\square$ ) ซึ่งมีสมการ 2.31 ดังนี้คือ

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (2.31)$$

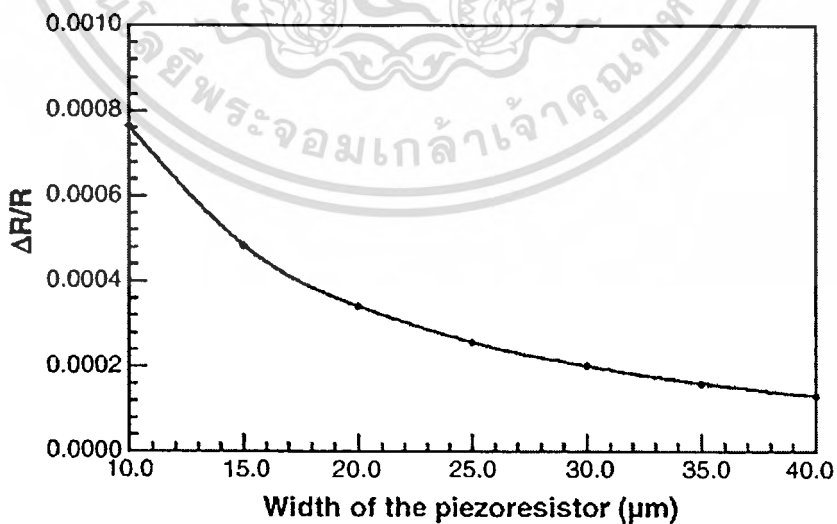
หน่วยของ ความต้านทานเชิงแผ่น คือ ohms ต่อ square ( $\Omega/\square$ ) ซึ่งกำหนดให้ความต้านทานรวมเท่ากับ ความต้านทานเชิงแผ่น เมื่อค่า  $w$  เท่ากับ  $l_p$  ดังนั้นค่าความต้านทานรวมมีความสัมพันธ์กับความต้านทานเชิงแผ่นดังสมการ 2.32

$$R = R_s \frac{l_p}{W} \quad (2.32)$$

จากที่กล่าวมาในตอนต้นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานและความไวในการตอบสนองที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของตัวต้านทาน ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ขนาดความหนา ความกว้าง และความยาวดังรูปที่ 2.11, 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ [29]

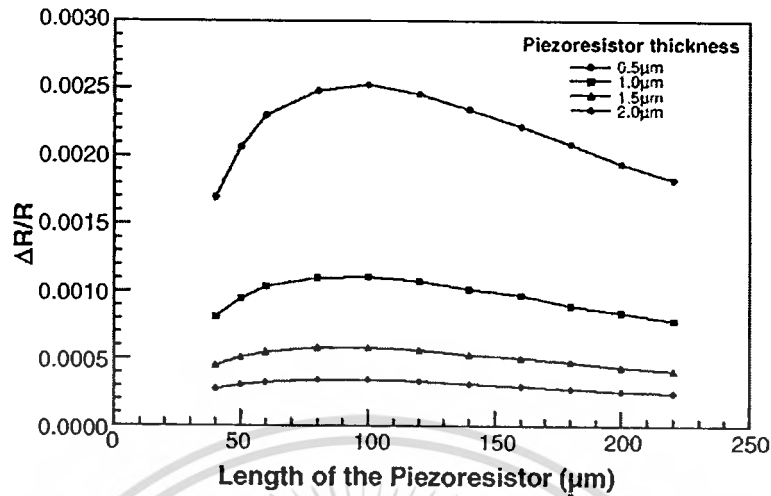


รูปที่ 2.11 ผลของความหนาของตัวต้านทานเพียโซรีซิสเตอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน



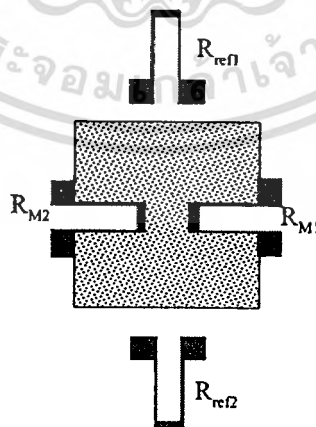
รูปที่ 2.12 ผลของความกว้างของตัวต้านทานเพียโซรีซิสเตอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ผลของความยาวของตัวต้านทาน โพลีรีซิสเตอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ที่มีความหนาของตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์ขนาดต่าง ๆ

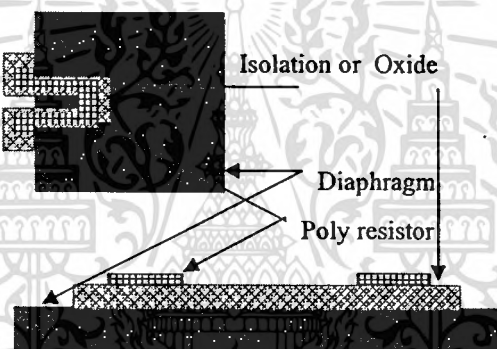
จากรูปที่ 2.11, 2.12 และ 2.13 เป็นผลของความหนาและความกว้างของเปียโซรีซิสเตอร์ที่ทำให้ความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้น แต่ความยาวของเปียโซรีซิสเตอร์จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยและการเพิ่มความไวต่อการตอบสนองต่อความดันอีกวิธี คือการสร้างตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์  $R_M$  ให้อยู่ด้านโคอะแฟรมเป็น 2 ตัวและตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์  $R_{ref}$  ด้านนอกโคอะแฟรม 2 ตัว สำหรับการชดเชยอุณหภูมิ ซึ่งทำให้อุปกรณ์ตรวจจับความดันมีความไวต่อการตอบสนองต่อความดันที่เพิ่มมากกว่ากรณีการวางตัวต้านทานโพลีรีซิสเตอร์  $R_M$  เพียงตัวเดียว [17]



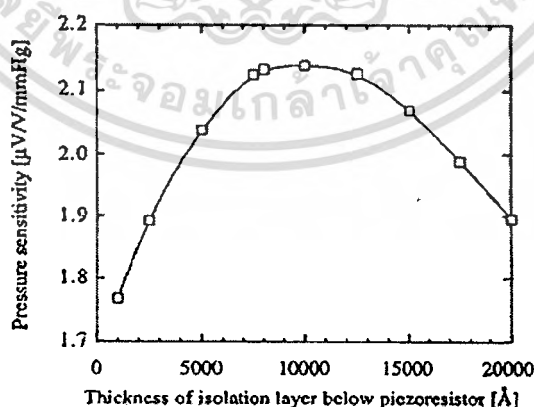
รูปที่ 2.14 ภาพด้านบนของเปียโซรีซิสเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันสำหรับการต่อเป็นโครงสร้างแบบวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฟลู-บริดจ์เพื่อเพิ่มความไวในการตอบสนอง

## 2.6.2 ชั้นฉนวนชั้นระหว่างตัวต้านทานเพียโซรีซิสเตอร์กับไดอะแฟรม

สำหรับชั้นฉนวนที่ขึ้นระหว่างตัวต้านทานเพียโซรีซิสเตอร์กับด้านบนของไดอะแฟรมแสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นด้านบนของภาพตัดขวางของไดอะแฟรมและตัวต้านทานเพียโซรีซิสเตอร์ ซึ่งแสดงความหนาของชั้นฉนวน ที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อความดันที่ความหนาต่าง ๆ ของชั้นฉนวนระหว่างเพียโซรีซิสเตอร์กับไดอะแฟรม โดยเป็นชั้นฉนวนทำหน้าที่กั้นการลัดวงจรระหว่างชั้นไดอะแฟรมและเพียโซรีซิสเตอร์ อีกทั้งใช้เป็นหน้ากปกป้องกันโพสิทีฟไดออกไซด์ไดอะแฟรมในระหว่างกระบวนการยิงฝังประจุของตัวต้านทานเพียโซรีซิสเตอร์ ซึ่งส่วนมากชั้นฉนวนสร้างจากซิลิกอนไดออกไซด์และซิลิกอนไนไตรด์หรือทั้งสองชนิด โดยชั้นฉนวนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่สร้างอยู่ด้านบนของชั้นฉนวนหรือมีผลต่อความไวในการตอบสนองความดันแสดงดังรูปที่ 2.16



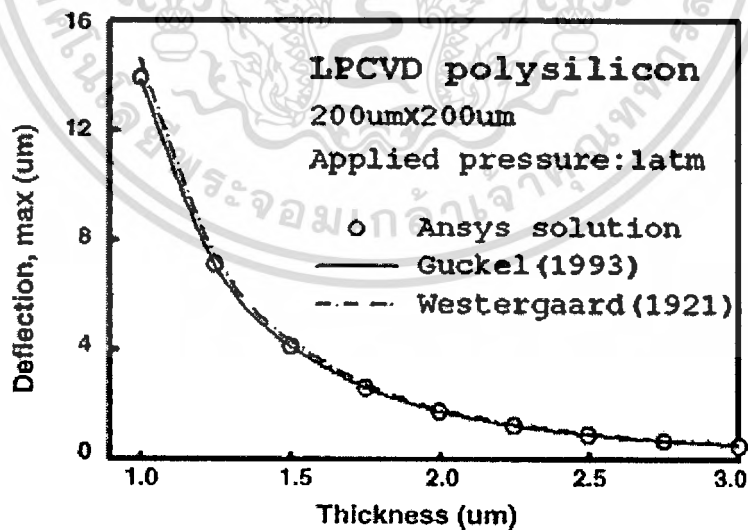
รูปที่ 2.15 ด้านบนภาพตัดขวางของไดอะแฟรมและตัวต้านทานเพียโซรีซิสเตอร์



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฉนวนที่ขึ้นระหว่างตัวต้านทานเพียโซรีซิสเตอร์กับไดอะแฟรมต่อความไวในการตอบสนองด้วยโปรแกรม ANSYS [3]

### 2.6.3 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรม

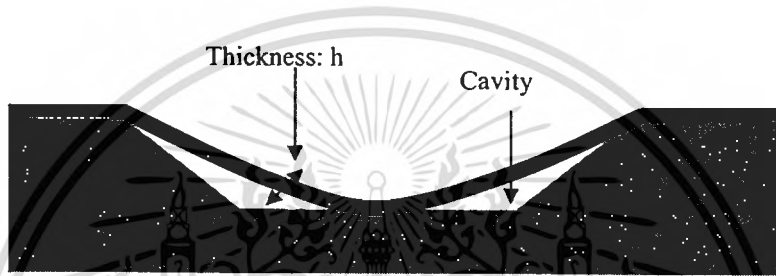
ไดอะแฟรม ( Diaphragm) หรือเมมเบรน ( Membrane ) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยไดอะแฟรมจะมีลักษณะที่บางและสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างเชิงกลเมื่อได้รับความดัน ซึ่งส่งผลให้เกิดความเค้นและความเครียดในวัสดุของตัวด้านทานโพสิทีฟซิสเตอร์ โดยวัสดุที่นำมาสร้างเป็นไดอะแฟรมมีหลายชนิด อาทิเช่น หนังกเทฟลอน (Teflon) หรือ Neoprene สำหรับไดอะแฟรมที่นำมาสร้างในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทเมมส์ เช่น โพลีซิลิคอนหรือซิลิคอนไนไตรด์ ที่มีความแข็งแรง พบว่าการยืดออกมากที่สุดของไดอะแฟรมจะมีค่าเท่ากับ 30 % ของความหนาไดอะแฟรมซึ่งบริเวณกึ่งกลางของไดอะแฟรม จะเกิดการกระจัดมากที่สุดและเกิดความเค้นมากที่สุดบริเวณกึ่งกลางของขอบไดอะแฟรม โดยปัจจัยการแอ่นตัว ค่าความเค้นและความเครียด จะมีความสัมพันธ์กับความหนาของไดอะแฟรม จากงานวิจัยการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน พบว่าขนาดความหนาของไดอะแฟรมที่ลดลงการแอ่นตัวของไดอะแฟรมจะมีค่ามากกว่าไดอะแฟรมที่มีขนาดความหนาที่เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจากรูปเป็นไดอะแฟรมที่มีขนาดพื้นที่ 200 x 200 ตารางไมครอนและมีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 3 ไมครอน เมื่อพิจารณาความหนาของไดอะแฟรมที่ลดลง จะให้ผลลัพธ์การแอ่นตัวลงมากกว่าหรือมีความไวในการตอบสนองต่อความดันที่มากกว่านั่นเอง



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบการจำลองด้วย โปรแกรม ANSYS ของ Guckel และ Westergaard ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของไดอะแฟรมและการแอ่นตัวของไดอะแฟรม [15]

#### 2.6.4 Cavity ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคที่มีโครงสร้างทั้งแบบเชิงผิวและแบบบัลก์ จะมีช่อง Cavity ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ตรวจจับความดันทั้งสองโครงสร้าง เนื่องจากเป็นช่องว่างที่ทำให้ไดอะแฟรมสามารถเคลื่อนไหวด้วยการสั่นและการแอ่นตัวขึ้น-ลง ได้อย่างเชิงกล โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีช่อง Cavity ลึกไม่เหมาะสมกับความหนาของไดอะแฟรมจะทำให้ไดอะแฟรมแอ่นตัวลงติดพื้นล่างของ Cavity แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะของไดอะแฟรมที่ติดพื้นล่างของ Cavity

ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ไดอะแฟรมมีลักษณะของการติดพื้นล่าง Cavity ซึ่งเกิดจากความหนาของไดอะแฟรมและความลึกของ Cavity โดยไดอะแฟรมที่มีลักษณะบางจะทำให้การแอ่นตัวของไดอะแฟรมมีมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณกึ่งกลางของไดอะแฟรม ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ติดพื้นล่าง Cavity เป็นตำแหน่งแรก ดังสมการที่ 2.33 [30]

$$u_{Max} = \frac{Pa^4(1-\nu^2)}{4.2Yh^3} \quad (2.33)$$

โดยที่  $u_{Max}$  เป็นการแอ่นตัวมากที่สุดของไดอะแฟรม สำหรับความลึกของ Cavity จะมีผลต่อการแอ่นตัวติดพื้นของไดอะแฟรม ซึ่งระหว่างการซีลปิด Cavity ภายใต้อัตมาดันอ้างอิงที่ใช้ในกระบวนการสร้างอยู่ในสุญญากาศทำให้ความดันภายใน Cavity เป็นสุญญากาศเช่นกัน ซึ่งมีค่าความดันน้อยกว่าความดันบรรยากาศ จึงทำให้ไดอะแฟรมแอ่นตัวลงเนื่องจากความดันบรรยากาศกดบนไดอะแฟรม โดยไดอะแฟรมที่มีขนาดบางมากจะทำให้ไดอะแฟรมติดพื้นล่างของ Cavity ตั้งแต่มีการสัมผัสกับความดันบรรยากาศก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งผลของการติดพื้นล่าง Cavity ของโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมทำให้การทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ สำหรับความดันภายใน Cavity สามารถคำนวณได้จากจุดกึ่งกลางการแอ่นตัวลงของไดอะแฟรมดังสมการที่ 3.34 [13]

$$P_C = P_A + \chi h + \sigma h^3 \quad (3.34)$$

โดยที่ $P_C$	คือ	ความดันในช่อง Cavity
โดยที่ $P_A$	คือ	ความดันนอกช่องว่าง (ความดันบรรยากาศ)
โดยที่ $\chi$	คือ	ค่าคงที่ของคุณสมบัติการยืดหยุ่นของวัสดุ
โดยที่ $\sigma$	คือ	ความเค้นของไดอะแฟรม

## 2.7 फिल्मपोलिซิติคอน [24]

โครงสร้างของฟิล์มโพลีซิติคอน มี 3 ชนิด คือ ผลึกซิติคอน โพลีซิติคอน และ อะมอร์ฟัสซิติคอน แต่สำหรับในงานวิจัยนี้เราจะกล่าวเฉพาะ ในส่วนของโพลีซิติคอนเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.7.1 โครงสร้างฟิล์มโพลีซิติคอน

โพลีคริสตอล (poly crystal) เป็นสารของแข็งที่เป็นหน่วยเซลล์ (unit cell) ที่มีการเรียงตัวอย่างไม่ต่อเนื่อง เราเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าโพลีซิติคอน โดยลักษณะ โครงสร้างของโพลีซิติคอนคล้ายกับก้อนอิฐที่นำมาวางต่อกันดังรูปที่ 2.19 (ก) ที่มีการวางก้อนอิฐกันอย่างกระจัดกระจาย โดยก้อนอิฐแต่ละก้อนเปรียบเหมือนหน่วยเซลล์ และกองของก้อนอิฐเปรียบเหมือน โพลีซิติคอน

ผลึกโมโนคริสตอลเป็นสารของแข็งที่เป็นหน่วยเซลล์ที่มีการเรียงตัวอย่างต่อเนื่อง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าผลึกรูปเดี่ยว (single crystal) ลักษณะโครงสร้างของผลึกรูปเดี่ยว คล้ายกับก้อนอิฐที่นำมาวางดังรูปที่ 2.19 (ข) ที่มีการวางก้อนอิฐอย่างเป็นระเบียบ โดยก้อนอิฐเปรียบเหมือน หน่วยเซลล์ และกองของก้อนอิฐ เปรียบเหมือน ผลึกรูปเดี่ยว ตัวอย่างเช่น ผลึกซิติคอน เป็นต้น



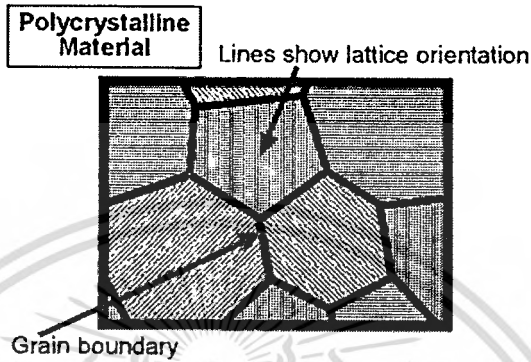
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.19 (ก) โครงสร้างโพลีซิติคอน และ (ข) โครงสร้างผลึกซิติคอน

เมื่อทำการดูที่ผิวหน้าของโพลีซิลิคอนจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.20 โดยภายในที่มีผลึกแต่ละก้อนที่แบ่งแยกขอบเขตเกรน (grain boundary) และผลึกในแต่ละก้อนนี้มีระนาบผลึก (lattice orientation) หลายระนาบผลึกอยู่ในเนื้อฟิล์มเดียวกัน เช่น [111] และ [100] เป็นต้น



รูปที่ 2.20 ผิวหน้าของโครงสร้างโพลีซิลิคอน

### 2.7.2 คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอน

โพลีซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น สร้างได้ง่าย ทำการควบคุมความหนาได้ง่าย ดังในตารางที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ เนื่องจากสร้างจากเทคนิค LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นเครื่องที่มีอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1,000 อังสตรอมต่อ ชั่วโมงที่เปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอ (uniformity) เท่ากับ 0.5 แต่สำหรับ เพชรใช้เครื่อง CVD สร้างใช้อุณหภูมิในการสร้างเพชรอยู่ที่ 800-900 องศาเซลเซียส และเมื่อไปสร้างร่วมกับกระบวนการอื่น กระบวนการสร้างฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้เพชรมีการเปลี่ยนแปลงสภาพได้ สำหรับวัสดุผลึกซิลิคอน, แกลเลียมอาร์เซไนด์ มักสร้าง จากเทคนิค MBE (molecular beam epitaxy) ซึ่งราคาเครื่องค่อนข้างสูง และอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มค่อนข้างต่ำ

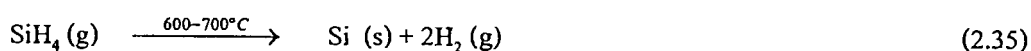
ตาราง 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์ม โพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ

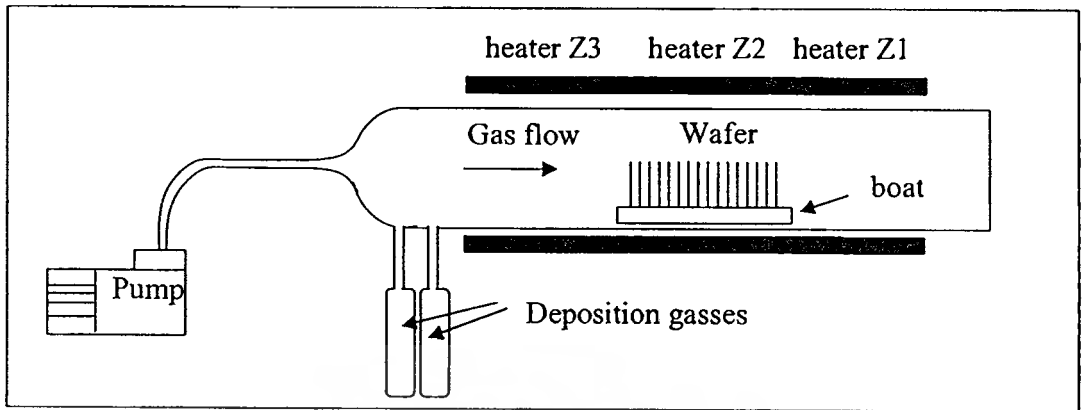
คุณสมบัติ	หน่วย	วัสดุ				
		โพลีซิลิคอน	ผลึกซิลิคอน	เยอรมันเนียม	เพชร	แกเลียมอาร์เซไนด์
Density, $\rho_m$	( $\text{kg/m}^3$ )	2320	2330	5350	3510	5316
Melting point, $T_{mp}$	( $^{\circ}\text{C}$ )	-	1410	937	3827	1238
Boiling point, $T_{bp}$	( $^{\circ}\text{C}$ )	-	2355	2830	4827	N/A
Electrical conductivity, $\sigma$	( $10^3 \text{ S/cm}$ )	-	$4 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-5}$	$\sim 10^{-17}$	$\sim 10^{-5}$
Energy band gap, $E$	(eV)	1.1	1.1	0.67	5.4	1.35
Thermal conductivity, $K$	(W/m/K)	34	168	60	1000-2600	370
Specific heat capacity, $c_p$	(J/K/kg)	678	678	310	523	-
Temperature expansivity, $\alpha_1$	( $10^{-6}/\text{K}$ )	2-2.8	2.6	5.7	1	5.7
Dielectric constant, $\epsilon_r$	-	-	11.7	16.3	5.1	12
Yong's modulus, $E_m$	(GPa)	161	190	-	542	-
Yield strength, $Y$	(GPa)	-	6.9	-	-	-
Breakdown field	(MV/cm)	-	0.3	0.1	-	0.5

### 2.7.3 กระบวนการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน [24]

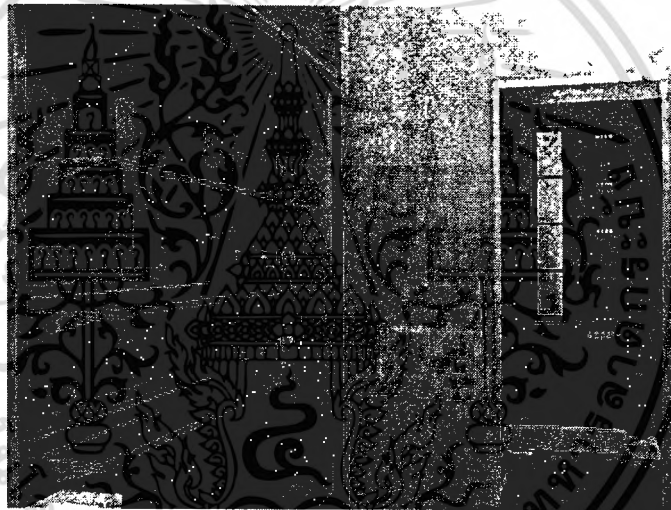
ในการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน ในงานวิจัยนี้เราใช้เครื่อง LPCVD เตาแบบแนวนอน (horizontal hot wall furnace) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อควอทซ์ (quartz tube) ทรงกระบอกวางในแนวนอน ล้อมรอบด้วยฮีตเตอร์ 3 โชน โครงสร้างของระบบ LPCVD แสดงดังรูปที่ 2.21 และ 2.22

การสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน ก๊าซที่ใช้คือ Silane ( $\text{SiH}_4$ ) ที่อุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส





รูปที่ 2.21 โครงสร้างการทำงานของเครื่องจักร LPCVD เตาแบบแนวนอน



รูปที่ 2.22 เครื่อง LPCVD เตาแบบแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

## 2.8 กระบวนการสร้างตัวต้านทานเป็ยโซริซิสทีปชนิดยิงฝังประจุ

ตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุ (ion implanted resistor) เป็นตัวต้านทานที่ได้จากเทคนิคการเติมสารเจือด้วยการยิงฝังประจุ ซึ่งเป็นกระบวนการยิงฝังประจุที่สามารถควบคุมระดับความลึก (junction depth :  $x_j$ ) ได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการกระจายสารเจือไม่ให้ขยายออกด้านข้างได้ ในขณะที่การเจือสารแบบแพร่สารเจือไม่สามารถควบคุมความลึก และการกระจายออกด้านข้างให้แม่นยำได้ ดังนั้นตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุที่ได้จะมีค่าความต้านทานที่ถูกต้อง ในการวิจัยนี้จึงสร้างตัวต้านทานด้วยเทคนิคนี้ในการวิจัย สำหรับรายละเอียดของเทคนิคการยิงฝังประจุมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1 กระบวนการยิงฝังประจุ

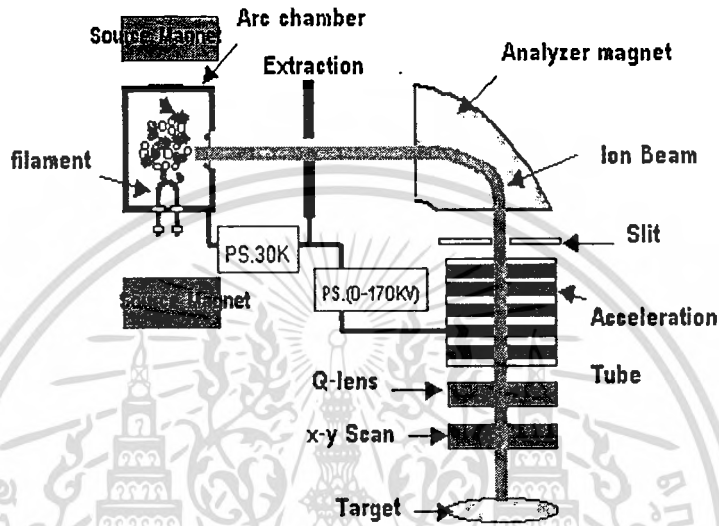
กระบวนการยิงฝังประจุ (ion implantation) คือ กระบวนการเติมสารเจือด้วยกระบวนการยิงฝังประจุลงในวัสดุเป้าหมาย เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุเป้าหมาย เช่น การเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอนจากสารชนิดเอ็น เป็นชนิดพี ซึ่งในกระบวนการยิงฝังประจุจะมีกระบวนการด้วยกัน 2 กระบวนการคือ 1 การยิงฝังประจุ เป็นกระบวนการเติมสารเจือ โดยยิงประจุลงในเนื้อสารของวัสดุเป้าหมาย และ 2 กระบวนการแอนนัล เป็น กระบวนการปรับโครงสร้างของเนื้อของวัสดุเป้าหมายหลังการยิงฝังประจุ เพื่อทำการซ่อมแซมส่วนที่ไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการยิงสารเจือหรือสร้าง โครงผลึกขึ้นมาอีกครั้ง (regrowth of crystal) และเป็นการรวมตัวพันธะระหว่างอะตอมสารเจือกับอะตอมซิลิคอนหรือเรียกว่า แอคติเวชัน (activation)

### 2.8.2 การยิงฝังประจุ[24],[31]

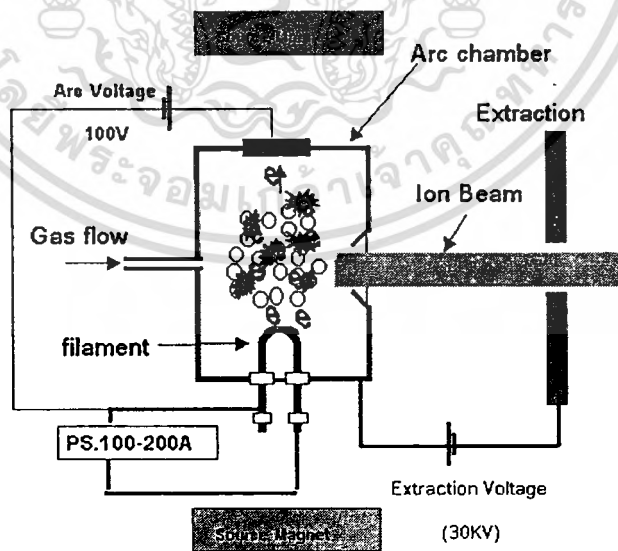
การยิงฝังประจุ คือ กระบวนการปรับโครงสร้างของเนื้อของวัสดุเป้าหมายหลังการยิงฝังประจุ โดยทั่วไปเราจะนำเทคนิคไปใช้ในการสร้างสารเจือในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำเพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น หรือ ชนิดพี โดยสารเจือที่ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น คือ สารเจือหมู่ 5 ของตารางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และ อาร์เซนิก (Arsenic) เป็นต้น สำหรับการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะใช้สารเจือในหมู่ 3 ของตารางธาตุ เช่น โบรอน (Boron) เป็นต้น ในการเติมสารเจือด้วยการยิงฝังประจุจะต้องใช้เครื่องจักรที่สำคัญ คือ เครื่องยิงฝังประจุ (Ion implanter) สำหรับหลักการทำงานของเครื่องยิงฝังประจุ คือ ประจุจะถูกสร้างด้วยแหล่งกำเนิดประจุ (Ion source) ชนิดเบอร์นาส แล้วประจุบวกจะถูกดึงออกมาด้วยศักย์ไฟฟ้า แอ็กซ์แทรกชัน (extraction) ประมาณ 30 กิโลโวลต์ แล้วเคลื่อนที่ไปสู่ อนุบาลิเซอร์แมกเนท (analyzer magnet) และ ประจุที่ไม่ต้องการจะถูกกรองออกที่ตำแหน่งนี้ หลังจากนั้นประจุที่ผ่านการกรองจะเคลื่อนที่ผ่าน ช่องสลิต (slit) และ ถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าเพิ่มอีก 0-170 กิโลโวลต์ ที่ ท่อเร่ง (Acceleration tube) หลังจากนั้นจะถูก โฟกัสด้วย เลนส์ควอดรูโพล (quadrupole lens) และกวาดลำประจุไอออนด้วย เอ็กวายแสกน (X-Y scan) ไปยังเป้าหมาย รายละเอียด โครงสร้างของเครื่องยิงฝังประจุแสดงในรูปที่ 2.23

แหล่งกำเนิดประจุ (ion source) คือแหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอร์นาส ประกอบไปด้วย อาร์คแชมเบอร์ (arc chamber), ขดลวดทังสเตน (filament), แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (source magnet) และแหล่งจ่ายก๊าซ ดังรูปที่ 2.24 โดยมีการทำงานด้วยการจ่ายกระแสให้ขดลวดประมาณ 200 แอมแปร์ และมีการจ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอาร์คแชมเบอร์ และ ขดลวด 100 โวลต์ อิเล็กตรอนจากขดลวดทังสเตนจะ

เคลื่อนไปยังอาร์คแชมเบอร์และชนกับกลุ่มก๊าซก่อให้เกิดการไอออไนเซชัน (Ionization) ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำด้วยแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการหมุนตัว (spin) เพื่อเพิ่มอัตราการชน ทำให้มีประจุมากขึ้น ส่วนประจุจะถูกดูดไปยัง แอคเทรคชันเพลท(extraction plate) ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ 30 กิโลโวลต์ เมื่อเทียบกับ อาร์คแชมเบอร์



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของเครื่องยิงฝัประจุ



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอร์นาส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ใช้ในการวัดผลของการเจือสารที่ใช้เทคนิคการเจือสารด้วยเครื่องยิงฝัประจุ คือปริมาณสารเจือ (Dose) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.36

$$D = \frac{IT}{NQA} \quad (2.36)$$

D	คือ	ปริมาณสารเจือ หน่วย ไอออน / ซม <sup>2</sup>
T	คือ	เวลาในการยิง หน่วย วินาที
I	คือ	กระแสไอออน หน่วยเป็น แอมแปร์
N	คือ	จำนวนประจุต่อไอออน 1 ตัว เช่น „B” เท่ากับ 1
Q	คือ	$1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมป์
A	คือ	เป็นพื้นที่หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

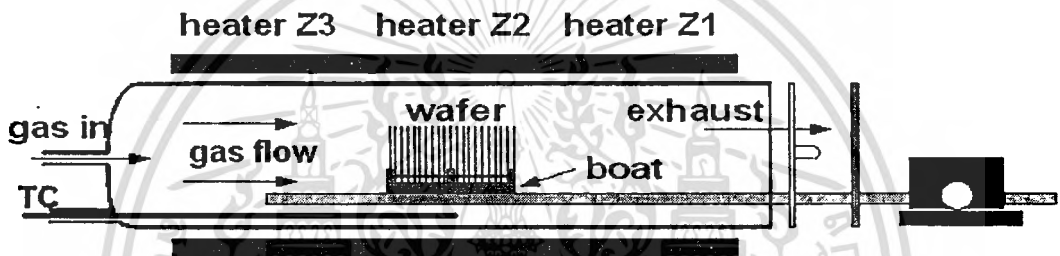
จะเห็นว่าปริมาณสารเจือแปรผันโดยตรงกับกระแสไอออน และเวลา แต่การยิงสารเจือใช้เวลามากเกินไปจะเป็นผลให้ชั้นโพโตรีซิส แข็งตัวทำให้กำจัดยากมาก นอกจากนี้ผลผลิตในการสร้างก็ลดลง เพราะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มกระแส หรือลดปริมาณสารเจือจะทำให้สามารถลดเวลาในการผลิตได้

## 2.9 เทคนิคการแอนนีสลหลังกระบวนการยิงฝัประจุ [24],[31]

หลังจากทำการยิงฝัประจุแล้วผิวของแผ่นซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยิงฝัประจุจะมีลักษณะคล้าย อมอร์ฟัส ไอออนที่ถูกยิงเข้ามาในซิลิคอน อนุภาคที่ยิงเข้ามาจะชนกับอะตอมในแผ่นซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยิงฝัประจุ จนกลายเป็นอะตอมแบบอมอร์ฟัส นอกจากนี้อะตอมที่เกิดจากการยิงฝัประจุส่วนใหญ่ จะถูกตั้งอยู่ในลักษณะ อินเตอร์สติเชียลลิ (interstitially) นั่นคือมันจะถูกตั้งอยู่ด้านนอกของโครงสร้างผลึกของซิลิคอน การแอนนีสลหลังการยิงฝัประจุ (post anneal) จะทำให้อะตอมที่ถูกเจือเคลื่อนที่เข้ามาในพันธะซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยิงฝัประจุ โดยเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งบนแลตทิซ ไซต์ ซับสติทิวติง (lattice sites-substituting) ของซิลิคอน บนอะตอม ช่วงอุณหภูมิในการแอนนีสลมีดังนี้ ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกที่ถูกทำลายจะทำให้กลับมาเป็นผลึกใหม่อีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียสใช้สำหรับทำให้เกิดจับพันธะระหว่างสารเจือกับวัสดุ ที่ได้รับการยิงฝัประจุทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น และที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส ใช้ในการจับสารเจือเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ หรือวัสดุที่ได้รับการยิงฝัประจุซึ่งความลึกขึ้นกับปัจจัยของสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของอะตอมสารเจือในวัสดุเป้าหมาย โดยจะแปรตาม ชนิดของสารเจือ ระยะเวลา

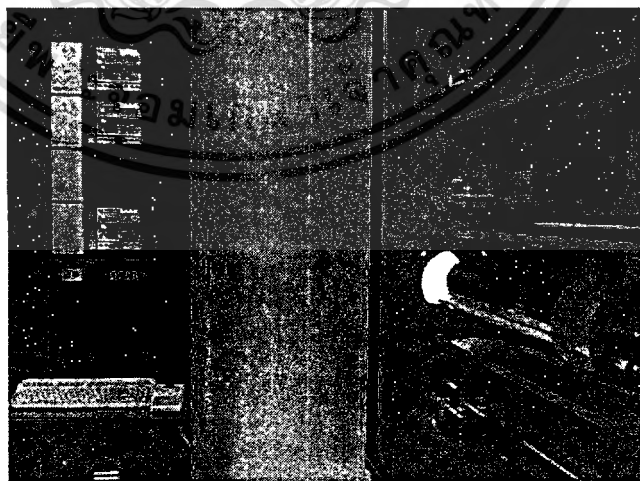
ผลึกของแผ่นเป้าหมาย และ อุณหภูมิ ดังนั้นการแอนนัลหลังการยิงฝังประจุจะทำให้ได้ผลประโยชน์ 3 ประการคือ (1) เพื่อทำการซ่อมแซมส่วนที่ไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการยิงสารเจือหรือสร้างโครงสร้างผลึกขึ้นมาอีกครั้ง (2) เพื่อเป็นการรวมตัวพันธะระหว่างอะตอมสารเจือกับอะตอมซิลิคอนและ (3) การจับลึกลับสารเจือ

การแอนนัลในงานวิจัยนี้ใช้เตาแบบแนวนอน ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อควอทซ์รูปร่างเป็นทรงกระบอกวางในแนวนอน ล้อมรอบด้วยฮีตเตอร์ 3 โซน คือ โซน Z1, Z2 และ Z3 เราจะทำกรใส่แผ่นซิลิคอน เวเฟอร์ไว้ที่ตำแหน่งโซน Z2 เพราะเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิมีค่าคงที่ พิจารณาลักษณะโครงสร้างเตาแบบแนวนอน ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 โครงสร้างของเตาแบบแนวนอน

เตาแบบแนวนอน ที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้ รุ่น SVG THERMCO TMX2604 Diffusion Furnace ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 2.26

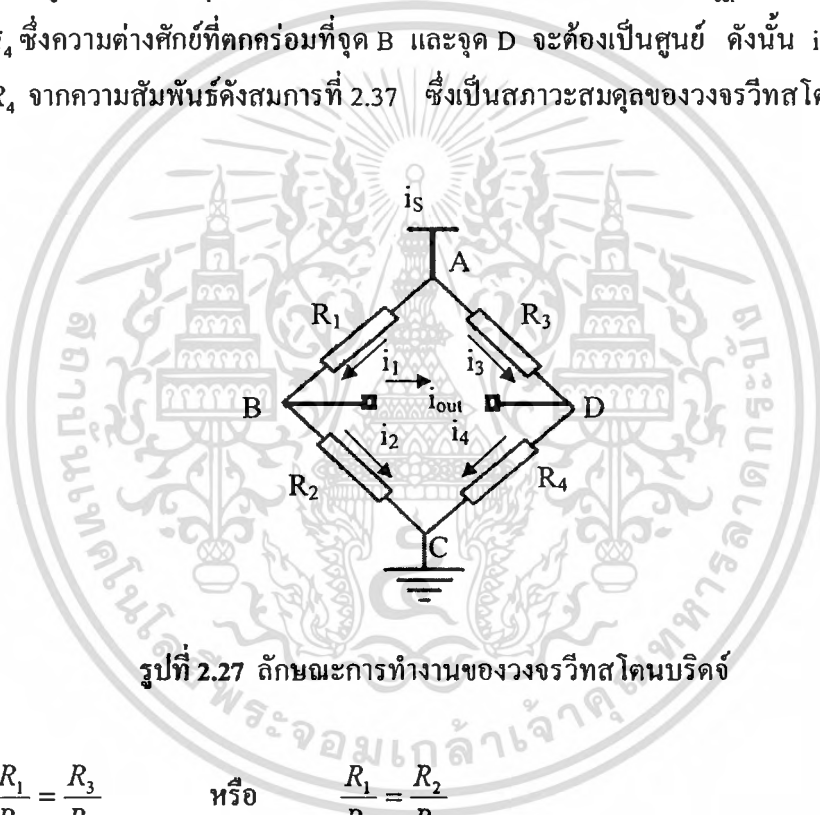


รูปที่ 2.26 เตาแอนนัลแบบแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 วงจรวีทสโตนบริดจ์ [32-33]

วงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) เป็นวงจรที่นิยมใช้ร่วมกับเซนเซอร์ที่ใช้หลักการของสเตรนเกจ ซึ่งวงจรวีทสโตนบริดจ์จะทำหน้าที่เปลี่ยนค่าความต้านทานให้อยู่ในรูปแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าโดยใช้งานกันมากคือวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบกระแสตรง ซึ่งในวงจรจะมีแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนกระแสตรงคร่อมตัวต้านทานในวงจร เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่สามารถตรวจจับความสมดุล (null detector) เป็นการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (voltage detector) ซึ่งเป็นการเทียบศักย์ไฟฟ้าที่จุด B และ D จากรูปเมื่อเกิดสมดุลเกิดขึ้นจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน หรือ  $i_{out} = 0$  และจะได้  $i_1 = i_2$  และ  $i_3 = i_4$  ซึ่งความต่างศักย์ที่ตกคร่อมที่จุด B และจุด D จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น  $i_1 R_1 = i_3 R_3$  และ  $i_2 R_2 = i_4 R_4$  จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.37 ซึ่งเป็นสถานะสมดุลของวงจรวีทสโตนบริดจ์



รูปที่ 2.27 ลักษณะการทำงานของวงจรวีทสโตนบริดจ์

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{หรือ} \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (2.37)$$

### 2.10.1 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์

วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์ (Quarter Bridge Circuit) เป็นวงจรที่มีลักษณะการต่อความต้านทานสเตรนเกจเพียงด้านเดียวจากจำนวนทั้ง 4 ด้านของวงจรวีทสโตนบริดจ์ ส่วนที่เหลือต่อเข้ากับตัวต้านทานคงที่แสดงดังรูปที่ 2.28 เมื่อวงจรอยู่ในสถานะสมดุลค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปที่เกิดจากความดันและอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าเข้าที่พหุที่ได้ดังสมการที่ 2.38 โดยมีค่าความผิดพลาดความ

เป็นเชิงเส้นเท่ากับ 0.5% สำหรับการต่อวงจรแบบคเวนเทอร์บริดจ์เมื่อนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟ ทำให้ได้รับผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิและทำให้มีความผิดพลาดได้

$$V_o = \frac{V_s}{4} \left[ \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right] \quad (2.38)$$

โดยที่  $V_o$  คือแรงดันเอาต์พุตของวงจรวีทสโตนบริดจ์



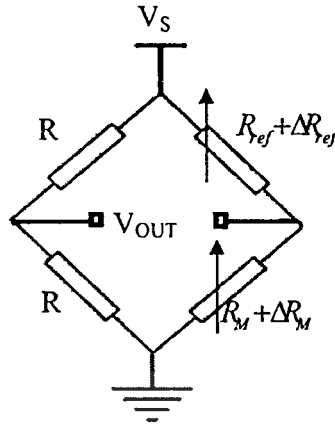
รูปที่ 2.28 ลักษณะของวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบคเวนเทอร์บริดจ์

### 2.10.2 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์

วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์ (Half Bridge Circuit) มีลักษณะการต่อความต้านทานสเตรนเกจ 2 ด้านจากจำนวนทั้ง 4 ด้านของวงจรวีทสโตนบริดจ์ โดยนำสเตรนเกจที่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิและความดันจึงทำให้มีการชดเชยอุณหภูมิเกิดขึ้น ส่วนที่เหลือต่อเข้ากับตัวต้านทานแบบคงที่แสดงดังรูปที่ 2.29 เมื่ วงจรอยู่ในสภาวะสมดุล ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปที่เกิดจากความดันและอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าเอาต์พุตที่ได้ดังสมการที่ 2.39

$$V_o = \frac{V_s}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right] \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

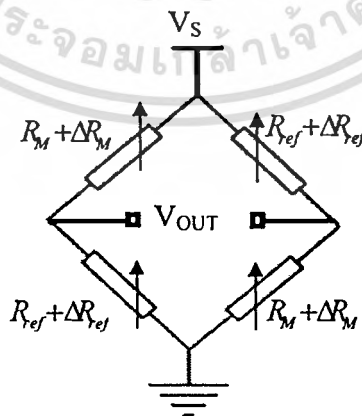


รูปที่ 2.29 ลักษณะของวงจรวัดสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์

### 2.10.3 วงจรวัดสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์

วงจรวัดสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge Circuit) มีลักษณะการต่อตัวต้านทานสเตรน-เกจทั้ง 4 ด้านของวงจรวัดสโตนบริดจ์ โดยนำสเตรนเกจที่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิและความดันต่อตรงข้ามกัน จึงทำให้มีการชดเชยอุณหภูมิขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.30 เมื่อวงจรอยู่ในสภาวะสมดุล ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปที่เกิดจากความดันและอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าเข้าที่ทุกที่ได้ดังสมการที่ 2.40 ซึ่งการใช้งานวงจรวัดสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์นี้ จะทำให้ผลของความไวในการตอบสนองต่อความดันมีค่ามากกว่ากรณีต่อแบบฮาร์ฟบริดจ์

$$V_o = V_s \left[ \frac{\Delta R}{R} \right] \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.30 ลักษณะของวงจรวัดสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ความไวต่อการตอบสนอง [34]

เซนเซอร์ทุกชนิดสิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงนั่นคือความไวในการตอบสนอง (Sensitivity) ซึ่งเซนเซอร์ที่ดีนั้นควรจะต้องมีความไวสูงและคงที่นั่นหมายความว่าเซนเซอร์นั้นจะมีการตอบสนองต่ออินพุตที่มากกระทำได้ดี โดยความไวในการตอบสนองจะเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเข้าที่พุทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุต เมื่อให้  $y$  เป็นเข้าที่พุทที่มีความสัมพันธ์กับ  $x$  ซึ่งเป็นอินพุตโดยเป็นไปตามฟังก์ชัน  $y = f(x)$  ดังนั้นสมการความไว  $y$  ที่จุด  $x_0$  ใดๆ จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S(x_0) = \frac{Dy}{Dx} \quad (2.41)$$

สำหรับความไวในการตอบสนองต่อความดันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.42 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทานและแรงดันไฟฟ้า ในกรณีต่ออุปกรณ์ตรวจจับความดันเป็นแบบวงจรวิทสโตนบริดจ์ต่อการเปลี่ยนแปลงความดัน

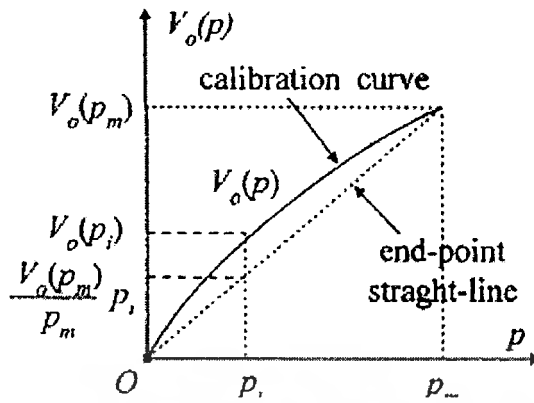
$$S = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta P} = \frac{\Delta V}{\Delta P V_S} \quad (2.42)$$

เมื่อ

- $S$  คือ ความไวในการตอบสนองต่อความดัน
- $\Delta V$  คือ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเข้าที่พุทของวงจรวิทสโตนบริดจ์
- $\Delta P$  คือ การเปลี่ยนแปลงความดัน
- $V_S$  คือ แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ของวงจรวิทสโตนบริดจ์

## 2.12 การหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้น [35]

ความไม่เป็นเชิงเส้นสามารถคำนวณหาโดยจากการนำเส้นตรงที่กำหนดขึ้นมา (end point straight-line) ลากจากค่าต่ำสุดไปยังจุดสูงสุดของย่านการวัดของเส้นโค้ง จากการทดลองที่จะนำวัดสอบเทียบ (calibration curve) และนำค่าผลต่างการเปลี่ยนแปลงของจุดกลาง ระหว่างเส้นตรงที่กำหนดกับเส้นตรงที่ได้จากการวัดทดลอง ซึ่งแสดงรูปที่ 2.31 และหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ 2.43



รูปที่ 2.31 รูปแบบและวิธีการหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

$$NLI = \frac{V_o(P_i) - \frac{V_o(P_m)}{P_m} P_i}{V_o(P_m)} \times 100\% \tag{2.43}$$

- เมื่อ
- $NLI$  คือ ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น
  - $V_o(P_i)$  คือ ค่าเข้าที่พหุจากการทดลองในช่วงความกว้างมากที่สุดเทียบกับเส้นตรงกำหนด (straight-line)
  - $V_o(P_m)$  คือ ค่าเข้าที่พหุมากที่สุดของย่านการวัด
  - $P_i$  คือ ความดันในช่วงความกว้างมากที่สุดเทียบกับเส้นตรงกำหนด (straight-line)
  - $P_m$  คือ ความดันมากที่สุดของย่านการวัด

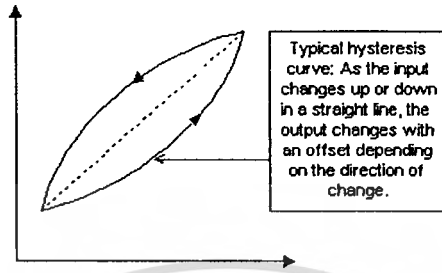
และสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันในงานวิจัยนี้ มีลักษณะการตอบสนองต่อความดันที่มีความเป็นเส้นตรงจึงใช้สมการเส้นตรงในการวิเคราะห์ดังสมการที่ 2.44 โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนด้วยค่าอาร์สแควร์ จากสมการเส้นตรง

$$y = mx + c \tag{2.44}$$

### 2.13 ฮีสเตอร์รีซิส [36]

ค่าฮีสเตอร์รีซิสเป็นค่ากำหนดขนาดความผิดพลาด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าทางด้านเข้าที่พหุภายในย่านอินพุตที่กำหนดมีความผิดพลาด จากค่าที่เปลี่ยนแปลงทางขึ้นและค่าดังกล่าวที่ย้อนกลับมายังตำแหน่งเดิม ซึ่งค่าดังกล่าวอาจเกิดจากการสูญเสียความยืดหยุ่นและการฝืดเป็นต้น โดยค่าฮีสเตอร์รีซิส

ที่ดีเมื่อมีการเพิ่มหรือลดค่าอินพุตค่าเข้าที่พหุ ที่ได้ควรมีค่าความสัมพันธ์คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งรูปแบบของค่าฮิสเตอร์รีซิสที่นำมาวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 กราฟของฮิสเตอร์รีซิสของเครื่องมือวัด

ค่าฮิสเตอร์รีซิสสามารถบอกความคลาดเคลื่อน (error) ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าฮิสเตอร์รีซิสได้ดังสมการที่ 2.45

$$Hysteresis(\%) = \left[ \frac{O_{forward\ 1st} - O_{forward\ 2nd} \text{ or } O_{forward\ 1st} - O_{reverse\ 1st}}{V_{FS} - V_{OS}} \right]_{max} \times 100\% \quad (2.45)$$

- โดยที่
- $O_{forward\ 1st}$  คือ ค่าเข้าที่พหุที่ห่างกันมากที่สุดช่วงขาขึ้นรอบแรก
  - $O_{forward\ 2nd}$  คือ ค่าเข้าที่พหุที่ห่างกันมากที่สุดช่วงขาขึ้นรอบที่สอง
  - $O_{reverse\ 1st}$  คือ ค่าเข้าที่พหุที่ห่างกันมากที่สุดช่วงขาลงรอบแรก
  - $V_{OS}$  คือ ค่าเข้าที่พหุออฟเซต
  - $V_{FS}$  คือ ค่าเข้าที่พหุเต็มสเกล

### 2.14 สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ [37]

สัมประสิทธิ์ค่าออฟเซตของอุณหภูมิ หรือ TCO เป็นค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าออฟเซตต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีความสัมพันธ์กับค่าออฟเซตที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.46

$$TCO = \frac{V_{os}(T_1) - V_{os}(T_A)}{(T_1 - T_A)V_{os}(T_A)} \times 100\% \quad (2.46)$$

โดยที่ TCO คือ สัมประสิทธิ์ค่าออฟเซตของอุณหภูมิ

$V_{\infty}(T_A)$	คือ	ออฟเซตที่อุณหภูมิห้อง
$V_{\infty}(T_1)$	คือ	ออฟเซตที่อุณหภูมิใด ๆ
$T_A$	คือ	อุณหภูมิห้อง
$T_1$	คือ	อุณหภูมิใด ๆ

## 2.15 สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ

สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ หรือ TCR เป็นค่าแสดงคุณสมบัติของตัวต้านทานเป็ยโซริซิสทีป ที่มีค่าความไวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป โดยที่สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.47 [38-39]

$$TCR = \alpha = \frac{R_1 - R_0}{R_0(T_1 - T_A)} \quad (2.47)$$

โดยที่	$TCR$	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ
	$R_0$	คือ	ความต้านที่อุณหภูมิห้อง
	$R_1$	คือ	ความต้านทานที่อุณหภูมิใด ๆ
	$T_A$	คือ	อุณหภูมิห้อง
	$T_1$	คือ	อุณหภูมิใด ๆ

ในกรณีสารกึ่งตัวนำค่าความต้านทานจะมีความสัมพันธ์ กับอุณหภูมิดังสมการ 2.48 [24]

$$R(T_1) = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT_1}\right) \quad (2.48)$$

โดยที่	$E_a$	คือ	พลังงานที่ทำการจ่าย
	$k$	คือ	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์

จากสมการที่ 2.48 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อมีการนำไปสร้างเป็นเป็ยโซริซิสเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน จะควบคุมอุณหภูมิได้ยากแต่ในกรณีของโลหะหรือสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารที่สูงมากจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.49 [40]

$$R(T_1) = R_0(1 + \alpha T_1 + \beta T_1^2) \quad (2.49)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ  
 $\beta$  คือ สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

ส่วนใหญ่แล้วค่า  $\beta$  มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า TCR ของโลหะแพดทินัมซึ่งมีค่าเท่ากับ  $3.9 \times 10^{-4}/K^{-1}$  และมีค่า  $\beta$  เท่ากับ  $-5.9 \times 10^{-7}/K^{-1}$  ดังนั้นจะเห็นว่าในกรณีของโลหะจะมีค่าความต้านทานที่สูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น

ดังนั้นโลหะทั่วไปจะมีค่า TCR เป็นบวก ซึ่งหมายถึงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะสูงขึ้นและเมื่ออุณหภูมิลดลงค่าความต้านทานจะลดลง ในกรณีสารกึ่งตัวนำที่มีค่า TCR เป็นลบ ซึ่งหมายถึง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานจะลดลง และเมื่ออุณหภูมิลดลงค่าความต้านทานจะสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเจือสารที่มีความเข้มข้นสูงมากประมาณมากกว่า  $10^{20}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จะทำให้ค่า TCR มีค่าเป็นบวกได้

## 2.16 สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ [41]

สัมประสิทธิ์ความไวต่อการตอบสนองของอุณหภูมิ หรือ TCS เป็นการหาผลของความไวต่อการตอบสนองของอุณหภูมิที่ไม่ใช่ผลต่อการตอบสนองความดัน ซึ่งเมื่อความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันมีค่าลดลง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.50

$$TCS = \frac{[V_{FS}(T_1) - V_{OS}(T_1)] - [V_{FS}(T_A) - V_{OS}(T_A)]}{(T_1 - T_A)[V_{FS}(T_1) - V_{OS}(T_1)]} \times 100\% \quad (2.50)$$

เมื่อ	$V_{FS}(T_1)$	คือ	เข้าที่พุทเต็มสเกลที่อุณหภูมิใด ๆ
	$V_{FS}(T_A)$	คือ	เข้าที่พุทเต็มสเกลที่อุณหภูมิห้อง
	$V_{OS}(T_1)$	คือ	เข้าที่พุทออฟเซตที่อุณหภูมิใด ๆ
	$V_{OS}(T_A)$	คือ	เข้าที่พุทออฟเซตที่อุณหภูมิห้อง

## บทที่ 3

# เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ตรวจจับความดันเปียโซรีซิสทีปที่สร้างขึ้น โดยเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวัดทดสอบค่าความต้านทานของอุปกรณ์ ตรวจจับความดันก่อนนำไปบรรจุลงบนแผ่น PCB โดยหลังจากบรรจุลงบนแผ่น PCB จะนำไปทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อความดัน ซึ่งเป็นระบบวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างขึ้น โดยเฉพาะ

### 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [24]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM (Scanning Electron Microscopy) เป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ในหลายแขนงสาขาวิชาไม่ว่าจะเป็นงานด้านวัสดุศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์ สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ โดยอาศัยการกวาดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสงธรรมดา ซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่า จนถึงระดับ 100,000 เท่า และจุดเด่นที่สำคัญมีอยู่ 2 ประการคือ

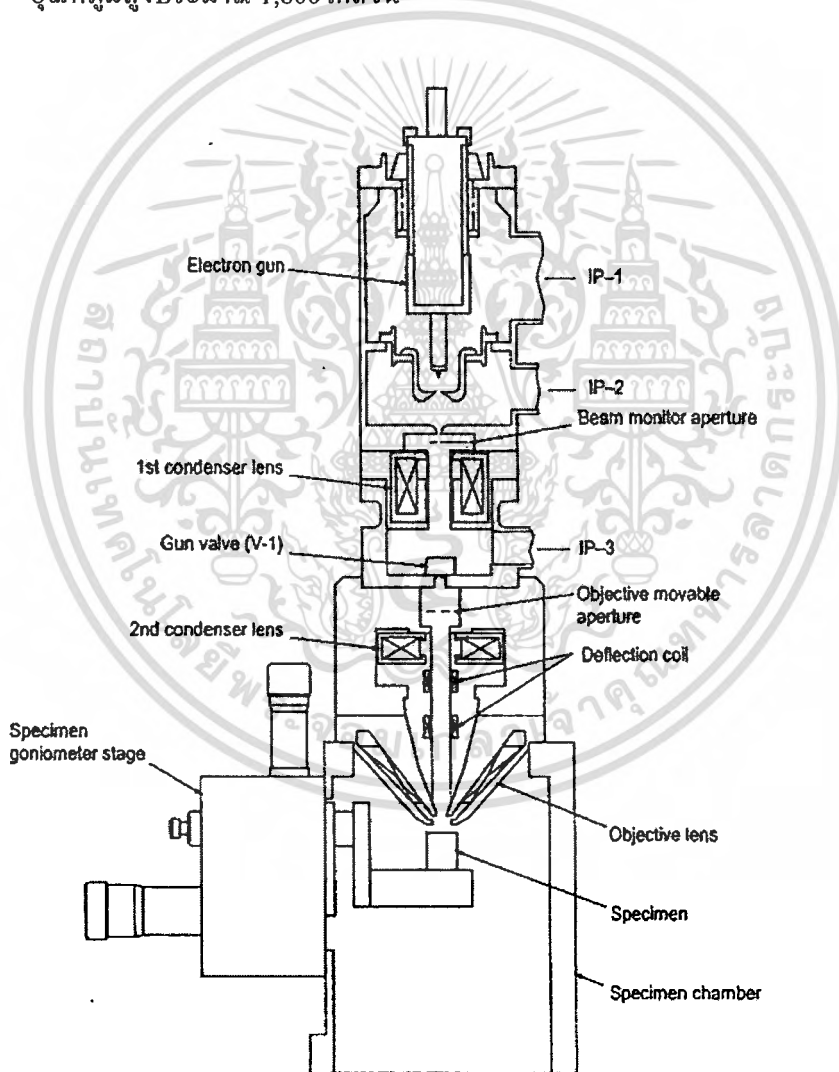
1. สามารถให้ภาพที่มีความคมชัดลึกสูง (High depth of field)
2. สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (High spatial resolution)

สำหรับโครงสร้าง พื้นฐานการทำงานของ SEM พิจารณาได้ดังรูปที่ 3.1 ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนหรือปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดของเครื่องของเครื่อง SEM โดยจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมาก โดยตัววัสดุจะต้องมีความเสถียรภาพและภาพตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปจะต้องเป็นจุดเล็กๆ ซึ่งปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 4 ประเภทคือ

1. แบบขดลวดทั้งสแตน เป็นปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสุญญากาศมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบผลึก  $\text{LaB}_6$  (lanthanum hexaboride crystal) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้แสงสว่างสูงกว่าแบบขดลวดทั้งสแตนประมาณ 10 เท่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า และต้องการสภาพสุญญากาศ
3. แบบโกลด์ฟิลด์อิมิชัน (cold field emission source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้แสงสว่างสูงกว่าแบบทั้งสแตนและแบบผลึก  $\text{LaB}_6$  นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิห้องแบบช็อตฟิลด์อิมิชัน (Schottky filed emission source)
4. เป็นปืนอิเล็กตรอนที่คล้ายกับแบบโกลด์ฟิลด์อิมิชันแต่แตกต่างกันตรงที่จะต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,800 เคลวิน



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0.5 - 30 กิโลโวลต์ โดยมีคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวแรก (1<sup>st</sup> condenser lens) ซึ่งเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้ผ่านไปที่ช่องเปิดที่มีสามารปรับขนาดต่างๆ กันได้ด้วย ออปเจ็กทีฟ มูฟเอเบิล แอปเพอเจอร์ (objective movable aperture) เพื่อควบคุมปริมาณของอิเล็กตรอน หลังจากนั้นคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวที่สอง (2<sup>nd</sup> condenser lens) ทำหน้าที่บีบอัดอิเล็กตรอนให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงและใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายทำการโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัตถุ โดยมีดีฟเลกชันคอยล์ (deflection coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัตถุเกิดอันตรกิริยาขึ้นภายในวัตถุและจะให้สัญญาณต่าง ๆ ออกมาซึ่งจะถูกตรวจจับและนำไปแสดงผล

ในการวิจัยนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาวิเคราะห์โครงสร้างตัดขวางของโพลีซิลิคอนไดอะแพรมกับช่อง Cavity ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีไดอะแพรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน โดยใช้ SEM รุ่น S-4700 จากบริษัท ฮิตาชิ ใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนชนิดแบบโคลด์ฟิวด์อิมิชชัน ซึ่งให้ความสว่างสูงและกำลังสามารถแยกแยะระดับ 1.5 นาโนเมตร ที่ 15 กิโลโวลต์ นอกจากนี้ยังมีกำลังขยายสูงสุดถึง 500,000 เท่าแสดงดังในรูปที่ 3.2

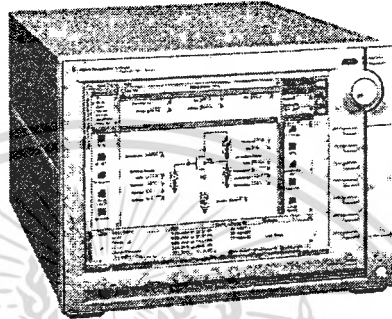


รูปที่ 3.2 เครื่อง SEM รุ่น S-4700 ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับวัดความต้านทานที่รอยต่อโลหะของตัวต้านทานเปียกโซริซิสเตอร์ โดยใช้เครื่องรุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer จากบริษัท Hewlett Packard ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้งานร่วมกับโปรแกรม Easy EXPERT



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ารุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer

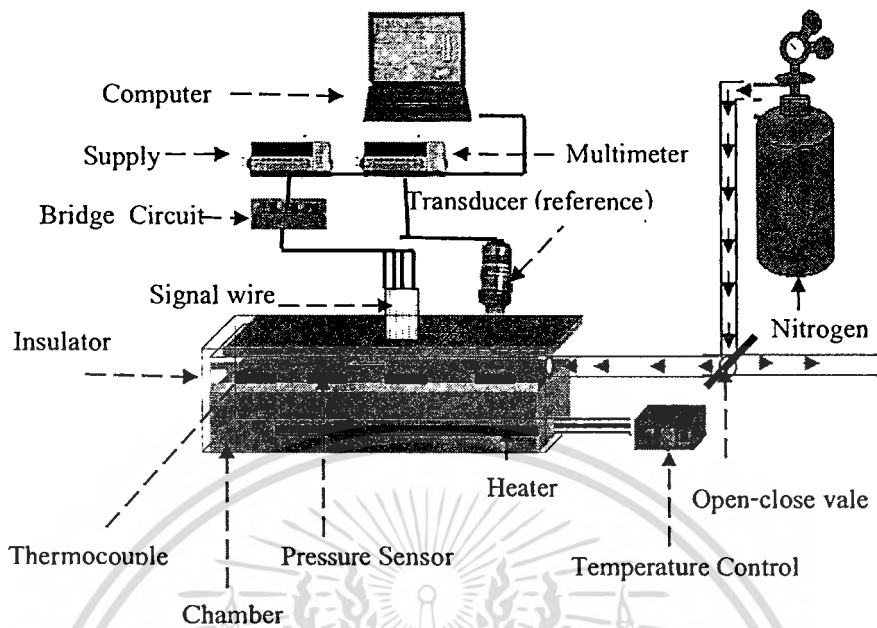
## 3.3 ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

สำหรับการทดสอบการตอบสนองความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันโดยการทดสอบระหว่างความดันสูงและความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 3.3.1 ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันสูง

การวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันเปียกโซริซิสทีป ในงานวิจัยนี้ที่ความดันสูงจะใช้น่านการทดสอบความดันตั้งแต่ 1 บาร์ ถึง 15 บาร์ โดยระบบการวัดและทดสอบใช้ทรานสดิวเซอร์อ้างอิงรุ่น M515-00005-200 psi สำหรับวัดความดันภายในแชมเบอร์ ซึ่งภายในแชมเบอร์มีฮีตเตอร์ (heater) และเทอร์โมคัปเปิลสำหรับเพิ่มอุณหภูมิและวัดอุณหภูมิตามลำดับ โดยมีชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสอง ซึ่งตัวต้านทานเปียกโซริซิสเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันต่อกับความต้านทานภายนอก ให้เป็นวงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์ ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ 3 โวลต์ต่อเข้ากับวงจรทำให้สัญญาณเข้าที่พุทเป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเข้ากับคิจิตอลมัลติมิเตอร์รุ่น Agilent 34410A ส่วนเข้าที่พุทของทรานสดิวเซอร์อ้างอิงต่อเข้ากับคิจิตอลมัลติมิเตอร์ Hp 3457A และแสดงผลการทดลองบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งมีระบบการทดสอบดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ระบบการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันสูง

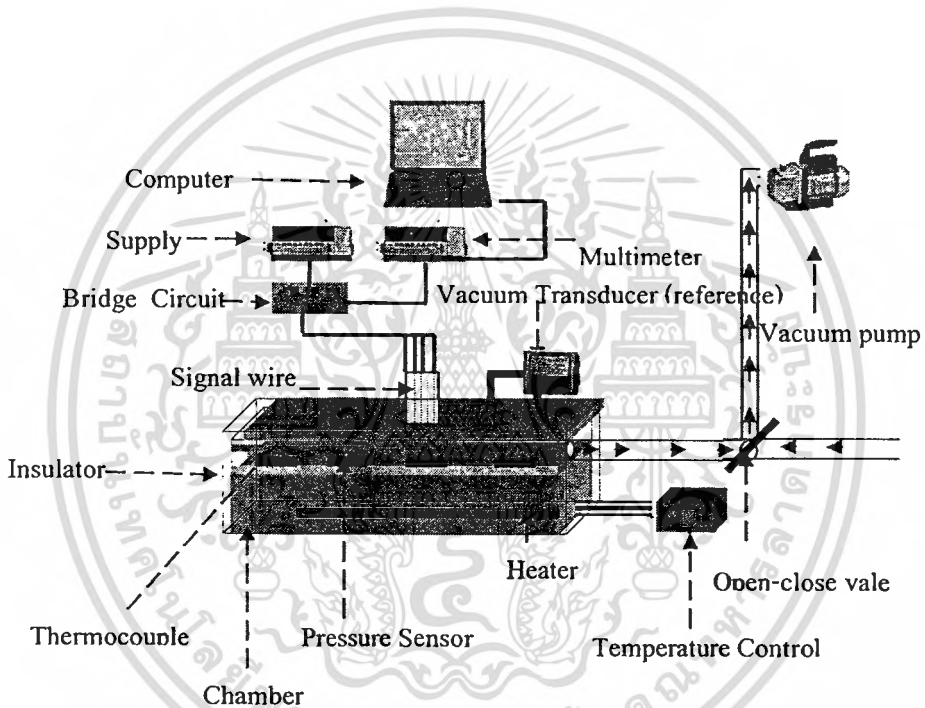
สำหรับรายละเอียดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ที่ประกอบเป็นชุดระบบทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันมีดังนี้

1. แคมเบอร์อัดความดัน
2. ทรานสดิวเซอร์วัดความดันอ้างอิง (M515-00005-200 psi, VSC 42MA4)
3. ฮีตเตอร์
4. เทอร์โมคัปเปิล
5. ชุดควบคุมอุณหภูมิ
6. ถังไนโตรเจน
7. เรกกูเรเตอร์
8. วงจรวิทสโตนบริดจ์
9. เพาเวอร์ซัพพลาย
10. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Agilent 34410A, Hp 3457A)
11. เครื่องคอมพิวเตอร์
12. ฉนวนกันความร้อน
13. ปีมสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ชุดเครื่องมือวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดความดันที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

การวัดและทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ ที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยใช้ย่านการทดสอบความดันตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์ ซึ่งมีระบบการวัดและทดสอบเหมือนกับการทดสอบที่ความดันสูง แต่ใช้ Vacuum Pump ดูดความดันภายในแชมเบอร์ให้เป็นสุญญากาศ โดยมีทรานสดิวเซอร์รุ่น VSC 42MA4 สำหรับวัดความดันภายในแชมเบอร์และเปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดความดันที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีระบบทดสอบดังรูปที่ 3.5 และมีรายละเอียดต่างของอุปกรณ์ดังนี้



รูปที่ 3.5 ระบบการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดความดัน ที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

## บทที่ 4

### กระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับในบทที่ 4 จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน เช่น การออกแบบตัวต้านทานโพลิซิลิเกตอร์โครงสร้างและลำดับขั้นตอนการสร้าง ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน และการบรรจุเซนเซอร์ลงแผ่น PCB โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย มีลักษณะโครงสร้างแบบเชิงผิวแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยเป็นภาพตัดขวางของไดอะแฟรมและโพลิซิลิเกตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังนี้ มีโพลิซิลิเกตอนไดอะแฟรมถูกสร้างบนฐานรองซิลิโคนชนิดอื่น โดยไดอะแฟรมมีพื้นที่ขนาด 100 x 100 ตารางไมครอนและมีความหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน ซึ่งระหว่างรอยต่อโพลิซิลิเกตอนไดอะแฟรมกับฐานรองมีช่อง Cavity ลึก 1.4 ไมครอนและมีชั้นซิลิโคนไดออกไซด์หนา 7,500 อังสตรอมและซิลิโคนไนไตรด์หนา 700 อังสตรอม ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างชั้นโพลิซิลิเกตอร์และด้านบนของโพลิซิลิเกตอนไดอะแฟรม ซึ่งชั้นโพลิซิลิเกตอร์ที่สร้างขึ้นมีความหนา 4,000 อังสตรอม ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานเปียโซรีซิสทีฟ ในการออกแบบได้กำหนดสร้างตัวต้านทานโพลิซิลิเกตอร์ ให้อยู่ด้านบนไดอะแฟรมและภายนอกไดอะแฟรม ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซิสทีฟที่ใช้ในงานวิจัย

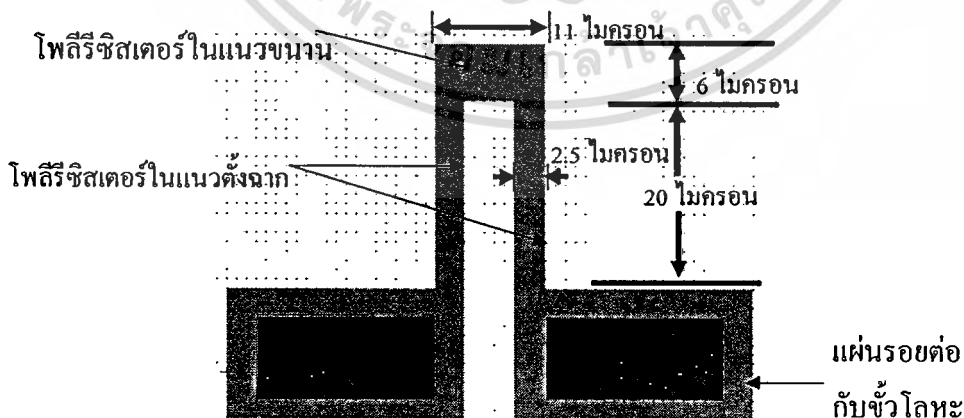
## 4.2 การออกแบบตัวต้านทานเปียโซรีซิสทีฟ ชนิดโพลีรีซิสเตอร์

ตัวต้านทานเปียโซรีซิสทีฟ บนไดอะแฟรมจะมีอยู่ 2 ชนิดคือตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก และตัวต้านทานในแนวขนาน ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเพื่อให้ได้ค่าสภาพความต้านทาน เท่ากับ  $4.6 \times 10^3$  โอห์ม-เซนติเมตร หรือความต้านทานเชิงแผ่น เท่ากับ 115 โอห์ม/□ ที่ฟิล์มหนา 4,000 อังสตรอมโดยใช้เทคนิคการยิงฝัประจุ ซึ่งสามารถคำนวณหาความต้านทานเริ่มต้นของตัวต้านทาน ได้ดังสมการที่ 4.1

$$R = \rho \frac{l_p}{wt} \quad (4.1)$$

- เมื่อ R คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)  
 $\rho$  คือ สภาพความต้านทาน (โอห์ม-เซนติเมตร)  
 $l_p$  คือ ความยาวของตัวต้านทาน (ไมครอน)  
w คือ ความกว้างของตัวต้านทาน (ไมครอน)  
t คือ ความหนาของโพลีรีซิสเตอร์ (ไมครอน)

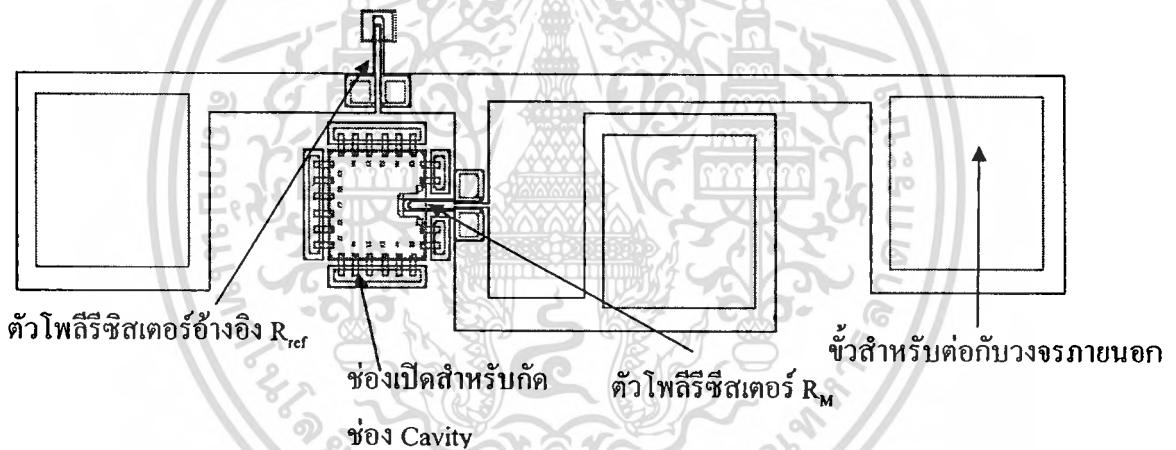
สำหรับการออกแบบได้กำหนดให้ตัวโพลีรีซิสเตอร์ในแนวตั้งฉากและแนวขนานต่อกันเป็นรูปตัวยูมีขนาดตัวโพลีรีซิสเตอร์ในแนวตั้งฉากมีความยาว 20 ไมครอน กว้าง 2.5 ไมครอน และหนา 4,000 อังสตรอม และขนาดตัวโพลีรีซิสเตอร์ในแนวขนานมีความยาว 6 ไมครอน กว้าง 11 ไมครอน และหนา 4,000 อังสตรอม ดังรูปที่ 4.2 โดยการออกแบบตัวโพลีรีซิสเตอร์อ้างอิงที่อยู่ด้านนอกไดอะแฟรมมีขนาด  $36 \times 30$  ไมครอนและหนา 4,000 อังสตรอม โดยไม่มีช่อง Cavity สร้างขึ้นเพื่ออ้างอิงความต้านทานในวงจรที่เกิดจากอุณหภูมิ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ขนาด โครงสร้างของ โพลีรีซิสเตอร์

### 4.3 การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันความดันแบบเปียโซรีซีฟทีป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันดังรูปที่ 4.3 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีพื้นที่ไดอะแฟรมขนาด 100 x 100 ตารางไมครอนและมีความหนาเท่ากับ 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน ซึ่งตัวโพรีซีสเตอร์ในแนวตั้งฉากที่ถูกออกแบบมีตำแหน่งการวางอยู่ที่ 0-12 ไมครอนนับจากขอบของไดอะแฟรมและตัวโพรีซีสเตอร์ในแนวขนาน มีตำแหน่งการวางอยู่บนไดอะแฟรมที่ตำแหน่ง 50 ไมครอนโดยทั้งตัวด้านทานทั้งสองแบบต่อกันเป็นรูปตัวยู ตามหัวข้อ 4.2 และสำหรับตัวโพรีซีสเตอร์อ้างอิงที่อยู่นอกไดอะแฟรม โดยไม่มีช่อง Cavity อยู่ด้านนอกไดอะแฟรม ซึ่งไว้สำหรับอ้างอิงความต้านทานในวงจรที่เกิดจากอุณหภูมิ และสร้างช่องเปิดสำหรับกักช่อง Cavity ให้มีขนาด 5 x 20 ตารางไมครอนจำนวน 22 ตัว และแผ่นซีวรอยต่อโลหะสำหรับต่อกับวงจรภายนอกมีขนาด 200 x 200 ตารางไมครอน ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวมาแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันในงานวิจัย

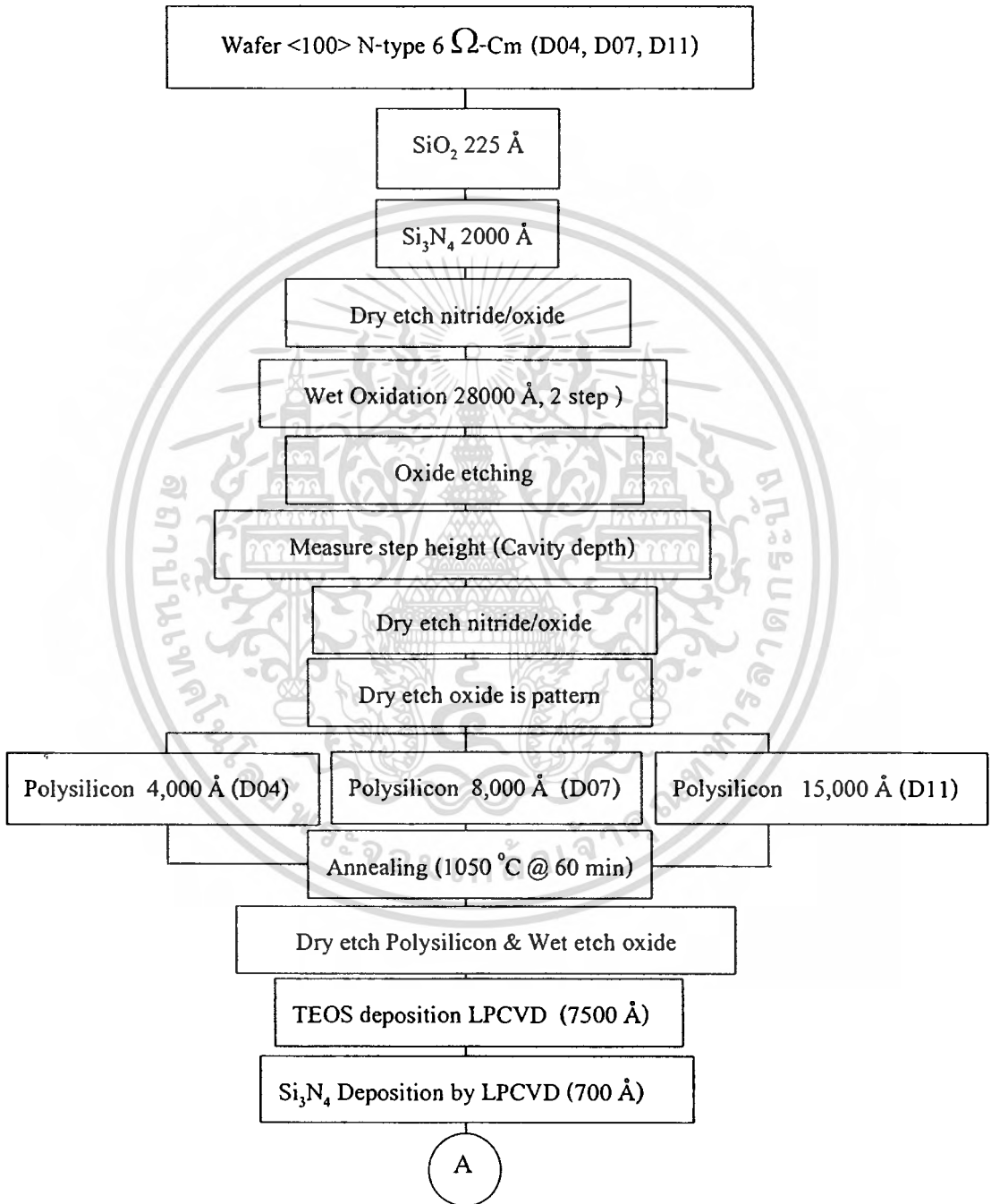
โดยสรุปแล้วอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างขึ้น มีลักษณะทั่วไปดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	ความกว้าง ( $\mu\text{m}$ )	ความยาว ( $\mu\text{m}$ )	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )
โพลิซิลิคอนไดอะแฟรม	100	100	0.4, 0.8, 1.5
ช่อง Cavity	103	103	1.4
โพรีซีสเตอร์ (ตั้งฉาก)	2.5	20	0.4
โพรีซีสเตอร์ (ขนาน)	6	11	0.4

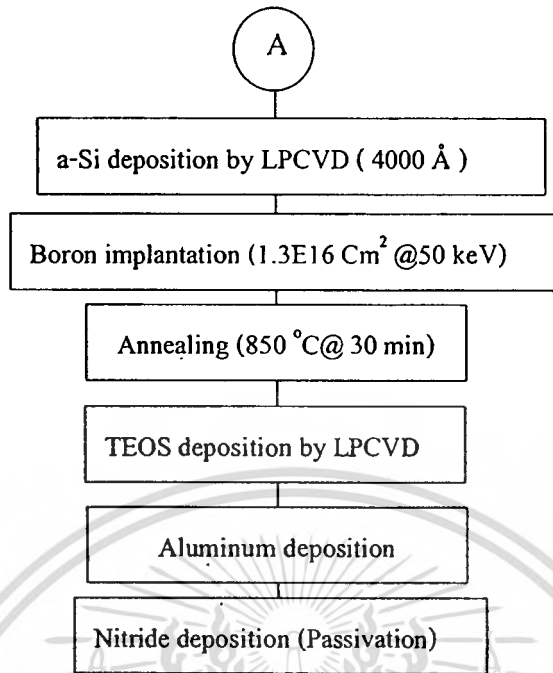
#### 4.4 ลำดับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเป็ยโซริซิจีทีป

สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีลำดับกระบวนการสร้างดังนี้



รูปที่ 4.4 ลำดับขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ลำดับขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน (ต่อ)

จากลำดับขั้นตอนการสร้างที่แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 สามารถนำมาเขียนเป็นภาพตัดขวางแสดงลำดับกระบวนการสร้างชั้นต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ได้ดังนี้

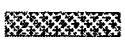
1. อุปกรณ์ตรวจจับความดันสร้างอยู่บนฐานรองชนิดเอ็น



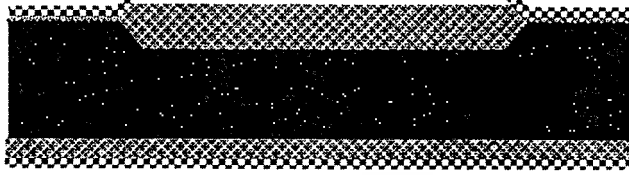
2. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และซิลิกอนไนไตรด์ เพื่อเตรียมสำหรับกัดเปิดช่อง Cavity



หมายเหตุ สัญลักษณ์สีและโครงสร้าง

		
ซิลิกอน ชนิดเอ็น	ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์	ฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์

3. ใช้ มาร์ก 1 เพื่อกัดเปิดช่อง ซิลิโคนไดออกไซด์และซิลิโคนไนไตรด์ออก หลังจากนั้นสร้างซิลิโคนไดออกไซด์



4. ทำการกัดซิลิโคนไดออกไซด์และซิลิโคนไนไตรด์ออก หลังจากนั้นสร้างซิลิโคนไดออกไซด์ แล้วกัดซิลิโคนไดออกไซด์ออกให้เป็นลวดลาย





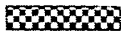

5. ปิดฟิล์มโพลีซิลิโคนให้อยู่บนซิลิโคนไดออกไซด์ สำหรับสร้างเป็น ไดอะแฟรม



6. กัดเปิดช่อง Cavity ให้มีความลึกขนาด 1.4 ไมครอน

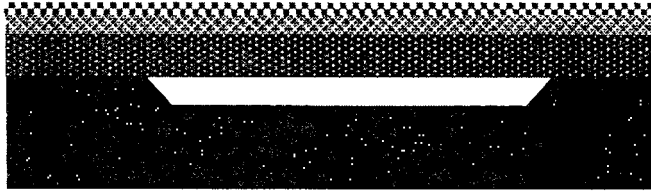


หมายเหตุ สัญลักษณ์และโครงสร้าง

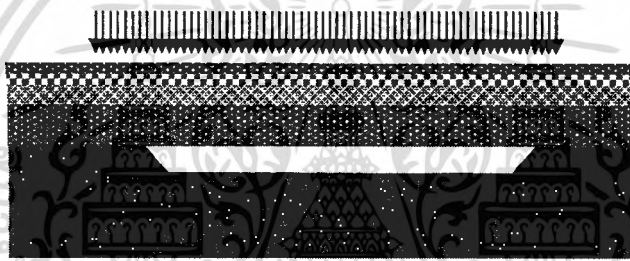
			
ซิลิโคน ชนิดเอ็น	ฟิล์มซิลิโคนไดออกไซด์	ฟิล์มซิลิโคนไนไตรด์	ฟิล์มโพลีซิลิโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

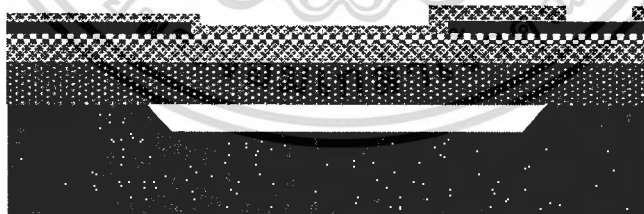
7. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วย LPCVD เพื่อปิดช่องรูและสร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์









8. สร้างชั้นโพลีซิลิกอนและทำการเจือสาร โพลีซิลิกอนด้วยเทคนิคการยิงฝูประจุที่ปริมาณสารเจือ  $1.3 \times 16 \text{ ion/Cm}^2$  ที่พลังงาน 50 keV



9. กัดชั้นโพลีซิลิกอนให้เป็นลวดลายเป็นโพลีรีซิสเตอร์ ปลุกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ให้ออกเป็นช่องสำหรับสร้างขั้วต่อโลหะอลูมิเนียมกับโพลีรีซิสเตอร์

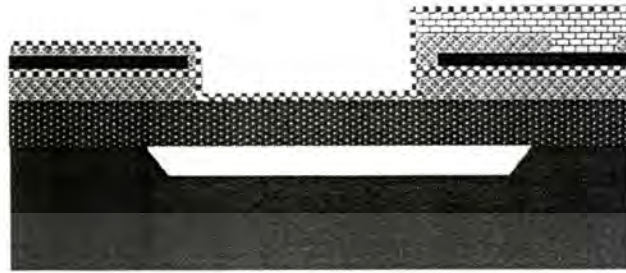


**หมายเหตุ** สัญลักษณ์สีและโครงสร้าง

					
ซิลิกอน ชนิดเอ็น	ฟิล์มซิลิกอนได ออกไซด์	ฟิล์มซิลิกอน ไนไตรด์	ฟิล์มโพลี ซิลิกอน	โพลี รีซิสเตอร์	ฟิล์มโลหะ อะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. สร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมและกั๊ดเป็นลวดลาย และสร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์ป้องกันความชื้น



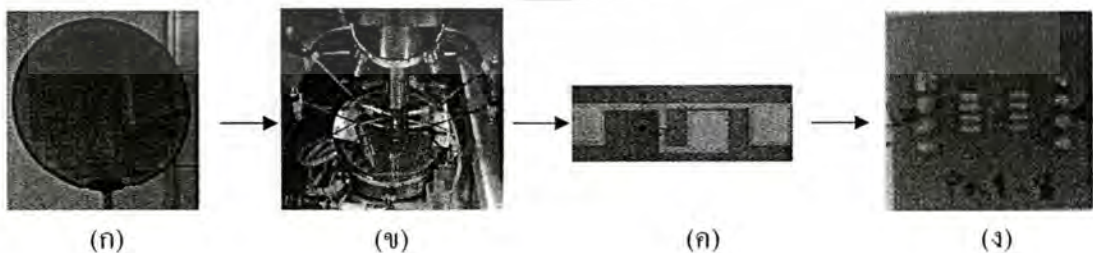
หมายเหตุ สัญลักษณ์สีและโครงสร้าง

ซิลิกอน ชนิดเอ็น	ฟิล์มซิลิกอนได ออกไซด์	ฟิล์มซิลิกอน ไนไตรด์	ฟิล์มโพลี ซิลิกอน	โพลี อีพ็อกซีเรซิน	ฟิล์มโลหะ อะลูมิเนียม

รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางแสดงลำดับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ

4.5 ขั้นตอนการ Packages บนแผ่น PCB

เมื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันเสร็จ (ก) ขั้นตอนต่อมาจะทำการวัดค่าความต้านทาน  $R_m$  และ  $R_{ref}$  ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ในแต่ละแผ่นเวเฟอร์ (ข) ซึ่งแสดงค่าความต้านทานที่วัดได้ดังตารางที่ 5.1 โดยนำแผ่นเวเฟอร์ที่วัดทดสอบเรียบร้อยแล้วมาตัด (ค) และบรรจุลงบนแผ่นลวดลายวงจรหรือ PCB ที่ออกแบบไว้หลังจากนั้นเชื่อมต่อสายลวดโลหะระหว่างแพดที่อยู่บนอุปกรณ์ตรวจจับความดันกับ PCB (ง) ซึ่งมีรูปลำดับ ขั้นตอนการ package ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลำดับการบรรจุอุปกรณ์ตรวจจับความดันลงแผ่น PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของอุปกรณ์ตรวจจับความดันเปียโซรีซิสทีป ที่มีพื้นที่ของโพสิซีลิกอนไดอะแฟรมขนาด 100x100 ตารางไมครอนที่ความหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน โดยนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างเสร็จวัดความต้านทานที่ขั้วรอยต่อระหว่างตัวต้านทานโพสิรีซิสเตอร์  $R_M$  และ  $R_{ref}$  ด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าก่อนนำไปบรรจุลงแผ่น PCB ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.1 สำหรับการทดลองการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบ่งออกเป็น 3 ส่วนซึ่งประกอบด้วยการทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิสำหรับนำไปวิเคราะห์ค่า TCR และการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความดันกับความต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  ดังรูปที่ 5.1 ถึง 5.6 การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ความดันตั้งแต่ 1 บาร์ ถึง 15 บาร์ที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $120^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.14 และการทดลองที่ 3 เป็นการทดลองที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศตั้งแต่ความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1,000 มิลลิบาร์ ซึ่งในการทดลองที่ 2 และ 3 เป็นการวัดค่าเข้าที่พุดจากอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ต่อเป็นวงจรวีทส โคนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์ เพื่อชดเชย อุณหภูมิโดยมีรายละเอียดดังนี้

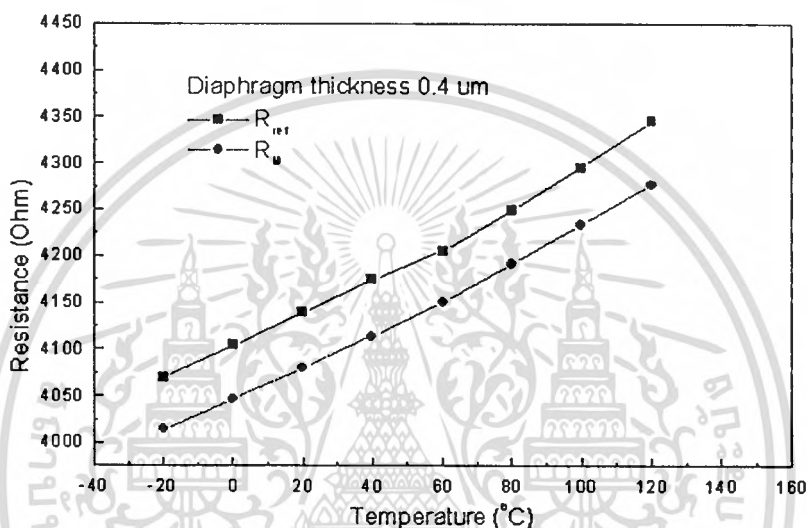
ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนาต่าง ๆ

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความต้านทาน (Ohm)	
	$R_M$	$R_{ref}$
0.4	4062	4138
0.8	3964	4046
1.5	3914	4012

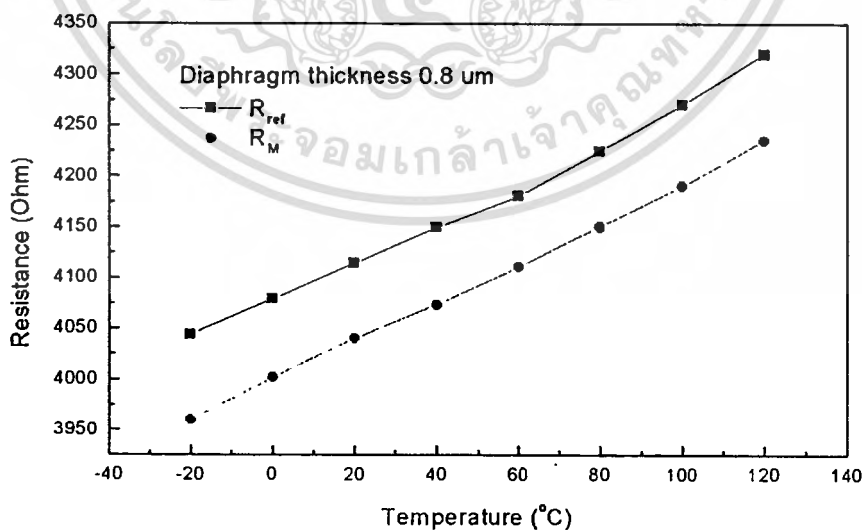
จากผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานที่รอยต่อของตัวต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  ซึ่งค่าความต้านทานในแต่ละขนาดความหนาของไดอะแฟรมมีค่าความต้านทานที่ไม่เท่ากัน โดยมีผลต่างของค่าความต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  ไม่เกิน 100 โอห์ม

## 5.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อการเปลี่ยนค่าความต้านทาน $R_{ref}$ และ $R_M$ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

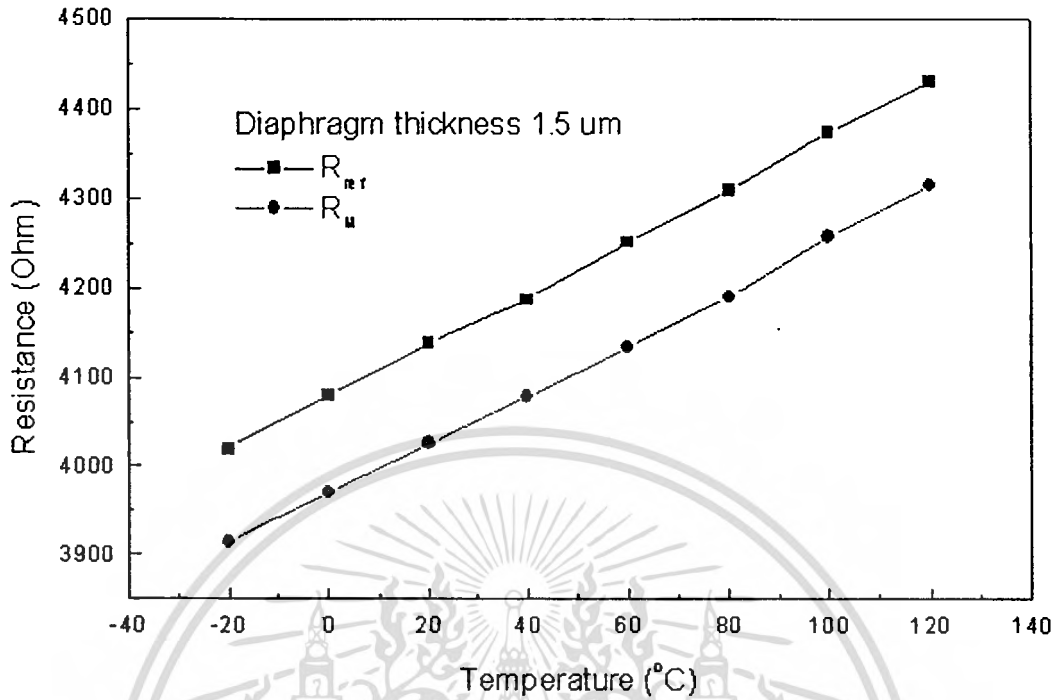
การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาค่า TCR และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดัน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลีซิลิกอนไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้



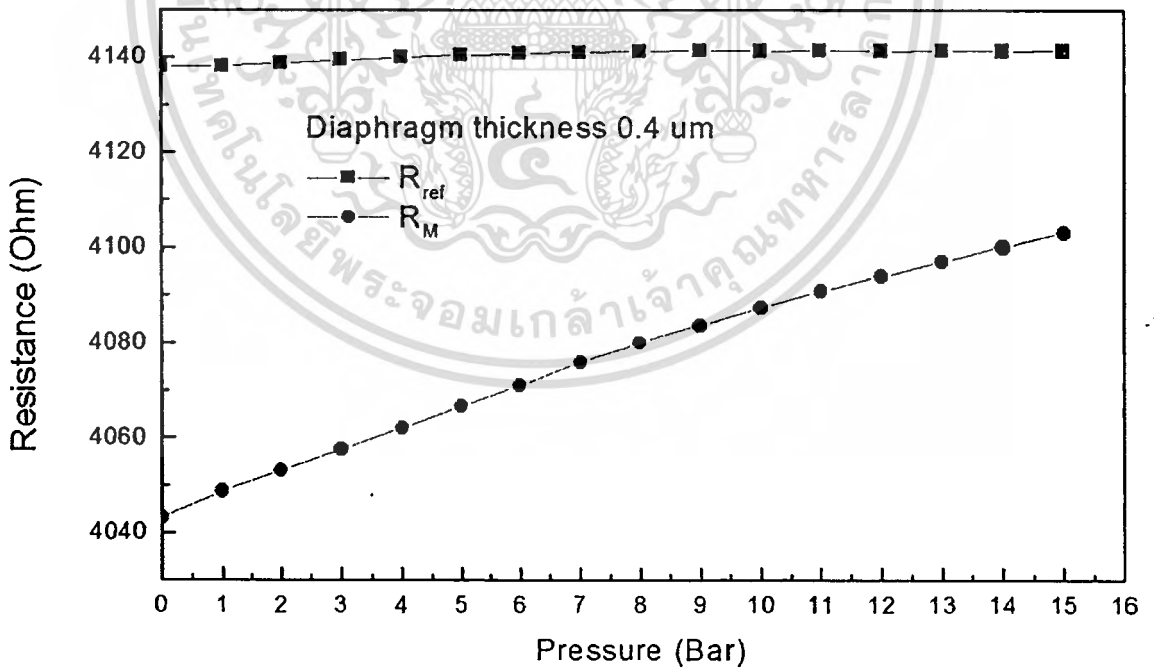
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน

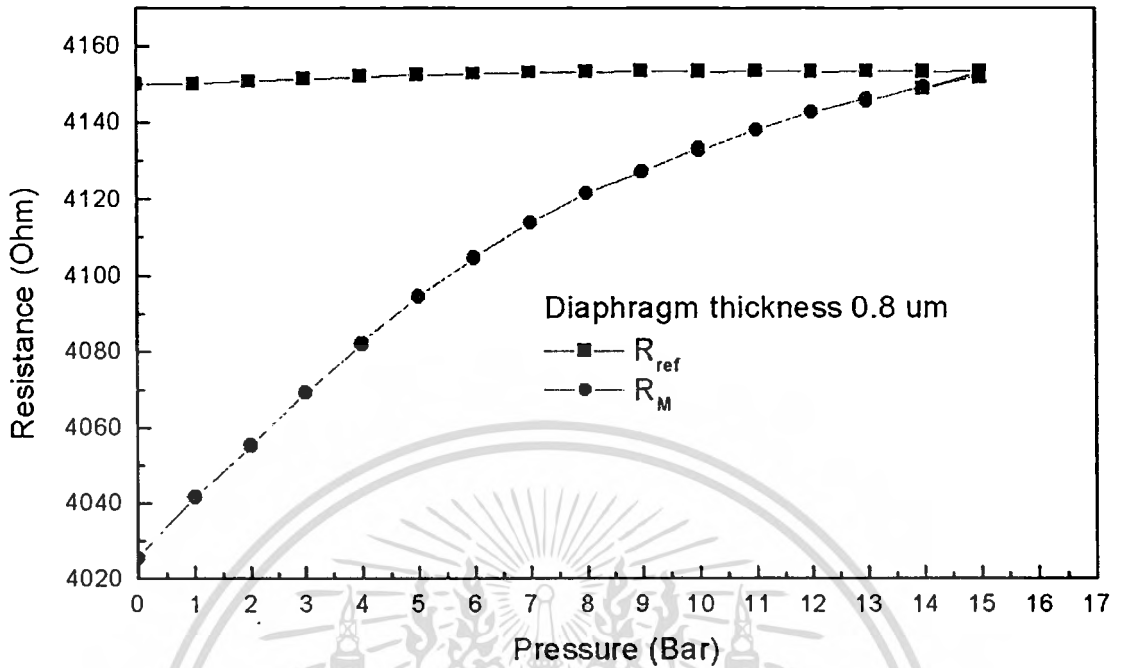


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน

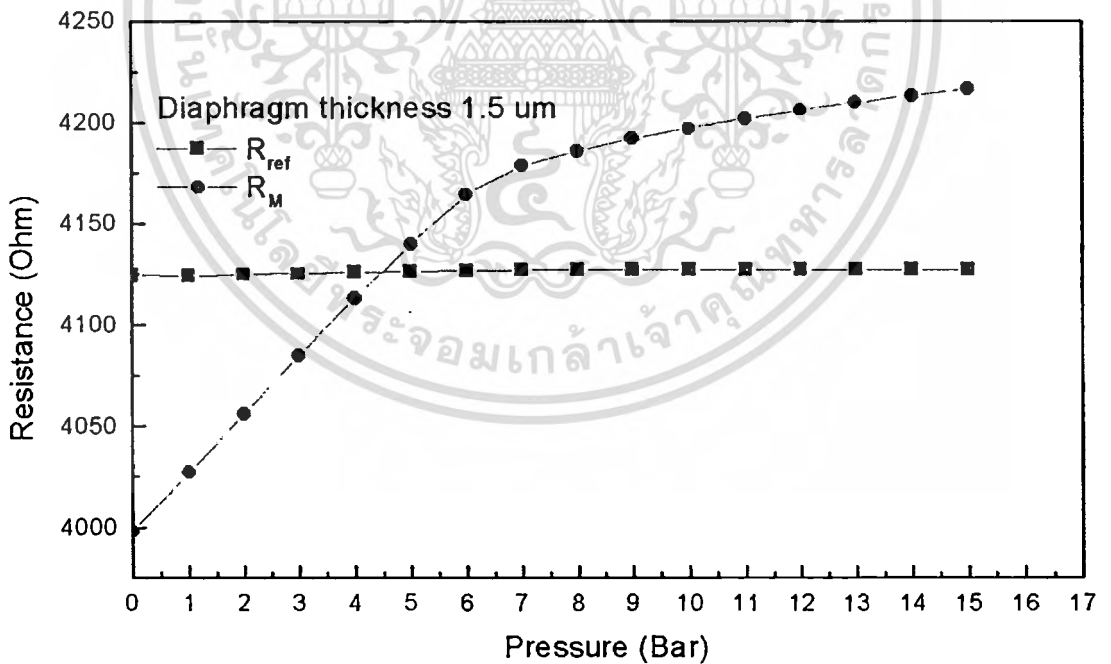


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าความต้านทานที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าความต้านทานที่ไดอะเฟรมหนา 0.8 ไมครอน

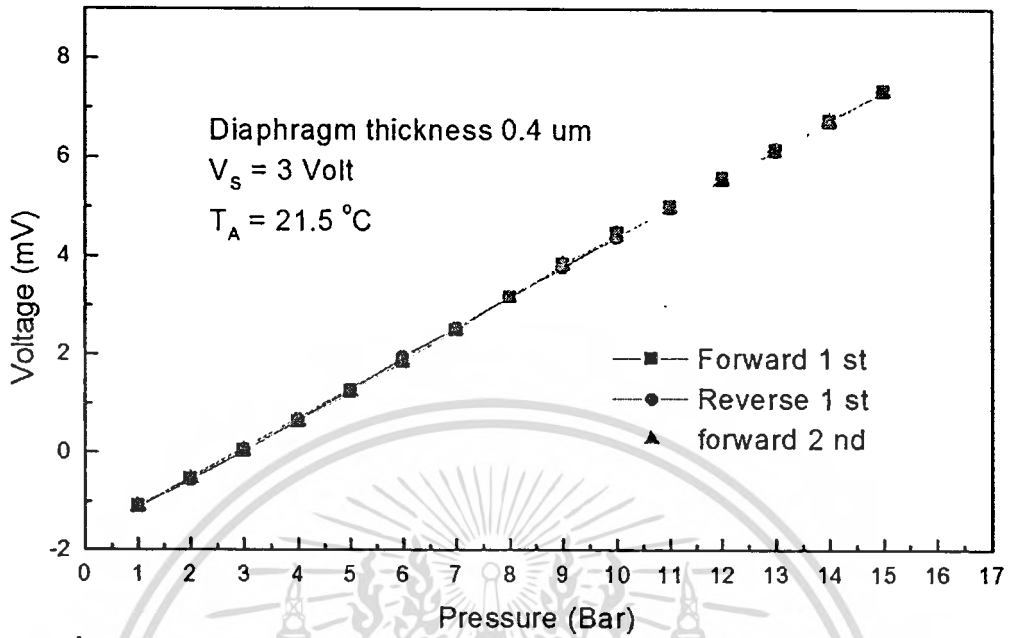


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าความต้านทานที่ไดอะเฟรมหนา 1.5 ไมครอน

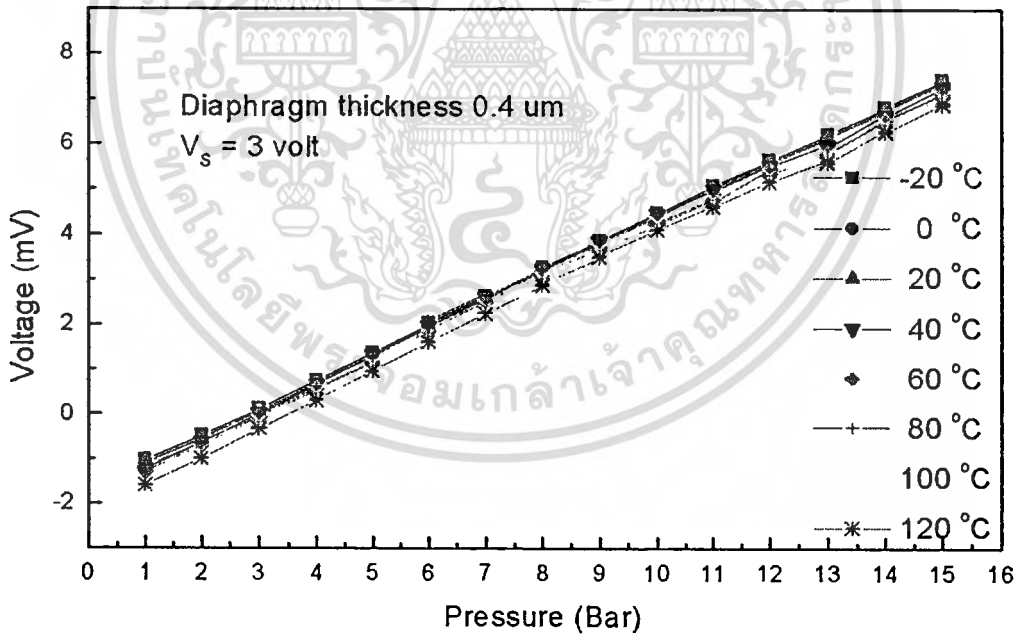
จากผลการทดลองในรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 เป็นผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไคอะแพรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน ซึ่งผลจากการทดลองเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น โดยแสดงเป็นคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานที่มีค่าเป็นบวก ซึ่งมีความชันที่เท่ากันแต่ความต้านทานเริ่มต้นของตัวต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  มีค่าไม่เท่ากัน โดยในรูปที่ 5.4 ถึง 5.6 เป็นผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าความต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  ซึ่งตัวต้านทาน  $R_M$  มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามความดัน แต่ตัวต้านทาน  $R_{ref}$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามความดัน ดังนั้นตัวต้านทาน  $R_M$  เท่านั้นที่มีการเปลี่ยนค่าความต้านทานตามความดัน อีกทั้งการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันมีย่านความดันในการใช้งานและความเป็นเชิงเส้นไม่เท่ากันตลอดย่านความดันที่วัดทดสอบ และสำหรับการทดสอบที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศที่ใช้ทดสอบมีลักษณะผลการทดลองที่ไม่ละเอียด และอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้อ้างอิงความดันภายในแชมเบอร์มีย่านความดันและความละเอียดไม่เท่ากัน ดังนั้นการทดลองในหัวข้อที่ 5.2 และ 5.3 จึงแบ่งการทดลองและผลการทดลองออกเป็น การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์ และการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์ ตามลำดับ โดยมีผลการทดลองดังนี้

## 5.2 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพสิซีลิกอนไคอะแพรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน โดยต่ออุปกรณ์ตรวจจับความดันเป็นแบบวงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฮาร์ฟบริดจ์และใช้ความดันทดสอบตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์ ซึ่งวัดทดสอบไปกลับหนึ่งรอบครั้งโดยเพิ่มความดันครั้งละ 1 บาร์แสดงดังรูปที่ 5.7, 5.9 และ 5.11 เพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าฮิสเตอร์รีซิส ความไวในการตอบสนองต่อความดัน ความเป็นเชิงเส้น และย่านความดันในการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน และผลการทดลองในรูปที่ 5.8, 5.10 และ 5.12 เป็นผลการทดลองเพื่อศึกษาการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยใช้ความดันทดสอบตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์และอุณหภูมิระหว่าง  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $120^{\circ}\text{C}$  ซึ่งนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการชดเชยอุณหภูมิ เช่น สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ (TCO) และสัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ (TCS) ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 6 ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลอง

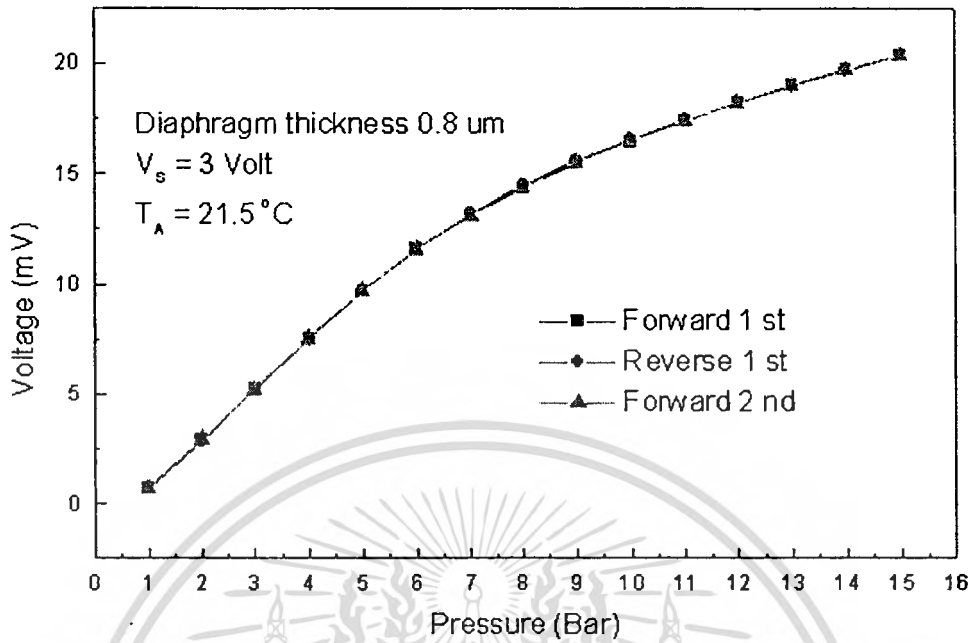


รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน

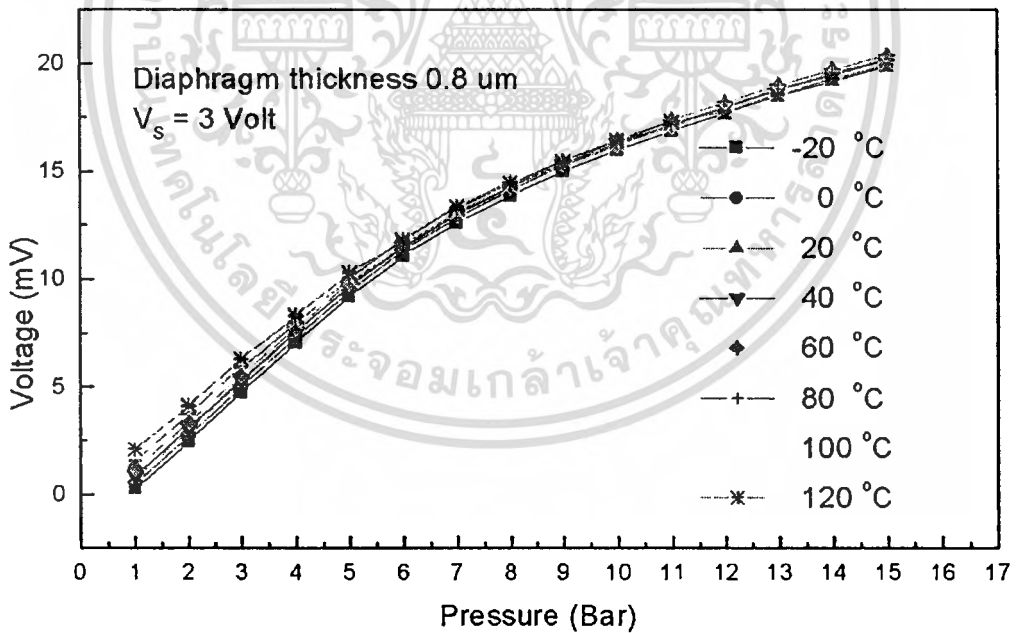


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20 °C ถึง 120 °C ที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน

\*\*หมายเหตุ Forward 1 st คือ เข้าที่พุทขาขึ้นรอบแรก และ Reverse 1 st คือ เข้าที่พุทขาลงรอบแรก

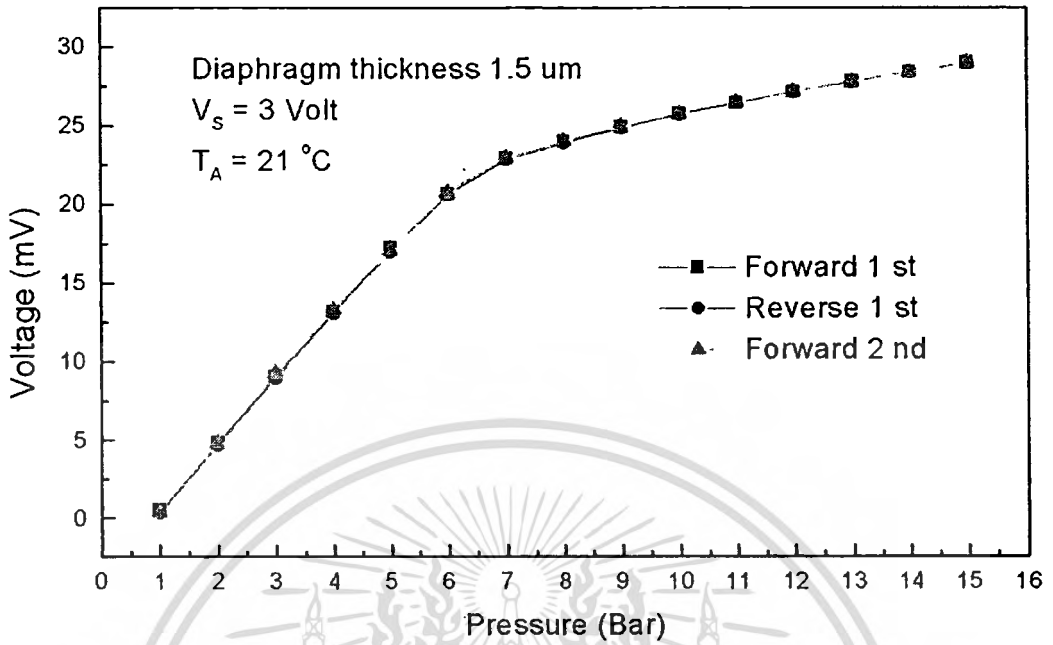


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน

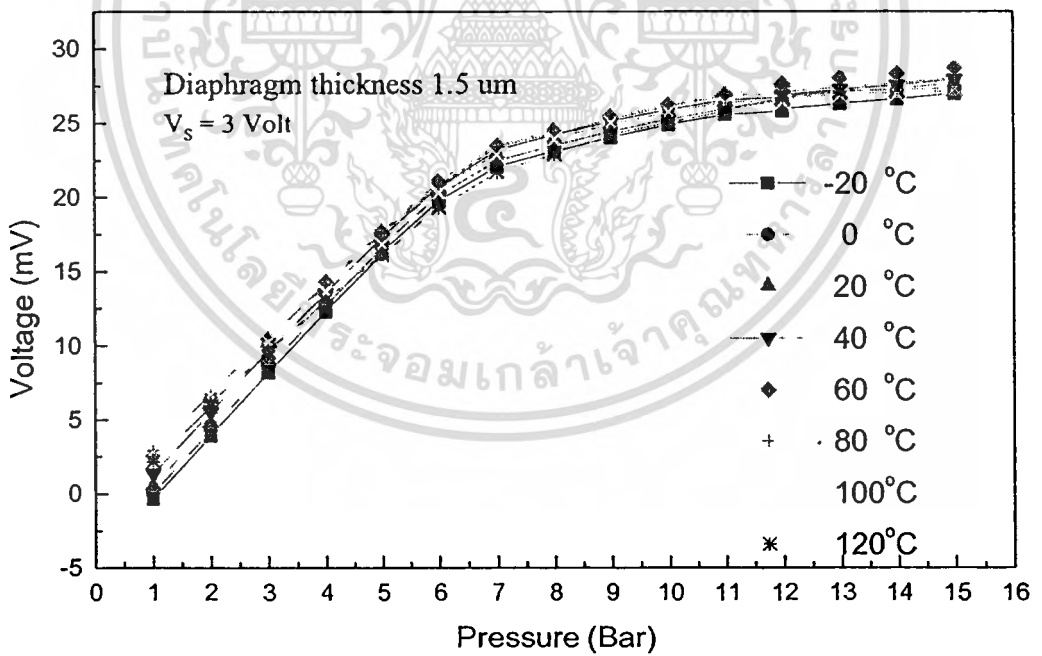


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20 °C ถึง 120 °C ที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน

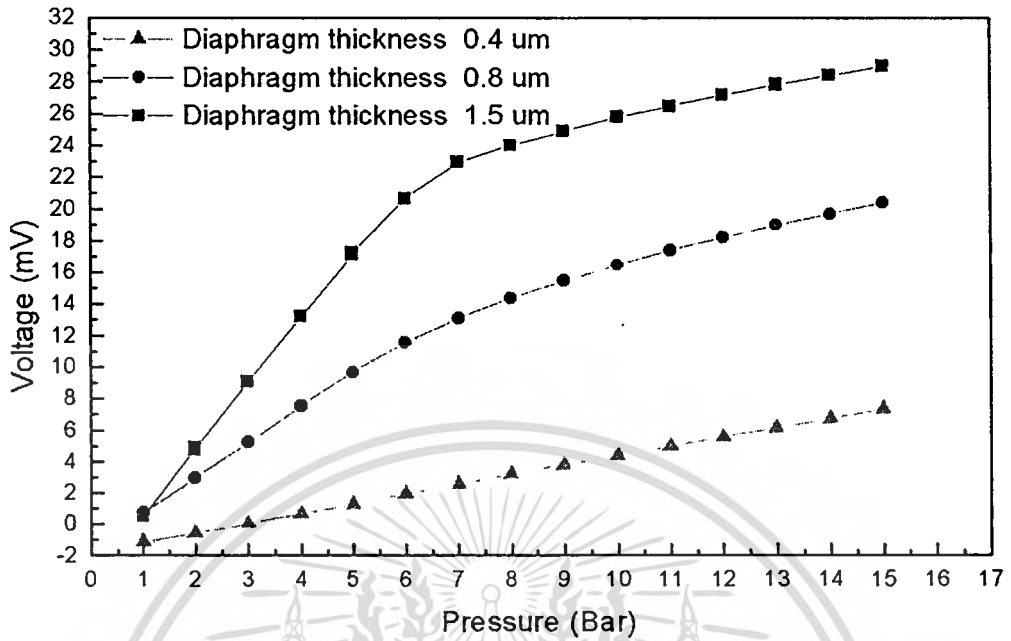
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20  $^\circ\text{C}$  ถึง 120  $^\circ\text{C}$  ที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน

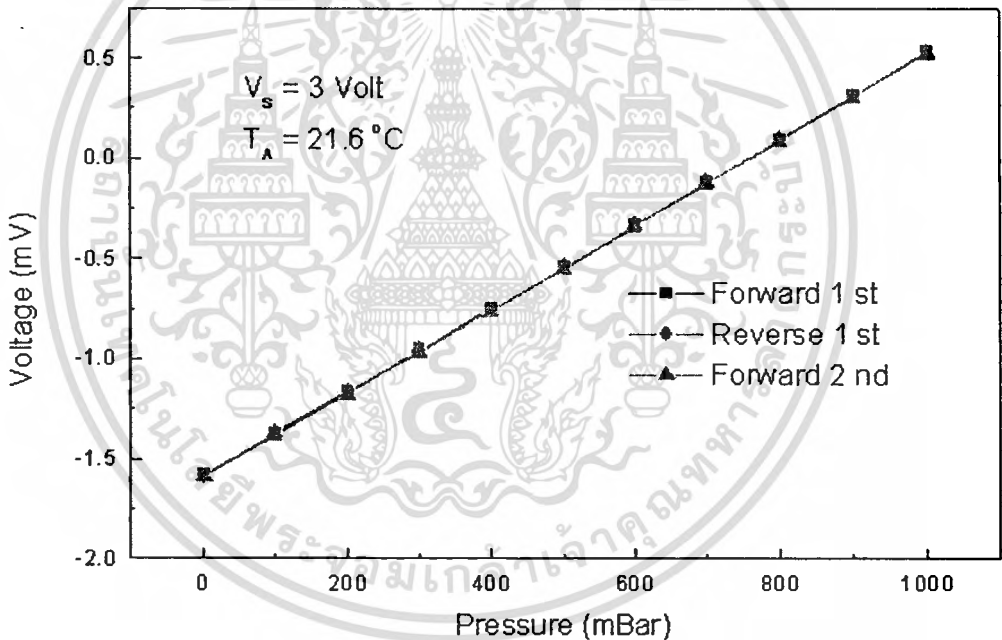


รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน

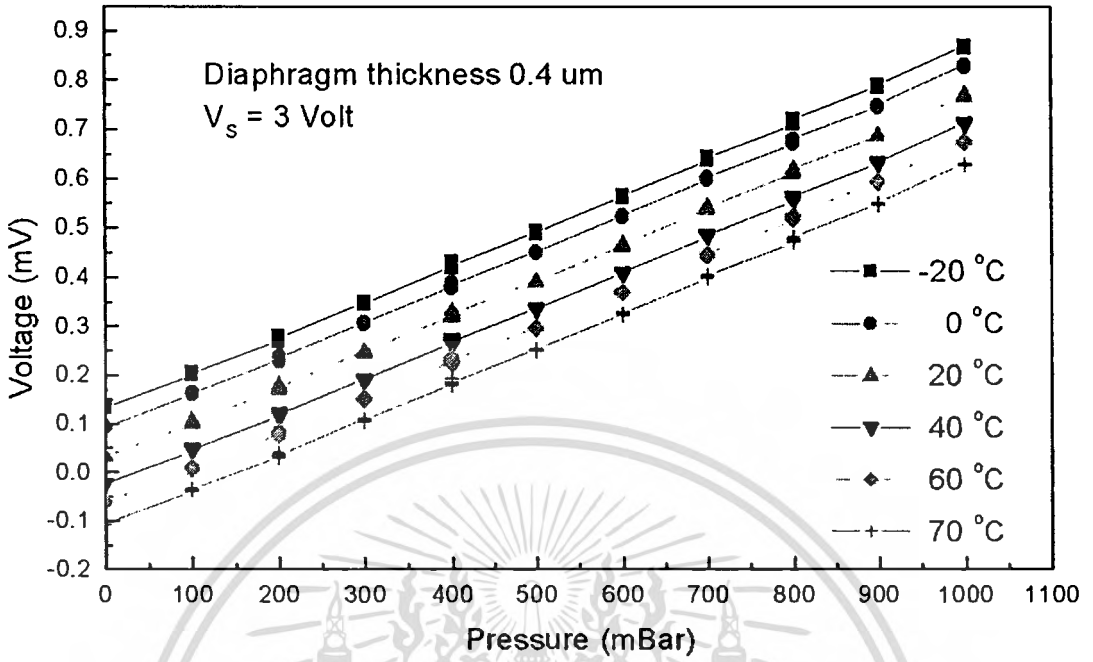
จากผลการทดลองการตอบสนองความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน ดังรูปที่ 5.7, 5.9 และ 5.11 ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับความดันสามารถตอบสนองความดันตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์ได้และมีย่านการทำงาน 2 ย่านความดันที่ความดันตั้งแต่ 1-7 บาร์และ 8-15 บาร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอนและมีย่านการทำงานที่ความดัน 1-6 บาร์และ 7-15 บาร์ที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอนมีย่านการทำงาน 1 ย่านความดันที่ความดัน 1 ถึง 15 บาร์และเมื่อพิจารณาความไวในการตอบสนองต่อความดัน พบว่าอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนมีความไวในการตอบสนองต่อความดันมากกว่าอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีไดอะแฟรมหนา 0.8 และ 0.4 ไมครอนตามลำดับ ดังรูปที่ 5.13 โดยไดอะแฟรมที่มีความหนา 0.4 ไมครอนเหมาะต่อการนำไปใช้งานตลอดย่านการทำงาน 1 ถึง 15 บาร์เนื่องจากมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี แต่มีความไวในการตอบสนองต่อความดันน้อยสุด

### 5.3 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์

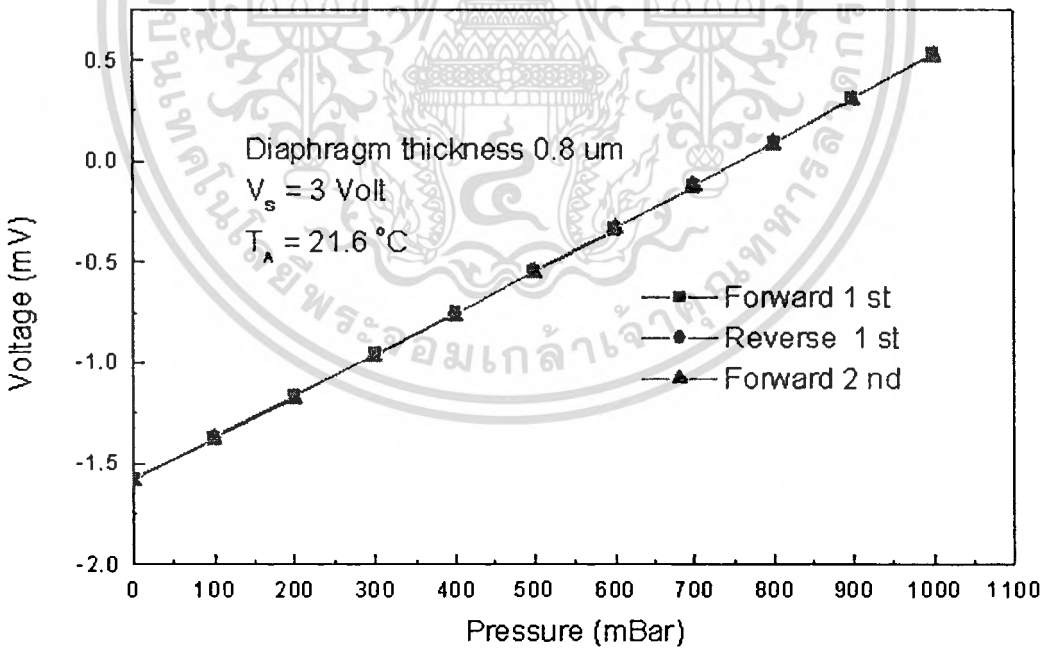
การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา การตอบสนองความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน โดยใช้ความดันทดสอบตั้งแต่ความดันบรรยากาศคือ 1000 มิลลิบาร์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศดูดความดันภายในแชมเบอร์ให้มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศถึง 1 มิลลิบาร์และทดลองที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $70^{\circ}\text{C}$  โดยวัดทดสอบไปกลับ 1 รอบครั้งเพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ค่าฮิสเตอร์รีซิส ความไวในการตอบสนองต่อความดัน ความเป็นเชิงเส้น และย่านความดันในการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน

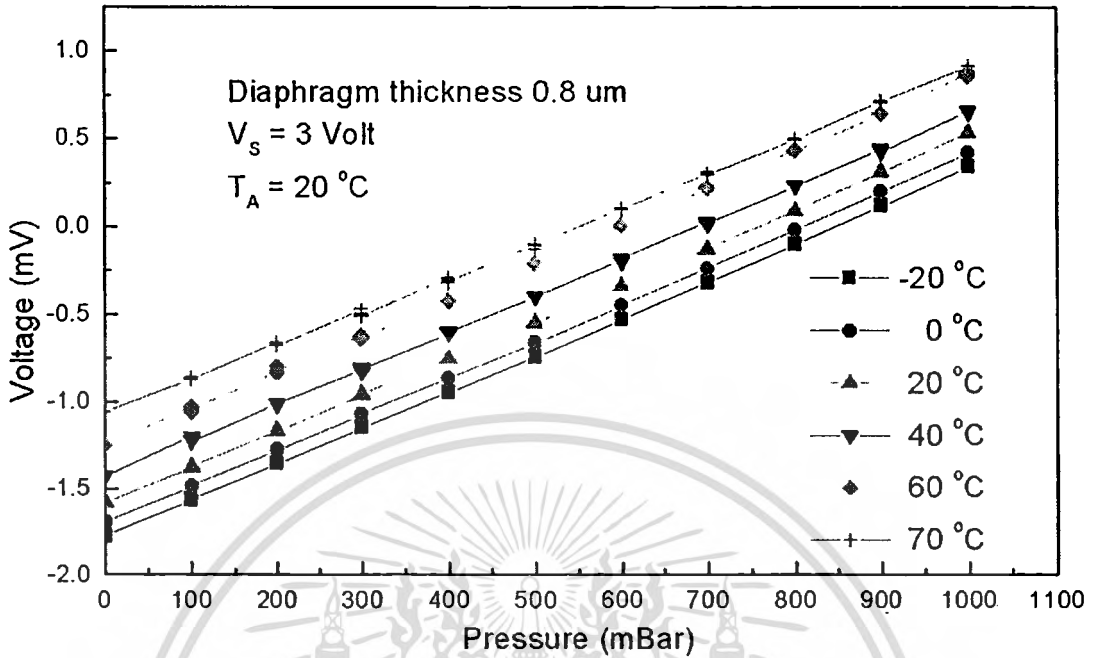


รูปที่ 5.15 ผลของการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน

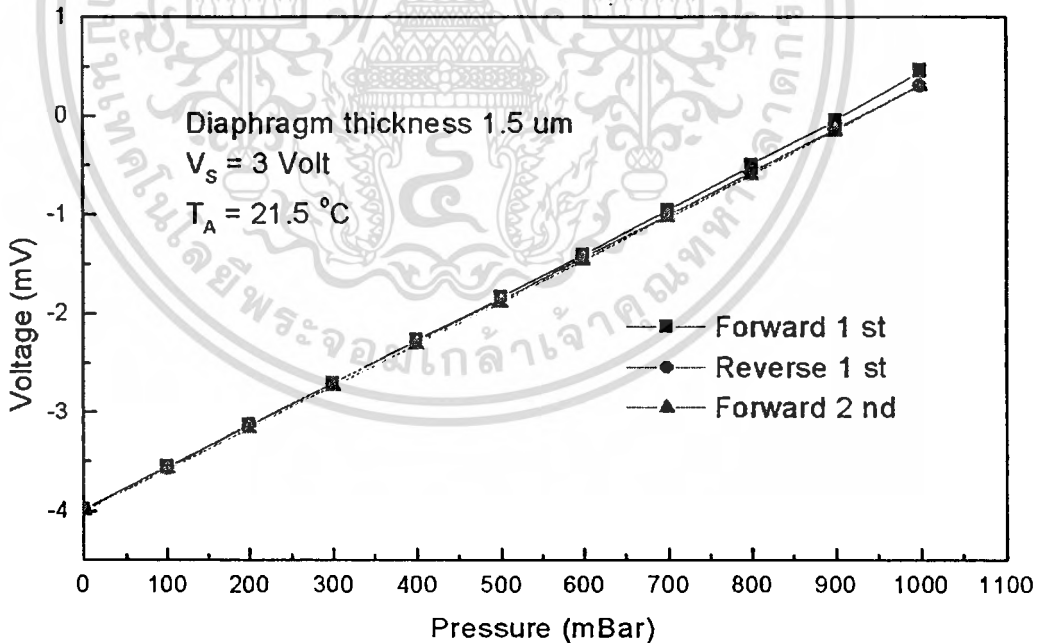


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน

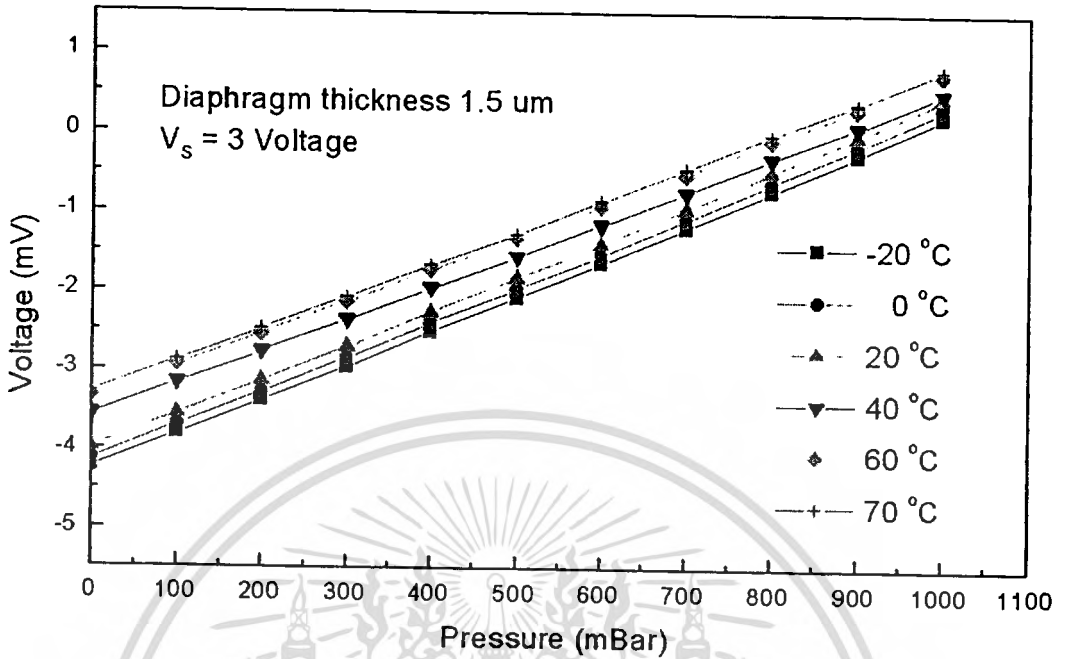
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



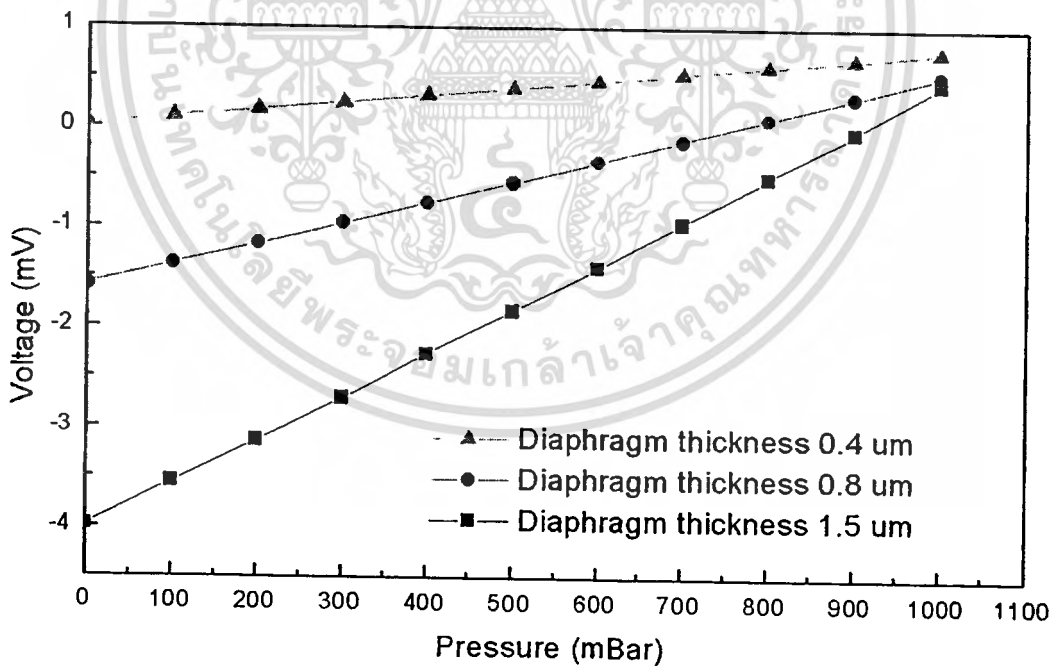
รูปที่ 5.17 ผลของการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน



รูปที่ 5.19 ผลของการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน



รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 , 0.8 และ 1.5 ไมครอน

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.14 , 5.16 และ 5.18 เป็นผลการทดลองการตอบสนองต่อความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอนโดยรูปที่ 5.15, 5.17 และ 5.19 เป็นผลของการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ตรวจจับความดันสามารถตอบสนองที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศได้ และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.20 เป็นผลการเปรียบเทียบความไวในการตอบสนองต่อความดัน โดยไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนมีความไวในการตอบสนองความดันที่มากกว่าไดอะแฟรมหนา 0.8 และ 0.4 ไมครอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

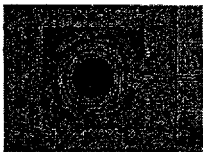
## บทที่ 6

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับในบทที่ 6 นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อแสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในลำดับแรกเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดันด้วยกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูลักษณะของโครงสร้าง Cavity และความหนาของชั้นโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันซึ่งมีไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน เพื่อนำผลการวิเคราะห์มาสนับสนุนผลการทดลอง และนำผลการทดลองในบทที่ 5 มาวิเคราะห์หาค่า TCR ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิ การวิเคราะห์ค่าความเป็นเชิงเส้นเพื่อแบ่งย่านความดันสำหรับการนำไปใช้งาน การวิเคราะห์ค่าความไวในการตอบสนองต่อความดัน การวิเคราะห์ค่าฮิสเตอร์รีซิส และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการชดเชยอุณหภูมิ อาทิเช่น ค่า TCO และค่า TCS ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองที่นำมาวิเคราะห์จะแสดงผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิ เมื่อนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

#### 6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

การวิเคราะห์โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน หลังกระบวนการสร้างเสร็จเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาให้อุปกรณ์ตรวจจับความดัน ที่สร้างขึ้นใหม่ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นอีกทั้งสามารถอธิบายการทำงานและพฤติกรรมได้ ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างที่จะกล่าวเป็นการอธิบายลักษณะของการตีพื้นล่าง Cavity ของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม ที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยในรูปที่ 6.1 แสดงลักษณะด้านบนของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน



(ก)



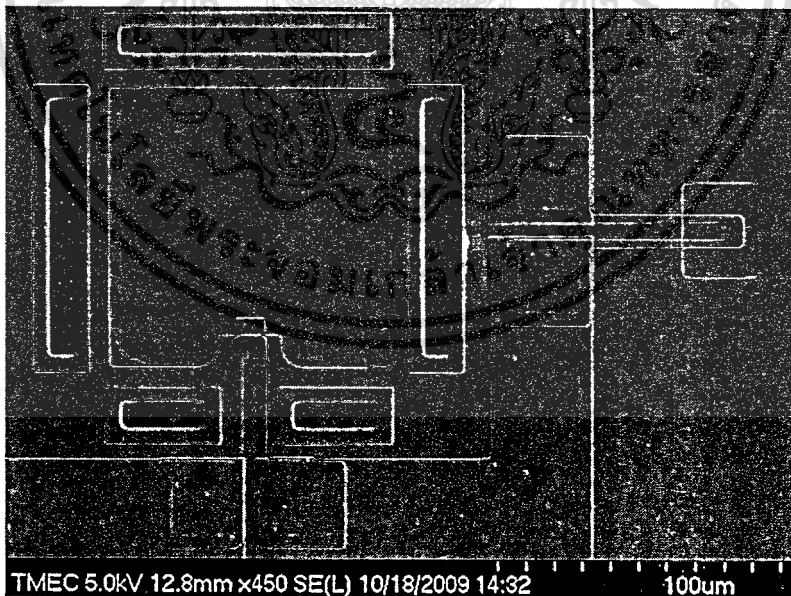
(ข)



(ค)

รูปที่ 6.1 ด้านบนของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีความหนา (ก) 0.4 ไมครอน (ข) 0.8 ไมครอน และ (ค) 1.5 ไมครอน ที่สร้างจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

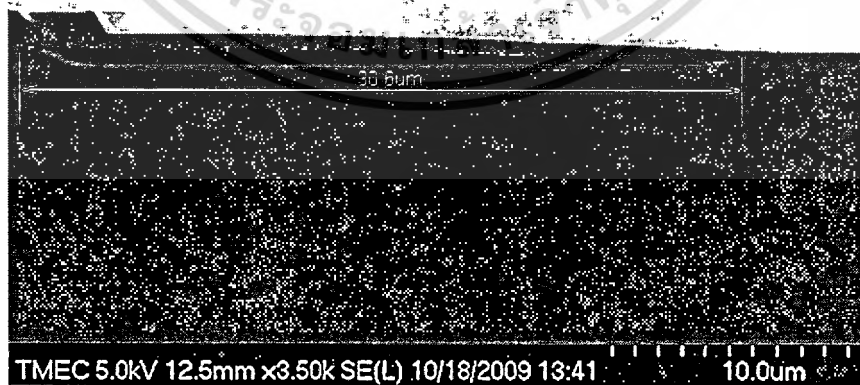
พิจารณาจากรูป 6.1(ก) ที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอนบริเวณกึ่งกลางของไดอะแฟรมมีลักษณะของสีน้ำตาลเข้มซึ่งเป็นลักษณะการติดพื้นด้านล่างของ Cavity ซึ่งมีระยะห่างของการติดพื้นจากบริเวณขอบของ Cavity เท่ากับ 30.6 ไมครอนแสดงดังรูปที่ 6.4 ซึ่งเป็นภาพตัดขวางที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งผลของการติดพื้นล่าง Cavity ของไดอะแฟรมทำให้การแอ่นตัวลงเนื่องจากความดันเกิดเฉพาะบริเวณขอบของไดอะแฟรมเท่านั้น จึงทำให้การตรวจจับความดันมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเนื่องจากบริเวณขอบของไดอะแฟรม จะเกิดการแอ่นตัวน้อยกว่าบริเวณกึ่งกลางของไดอะแฟรม ทำให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันลดน้อยลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในบทที่ 5 ส่วนกรณีของไดอะแฟรมที่ความหนา 0.8 ไมครอนไดอะแฟรมมีลักษณะการแอ่นตัวแบบเป็นคลื่นดังรูปที่ 6.7 จึงทำให้การแอ่นตัวลงของไดอะแฟรมเนื่องจากความดันมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดระยะนาบของไดอะแฟรม จึงทำให้การตอบสนองต่อความดันไม่เท่ากันตลอดย่านความดันที่วัดทดสอบส่งผลให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนที่ไดอะแฟรมมีลักษณะขนานกับ Cavity ซึ่งยังไม่ติดพื้นล่างของ Cavity ทำให้การแอ่นตัวเนื่องจากความดันมีการเปลี่ยนแปลงทั่วแผ่นของไดอะแฟรม จึงทำให้การตรวจจับความดันดีกว่าไดอะแฟรมที่ความหนา 0.4 และ 0.8 ที่มีลักษณะการแอ่นตัวที่น้อยกว่า ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้สามารถอธิบายดังรูปถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 6.2 ด้านหน้าของโพลิซิลิคอนไดอะแฟรม โพลิซิลิคอนตรวจจับความดัน และโพลิซิลิคอนตรวจจับอุณหภูมิที่มีโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน

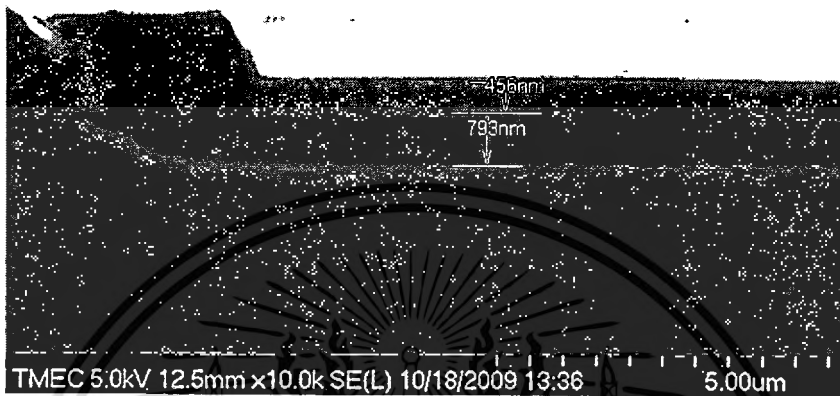


รูปที่ 6.3 ภาพตัดขวางของโพลีซิลิกอนไดอะไนไตรด์ที่มีความหนา 0.4 ไมครอน

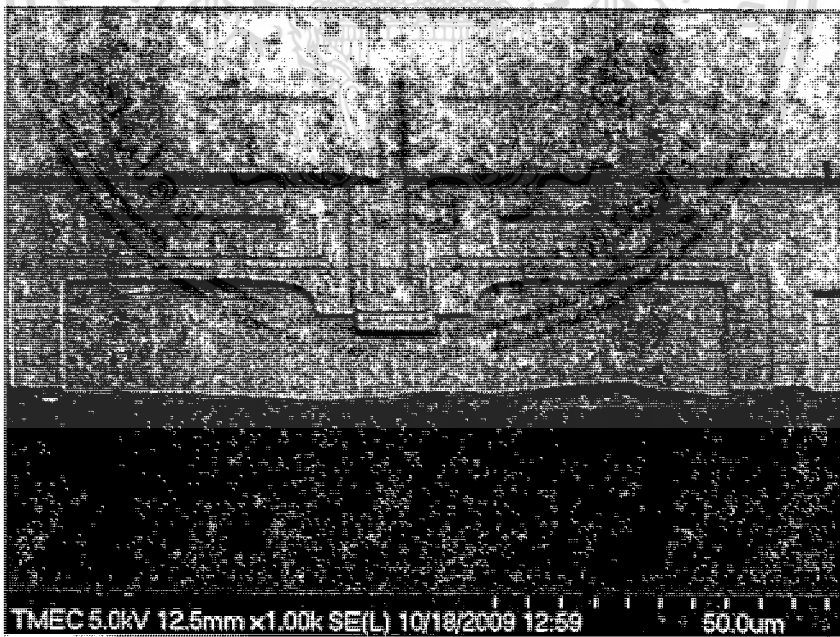


รูปที่ 6.4 บริเวณตำแหน่งที่เริ่มกัดพื้นล่าง Cavity ของโพลีซิลิกอนไดอะไนไตรด์หนา 0.4 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

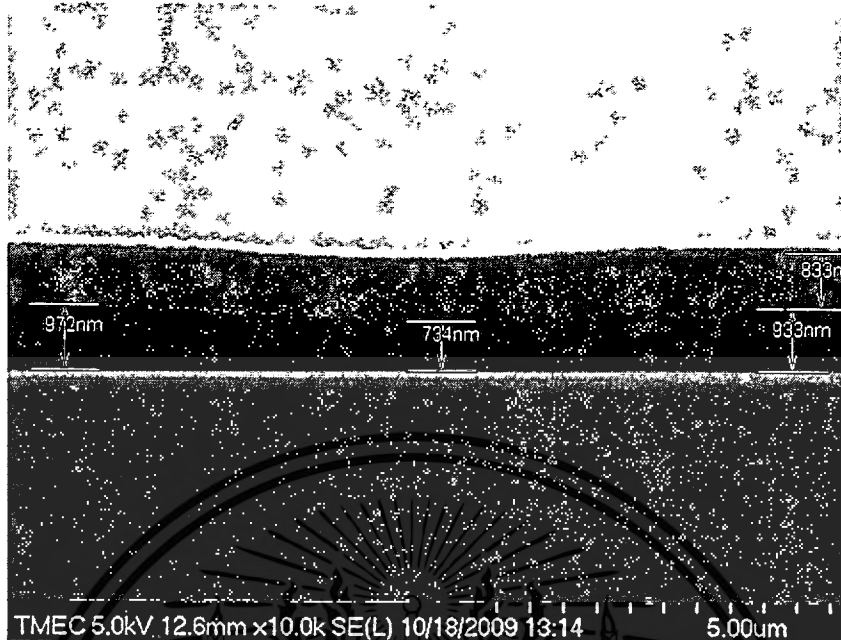


รูปที่ 6.5 ภาพตัดขวางแสดงความลึกของ Cavity และความหนาของโพลีซิลิกอนไดอะเฟรม ที่ความหนา 0.4 ไมครอนบริเวณขอบของ Cavity

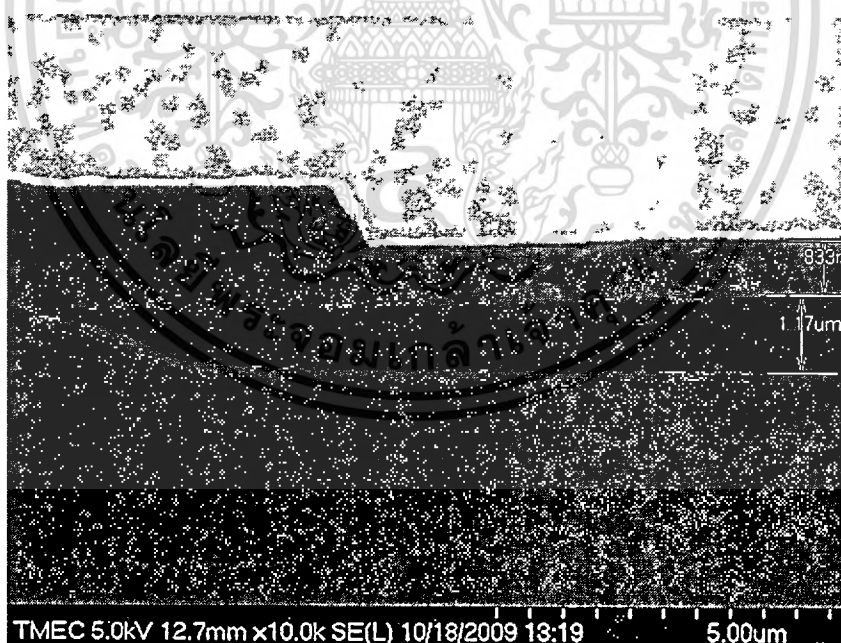


รูปที่ 6.6 ภาพตัดขวางของโพลีซิลิกอนไดอะเฟรม ที่ความหนา 0.8 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

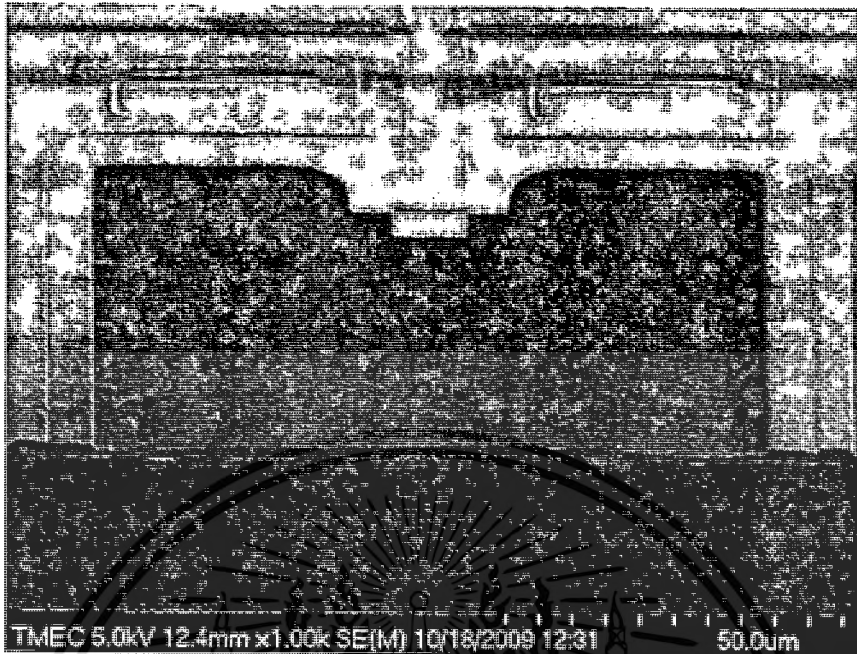


รูปที่ 6.7 ภาพตัดขวางแสดงการแอ่นตัวแบบคลื่นของของโพลีซิลิโคน ไซเคิลไดอะแมทรีน 0.8 ไมครอน

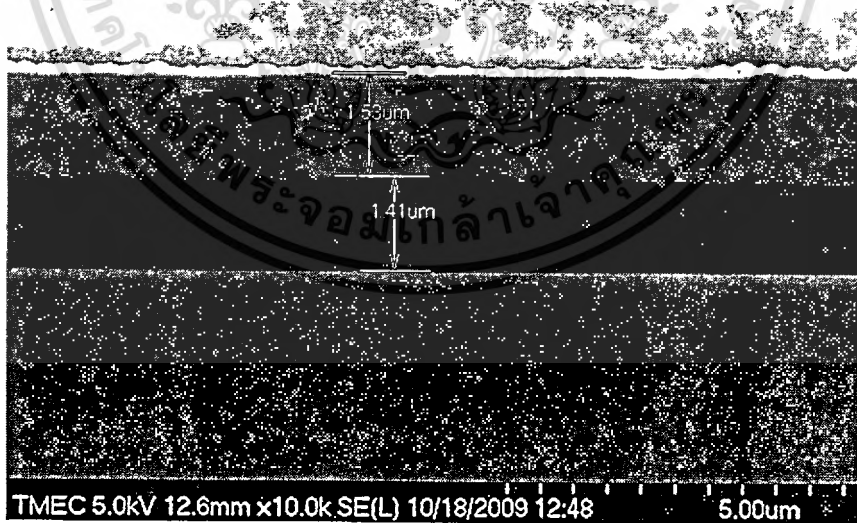


รูปที่ 6.8 ภาพตัดขวางแสดงความลึกของ Cavity และโพลีซิลิโคน ไดอะแมทรีน ที่ความหนา 0.8 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



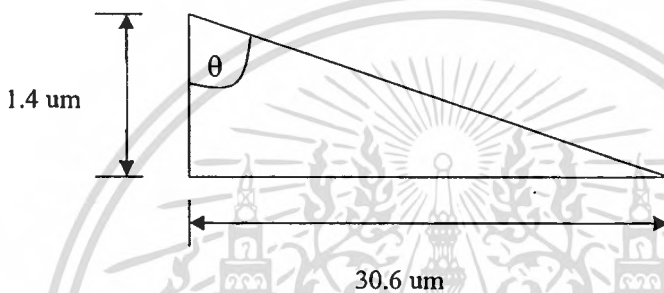
รูปที่ 6.9 ภาพตัดขวางของโพลีอิไมด์คอนไดอะเฟรม ที่ความหนา 1.5 ไมครอน



รูปที่ 6.10 ภาพตัดขวางแสดงความลึกของ Cavity และความหนาของโพลีอิไมด์คอนไดอะเฟรม ที่ความหนา 1.5 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถนำมาวิเคราะห์หาแนวโน้มการสร้างความลึกของ Cavity ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันให้มีความเหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาการติดพื้นล่าง Cavity ของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม จากความความลึกของ Cavity ที่มีค่าเท่ากับ 1.4 ไมครอนที่ได้จากการออกแบบ ซึ่งจากผลการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าที่โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอนได้แอ่นตัวลงติดพื้นล่าง Cavity โดยตำแหน่งที่ไดอะแฟรมเริ่มติดพื้นที่สั้นที่สุดคือ 30.6 ไมครอนซึ่งมีลักษณะการแอ่นตัวแบบสามเหลี่ยมมุมฉาก ดังนั้นจึงใช้หลักการทางคณิตศาสตร์คำนวณหาความลึกของ Cavity ที่ไม่ทำให้ไดอะแฟรมติดพื้น ดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบความลึกของ Cavity เพื่อแก้ปัญหาการติดพื้นของไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน

จากรูปจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tan(\theta) = 30.6/1.4 = 21.86$$

$$\theta = \tan^{-1}(21.86)$$

$$\theta = 87.38$$

ถ้าต้องการสร้าง ฟิล์ม โพลีซิลิคอน ไดอะแฟรม ที่มีขนาดพื้นที่  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  หนา  $0.4 \mu\text{m}$  จะได้ว่า

$$100/x = \tan(87.36)$$

$$x = 4.611 \mu\text{m}$$

$$\text{หรือ } x \approx 5 \mu\text{m}$$

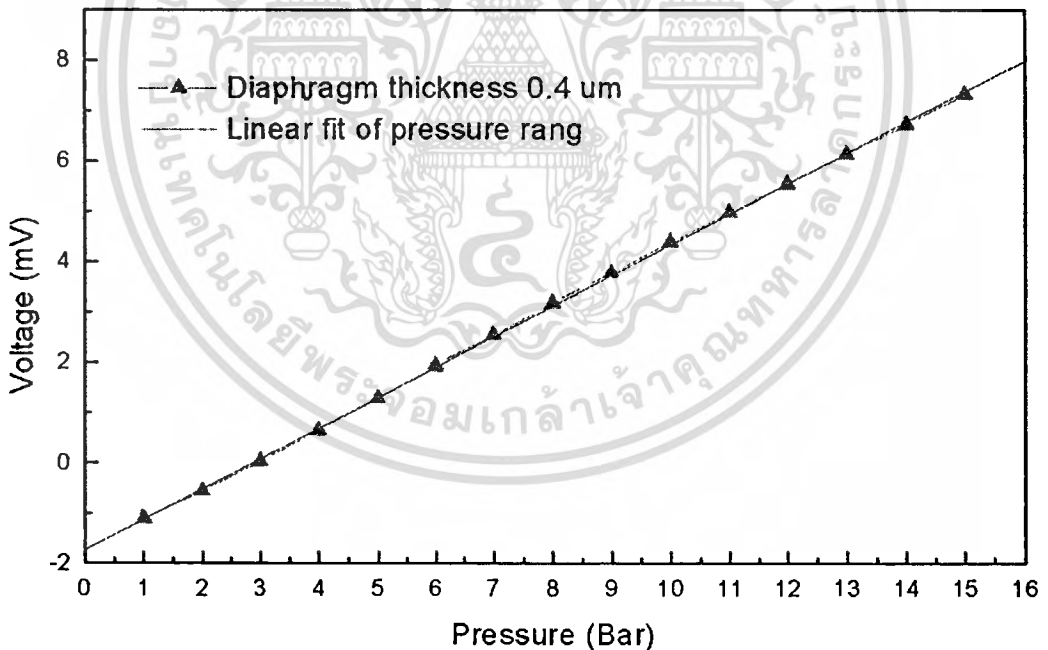
ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีพื้นที่โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด  $100 \times 100$  ตารางไมครอนและความหนา  $0.4$  ไมครอน จะต้องสร้างและออกแบบให้ Cavity มีความลึกประมาณ  $5$  ไมครอนเพื่อแก้ปัญหาการติดพื้นล่างของ Cavity

## 6.2 การวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับ

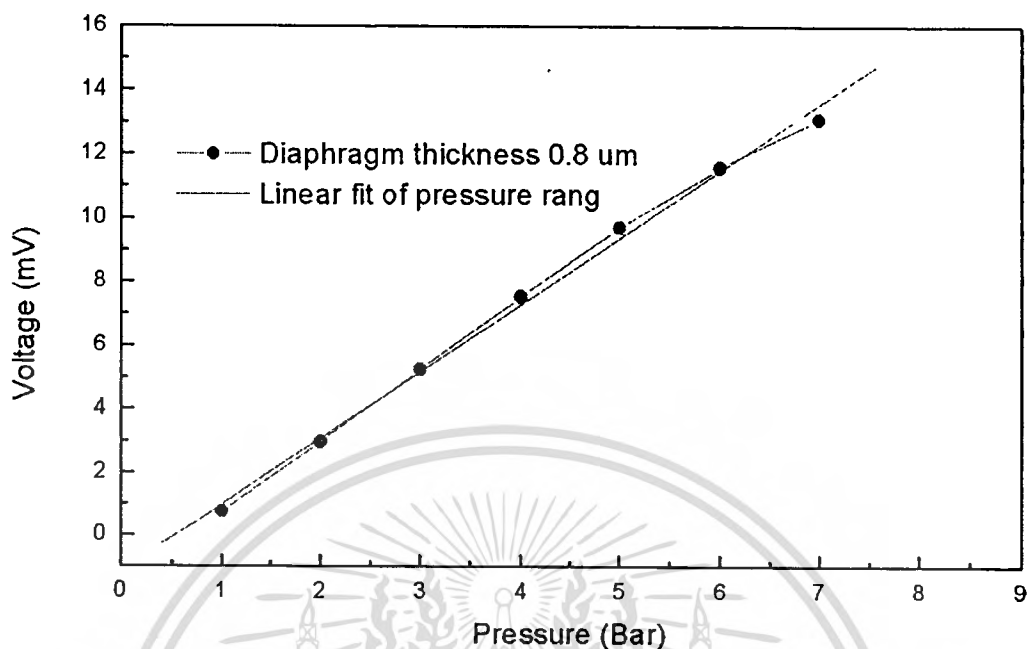
### ความดัน

จากผลการทดลองของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันสำหรับการนำไปใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันทดสอบ 1 ถึง 15 บาร์และความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศที่ความดัน 1 มิลลิบาร์ถึง 1000 มิลลิบาร์ ซึ่งจากผลการทดลองของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีความหนาของไดอะแฟรมที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันสำหรับการใช้งานที่ต่างกัน โดยการวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นใช้หลักการ fit linear ผลการทดลองระหว่างความดันกับค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยสมการเส้นตรง เพื่อหาย่านการทำงาน ดังรูปที่ 6.12 ถึง 6.19 ซึ่งพิจารณาจากความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน จากผลการวิเคราะห์แสดงย่านความดันสำหรับการนำไปใช้งานและความเป็นเชิงเส้นดังตารางที่ 6.1 และ 6.2

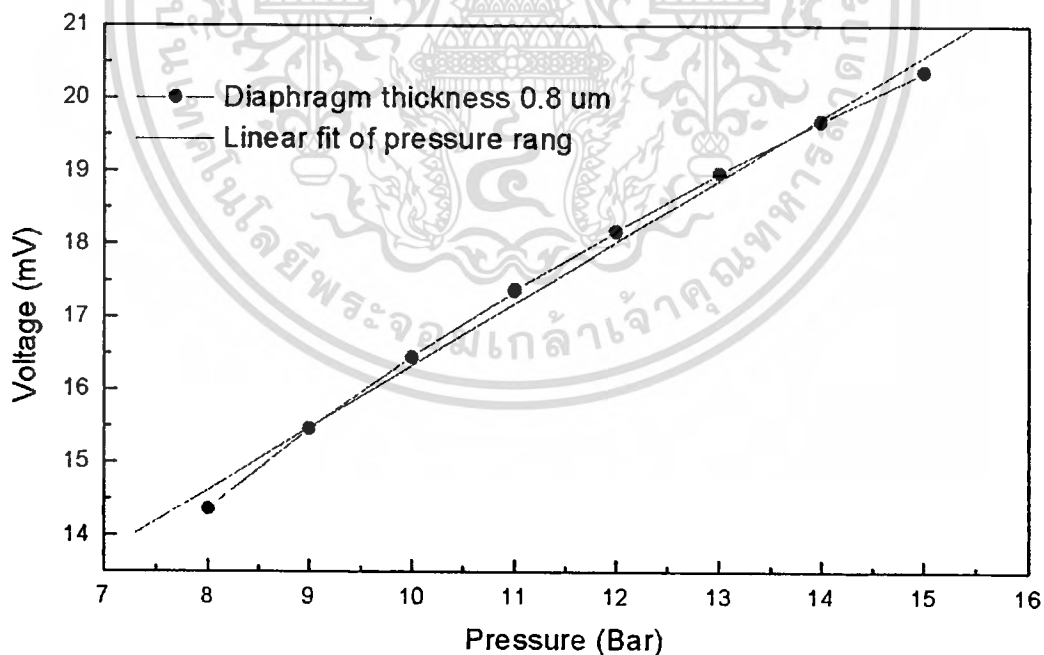
### 6.2.1 การวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันการใช้งานที่ความดันตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์



รูปที่ 6.12 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรม หนา 0.4 ไมครอน  
ที่ย่านความดัน 1 ถึง 15 บาร์

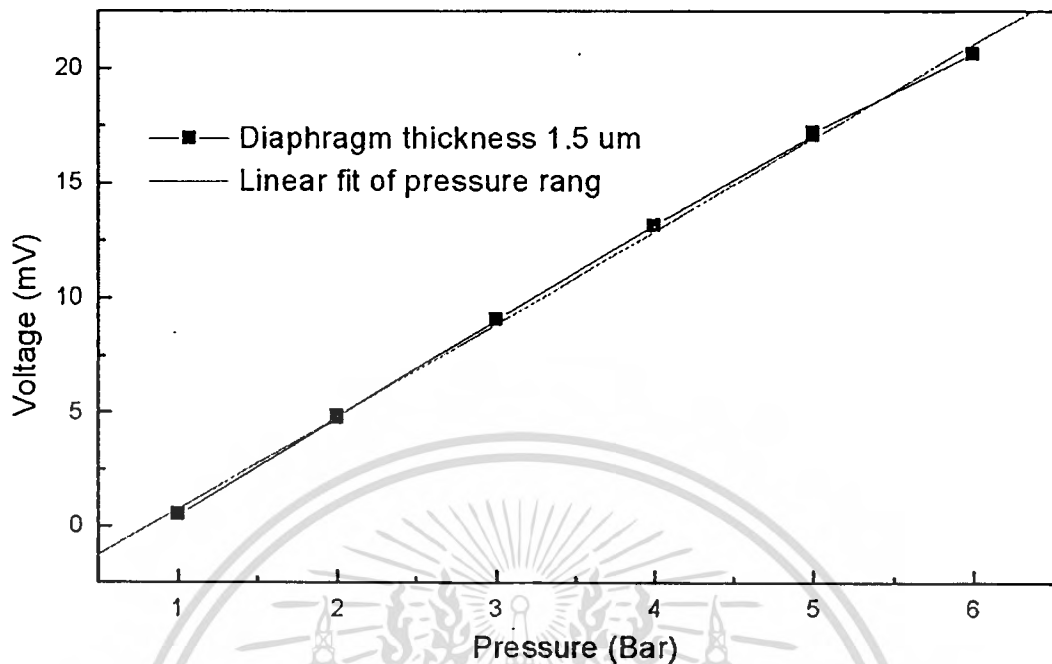


รูปที่ 6.13 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจวัดความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 ถึง 7 บาร์

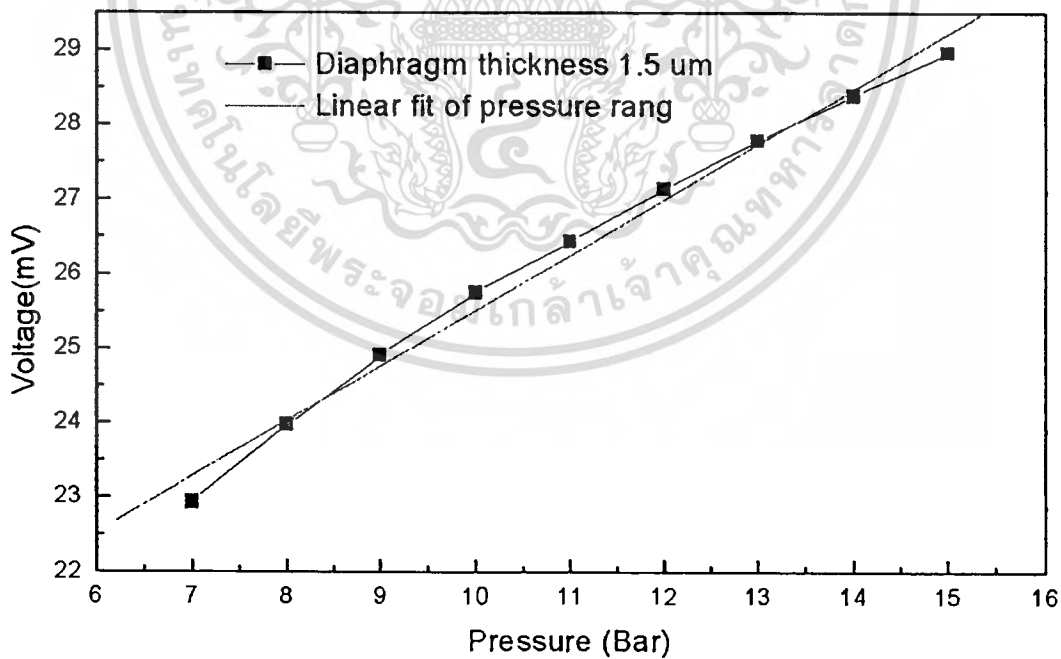


รูปที่ 6.14 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจวัดความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน ที่ย่านความดัน 8 ถึง 15 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 ถึง 6 บาร์



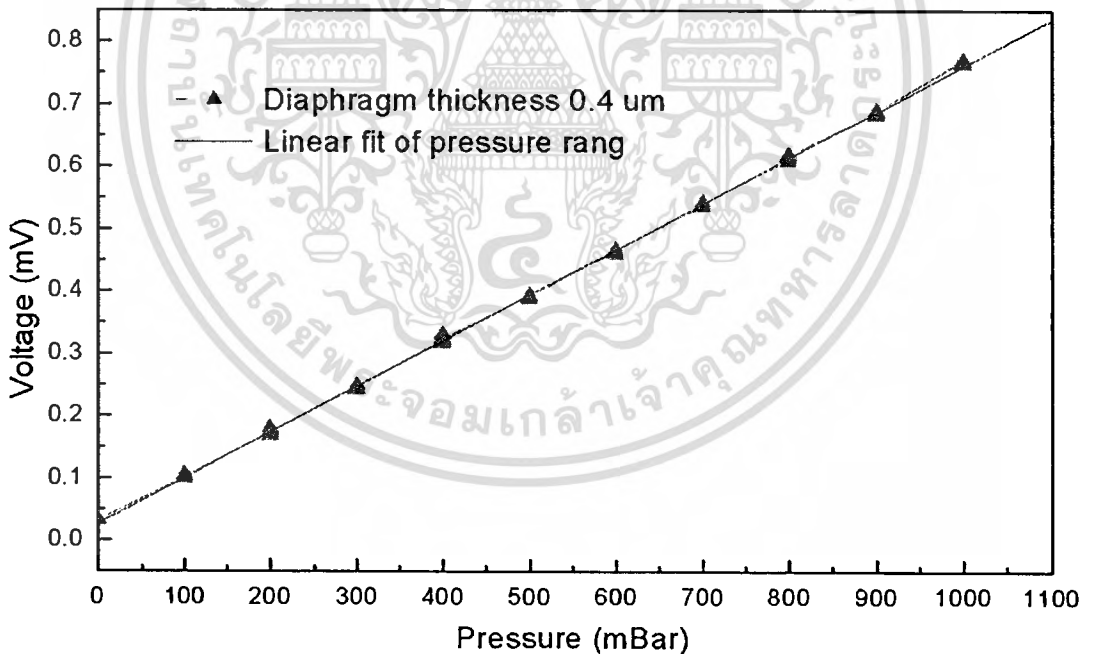
รูปที่ 6.16 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน ที่ย่านความดัน 7 ถึง 15 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

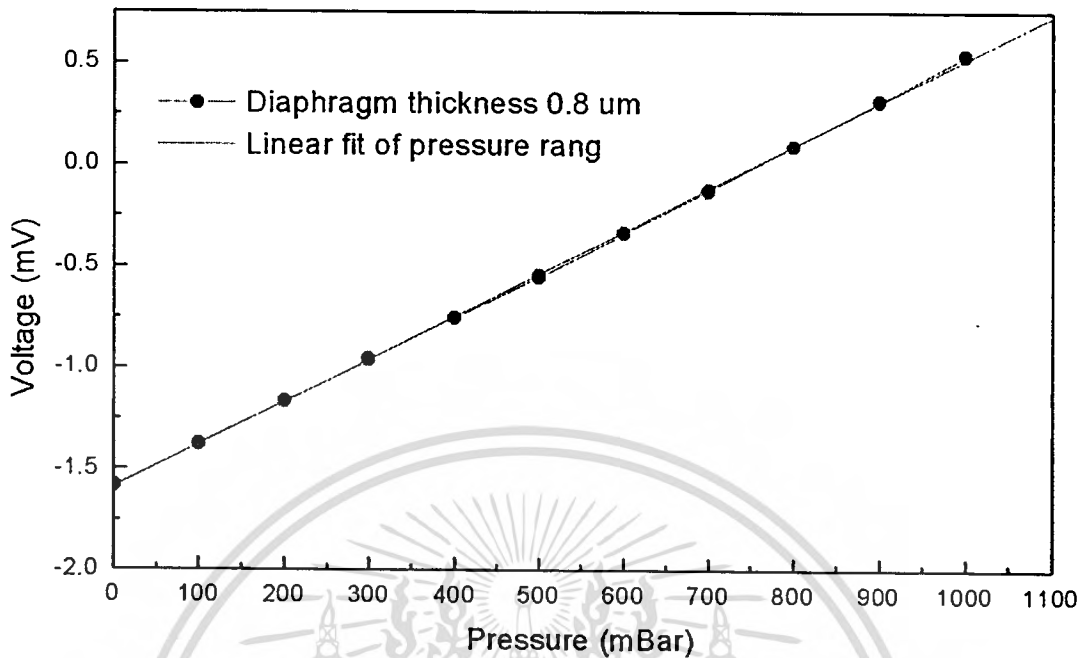
ตารางที่ 6.1 ย่านความดันและความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจวัดความดันที่ความดัน 1 ถึง 15 บาร์

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ย่านความดัน (Bar)	ความเป็นเชิงเส้น (%FSO)
0.4	1 - 15	99.9
0.8	1 - 7	99.8
	8 - 15	99.7
1.5	1 - 6	99.9
	7 - 15	99.5

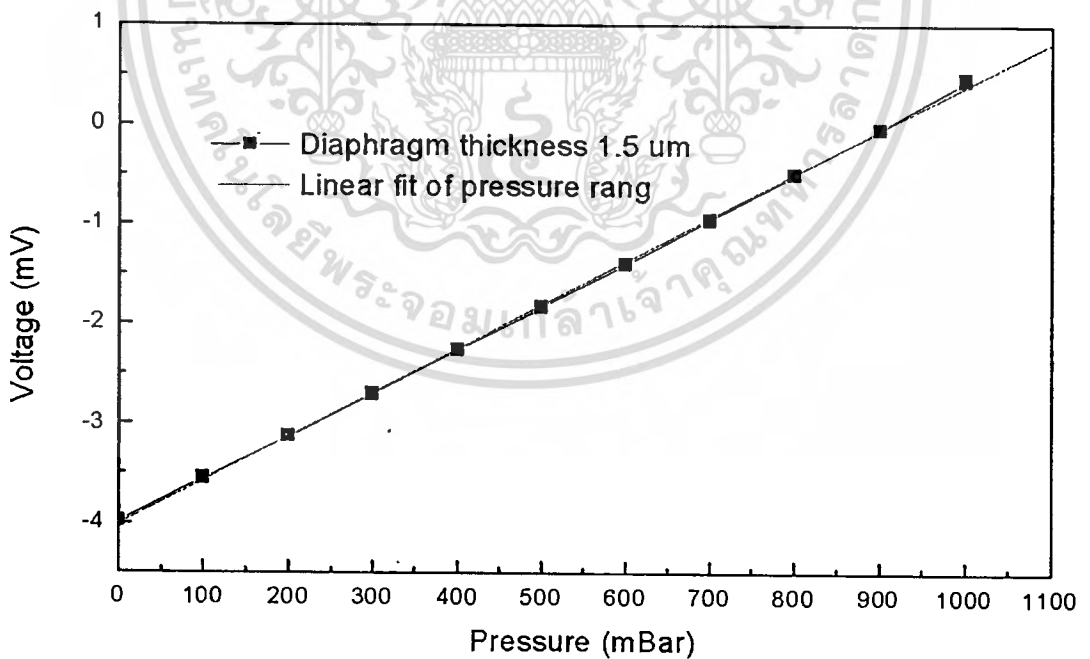
6.2.2 การวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์



รูปที่ 6.17 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจวัดความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์



รูปที่ 6.18 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์



รูปที่ 6.19 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน ที่ย่านความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์

ตารางที่ 6.2 ย่านความดันการใช้งานและความเป็นเชิงเส้นที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ย่านความดัน (mBar)	ความเป็นเชิงเส้น (%FSO)
0.4	1 - 1000	99.9
0.8	1 - 1000	99.9
1.5	1 - 1000	99.9

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ที่ไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน พบว่าการตอบสนองต่อความดันตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.8 และ 1.5 ไมครอนมีลักษณะการทำงานเป็น 2 ย่านความดันคือที่ความดัน 1 – 7 บาร์, 8 – 15 บาร์ และ 1 – 6 บาร์, 7 – 15 บาร์ ตามลำดับ สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอน มีย่านการทำงานเพียง 1 ย่านความดันคือความดันตั้งแต่ 1 – 15 บาร์ และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าที่ย่านความดันตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์พบว่าอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอนสามารถตรวจจับความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศได้ และจากผลการวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้น โดยใช้สมการเส้นตรง fit linear กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Origin เพื่อหาความเป็นเชิงเส้นจากค่าอาร์สแควร์ ซึ่งค่าความเป็นเชิงเส้นที่ดีควรมีค่าอาร์สแควร์เท่ากับ 1 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ควรมีค่าเท่ากับ 100 % ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าความเป็นเชิงเส้นดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 99.9 %FSO และน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 99.5 %FSO ซึ่งนับว่าอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างขึ้นในแต่ละย่านความดันที่ใช้งานมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี

### 6.3 การวิเคราะห์ความไวในการตอบสนองต่อความดัน

การวิเคราะห์ความไวในการตอบสนอง จะพิจารณาตามลักษณะย่านความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยใช้สมการในการคำนวณหาความไวในการตอบสนองความดันดังสมการ

$$S = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta P} = \frac{\Delta V}{\Delta PV_i}$$

ซึ่งจากการคำนวณจากสมการ ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 6.3

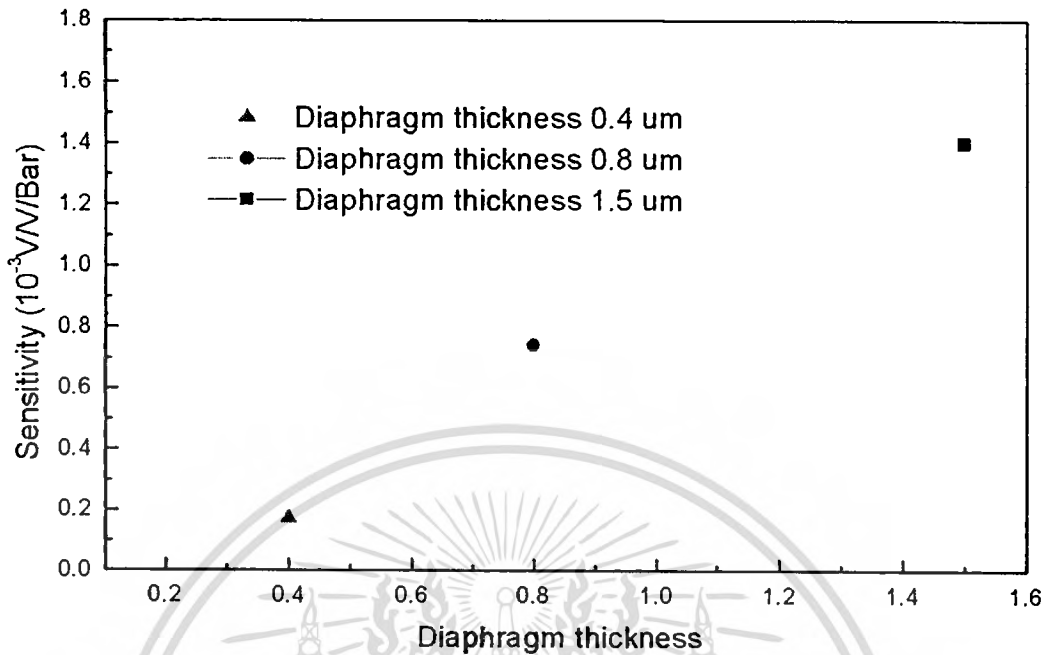
ตารางที่ 6.3 ความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดันตั้งแต่ 1 ถึง 15 บาร์

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ย่านความดัน (Bar)	ความไวในการตอบสนอง (V/V/Bar)
0.4	1 - 15	$0.20 \times 10^{-3}$
0.8	1 - 7	$0.685 \times 10^{-3}$
	8 - 15	$0.236 \times 10^{-3}$
1.5	1 - 6	$1.338 \times 10^{-3}$
	7 - 15	$0.251 \times 10^{-3}$

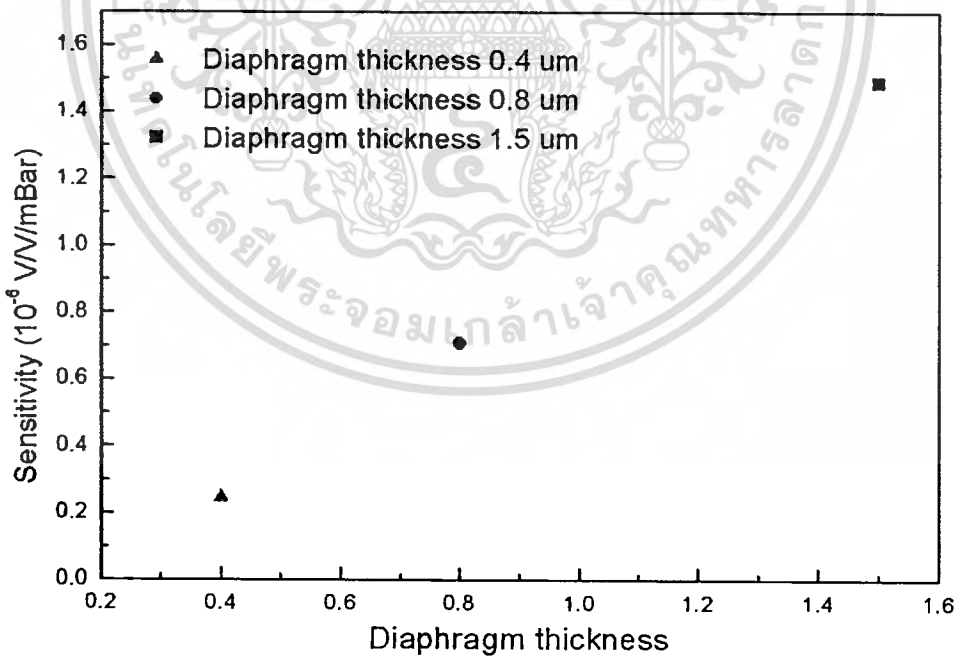
ตารางที่ 6.4 ความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ย่านความดัน (mBar)	ความไวต่อการตอบสนอง (V/V/mBar)
0.4	1 - 1000	$0.244 \times 10^{-6}$
0.8	1 - 1000	$0.709 \times 10^{-6}$
1.5	1 - 1000	$1.487 \times 10^{-6}$

เนื่องจากการทดลองที่ความดันตั้งแต่ 1 บาร์ ถึง 15 บาร์มีความเป็นเชิงเส้นและย่านความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเปรียบเทียบความไวในการตอบสนองต่อความดันทั้งโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน จึงใช้ย่านความดันที่เท่ากันมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ซึ่งใช้ย่านความดันตั้งแต่ 1 ถึง 2 บาร์ และที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์แสดงดังรูปที่ 6.19 และ 6.20 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมและความไวในการตอบสนองต่อความดัน จากการวิเคราะห์พบว่าโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนมีความไวในการตอบสนองต่อความดันที่สูงกว่าโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.8 และ 0.4 ไมครอน



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของโพลิซิติคอนไดอะแฟรมกับความไวในการตอบสนองที่ความดัน 1 ถึง 2 บาร์



รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของโพลิซิติคอนไดอะแฟรมกับความไวในการตอบสนองที่ความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 1000 มิลลิบาร์

## 6.4 การวิเคราะห์ค่าฮิสเตอร์รีซิส

ค่าฮิสเตอร์รีซิสเป็นคุณสมบัติที่แสดงความสามารถในการวัดซ้ำได้ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันตลอดย่านการทำงาน ซึ่งวัดทดสอบกับความดันไปและกลับหนึ่งรอบครั้ง โดยใช้ตำแหน่งที่มีค่าต่างกันมากที่สุดเพื่อนำมาวิเคราะห์ผล แสดงดังตารางที่ 6.5 โดยใช้สมการในการวิเคราะห์ดังนี้

$$\text{Hysteresis (\%)} = \left[ \frac{O_{\text{forward 1st}} - O_{\text{forward 2nd}} \text{ or } O_{\text{forward 1st}} - O_{\text{reverse 1st}}}{V_{FS} - V_{OS}} \right]_{\text{max}} \times 100\%$$

ตารางที่ 6.5 ค่าฮิสเตอร์รีซิสของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ค่าฮิสเตอร์รีซิส (%FSO)	
	ย่านความดัน 1 ถึง 15 บาร์	ย่านความดัน 1 ถึง 1000 มิลลิบาร์
0.4	0.374	0.527
0.8	0.441	0.421
1.5	0.741	0.662

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณการหาค่าฮิสเตอร์รีซิสพบว่า ตลอดช่วงค่าเข้าที่พหุเต็มสเกล ( Full scale Output ) ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันมีค่าความผิดพลาดจากค่าฮิสเตอร์รีซิส มีค่าไม่เกิน 1 %FSO โดยค่าฮิสเตอร์รีซิสที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.741 %FSO ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพสิซีลิกอนไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน

## 6.5 การวิเคราะห์ผลของการชดเชยอุณหภูมิ

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ซึ่งเป็นค่าแสดงคุณสมบัติและประสิทธิภาพการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างขึ้น โดยเป็นข้อมูลเบื้องต้นก่อนการนำไปใช้งานที่ย่านอุณหภูมิต่างๆ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ และการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 6.5.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ หรือ ค่าที่ซีอาร์ ของอุปกรณ์ ตรวจสอบความดันที่มีโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน โดยนำผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งในการวิเคราะห์ได้เปรียบเทียบผลต่างของค่าที่ซีอาร์ระหว่างค่าความต้านทาน  $R_M$  และ  $R_{ref}$  แสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.6 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ค่าที่ซีอาร์ (ppm/ $^{\circ}\text{C}$ )		ผลต่างของค่า ที่ซีอาร์ (ppm/ $^{\circ}\text{C}$ )	ความชัน Ohm / $^{\circ}\text{C}$	
	$R_M$	$R_{ref}$		$R_M$	$R_{ref}$
0.4	468.171	484.018	15.847	1.944	2.011
0.8	496.119	487.01	9.10	1.915	1.920
1.5	530.214	527.240	2.972	2.846	2.917

จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ ของอุปกรณ์ตรวจสอบความดันที่มีโพลิซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอนดังตารางที่ 6.6 พบว่าการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาจากความชันพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมีค่าที่เท่ากัน และพิจารณาของผลต่างของค่าที่ซีอาร์มีค่าเท่ากับ 15.847 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ , 9.10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  และ 2.972 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  ที่มีไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอนตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 16 ppm/ $^{\circ}\text{C}$

### 6.5.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ

สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ เป็นค่าแสดงถึงการเลื่อนของค่าออฟเซตจากค่าเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิใด ๆ เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปทำให้ค่าออฟเซตมีค่ามากขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ จะแสดงประสิทธิภาพการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจสอบความดันที่สร้างขึ้น โดยใช้สมการวิเคราะห์ดังนี้

$$TCO = \frac{V_{os}(T_1) - V_{os}(T_A)}{(T_1 - T_A)V_{os}(T_A)} \times 100\%$$

ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	สัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ (%/ $^{\circ}\text{C}$ FSO)
0.4	0.436
0.8	1.618
1.5	2.229

จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ออฟเซตของอุณหภูมิ จะมีค่ามากขึ้นเมื่อความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมมีค่าสูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กับการติดพื้นล่างของ Cavity และการขยายตัวออกของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ค่าออฟเซตมีค่าไม่เท่ากับค่าออฟเซตที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนสามารถขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิได้ดีกว่าโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4 และ 0.8 ไมครอน เนื่องจากโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนไม่ติดพื้นล่างของ Cavity ทำให้ค่า TCO มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมทั้งสอง

### 6.5.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ

สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ หรือ ค่า TCS ซึ่งเป็นค่าความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิที่แผ่รวมกับความไวในการตอบสนองของความดันที่อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันไม่สามารถกำจัดผลกระทบของอุณหภูมิได้ทั้งหมด ดังนั้นการวิเคราะห์ค่า TCS จึงเป็นค่าแสดงประสิทธิภาพการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันตลอดย่านความดัน ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6.8 และใช้สมการวิเคราะห์ดังนี้

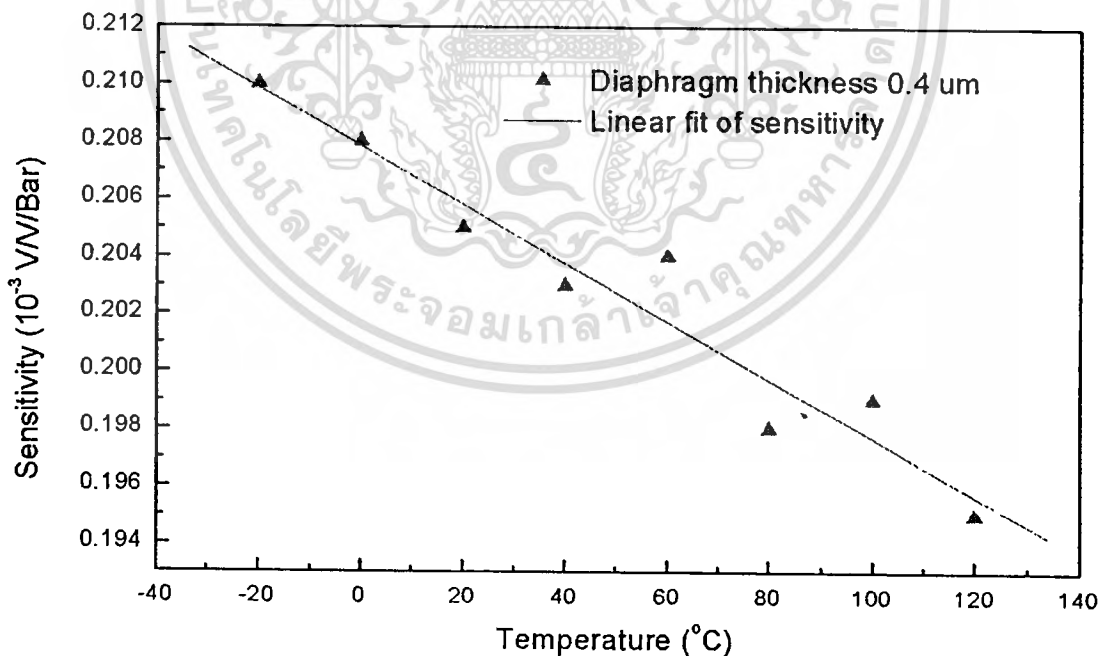
$$TCS = \frac{[V_{FS}(T_1) - V_{OS}(T_1)] - [V_{FS}(T_A) - V_{OS}(T_A)]}{(T_1 - T_A)[V_{FS}(T_A) - V_{OS}(T_A)}} \times 100\%$$

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความไวของอุณหภูมิต่างกันแสดงดังตารางที่ 6.8

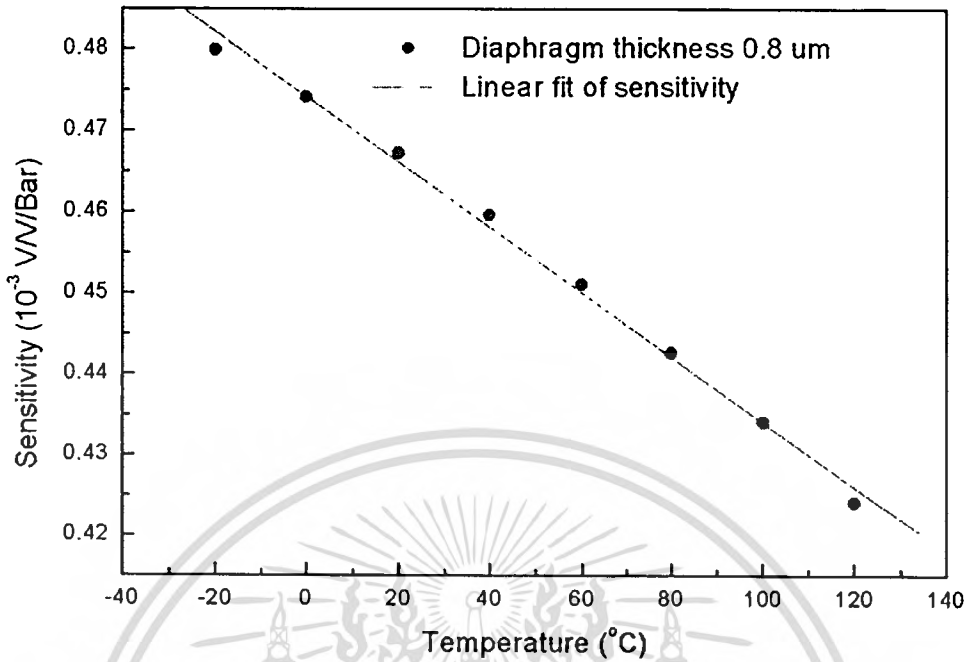
ตารางที่ 6.8 สัมประสิทธิ์ความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิ

ความหนาของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	สัมประสิทธิ์ความไวของอุณหภูมิ ( $\%/^{\circ}\text{C FSO}$ )
0.4	-1.144
0.8	-0.067
1.5	-2.164

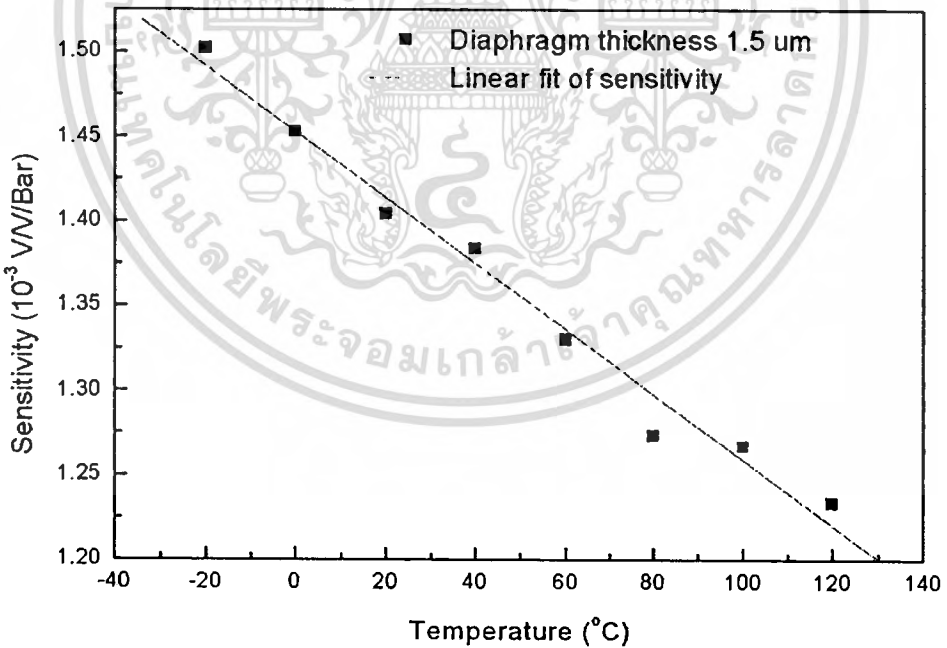
จากการวิเคราะห์ค่า TCS ของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน พบว่า เมื่อนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่า TCS จะมีค่ามากขึ้น ซึ่งทำให้การตอบสนองเนื่องจากความดันมีค่าลดลง ซึ่งมีค่า TCS ดังตารางที่ 6.5 และพิจารณาได้ดังรูปที่ 6.22 ถึง 6.24 ซึ่งเป็นผลของการเพิ่มขึ้นของค่า TCS ที่ทำให้ความไวในการตอบสนองความดันมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 6.22 ผลของค่า TCS ที่ทำให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 6.23 ผลของค่า TCS ที่ทำให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 ไมครอนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 6.24 ผลของค่า TCS ที่ทำให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

## บทที่ 7

### สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ที่มุ่งเน้นศึกษาผลของความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟชนิดโครงสร้างเชิงผิว ซึ่งมีพื้นที่โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด 100 x 100 ตารางไมครอน โดยมีความหนา 0.4 , 0.8 และ 1.5 ไมครอนและมี Cavity ลึก 1.4 ไมครอนซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันเปียโซรีซิสทีฟ ที่มีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน มีความไวในการตอบสนองต่อความดันมากกว่าอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.8 และ 0.4 ไมครอนซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.432 \times 10^{-3}$  V/V/Bar,  $0.742 \times 10^{-3}$  V/V/Bar และ  $0.174 \times 10^{-3}$  V/V/Bar ตามลำดับและสำหรับการตอบสนองต่อความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ  $1.487 \times 10^{-6}$  V/V/mBar,  $0.709 \times 10^{-6}$  V/V/mBar และ  $0.244 \times 10^{-6}$  V/V/mBar ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4 และ 0.8 ไมครอนมีค่าน้อยกว่าโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอน เนื่องจากผลของการติดพื้นล่าง Cavity ของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม ซึ่งจากการวิเคราะห์ในงานวิจัยและการศึกษาในงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีไดอะแฟรมหนา 0.4 และ 0.8 ไมครอน ควรสร้าง Cavity ให้มีความลึก 5 ไมครอนเพื่อแก้ปัญหาของการติดพื้นล่าง Cavity ของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม [18]

2. ย่านความดันการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอน สามารถตรวจจับความดันตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ ถึง 15 บาร์ เมื่อพิจารณาช่วงของความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน สามารถแบ่งย่านความดันได้ดังนี้ ที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 และ 1.5 ไมครอนมีย่านความดันการใช้งาน 2 ย่านความดันคือที่ความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 7 บาร์ และ 8 บาร์ ถึง 15 บาร์ สำหรับไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนมีย่านการทำงานที่ความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 6 บาร์ และ 7 บาร์ ถึง 15 บาร์ ส่วนไดอะแฟรมที่ความหนา 0.4 ไมครอนมีย่านความดันการใช้งานที่ความดัน 1 มิลลิบาร์ ถึง 15 บาร์ และเป็นข้อดีสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.4 ไมครอนที่มีย่านความดันการใช้งานที่กว้างกว่าอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ไดอะแฟรมหนา 0.8 และ 1.5 ไมครอน

3. ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้ มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี โดยพิจารณาตามลักษณะย่านความดันที่ใช้งานและความไวในการตอบสนองต่อความดัน ซึ่งในแต่ละย่านความดันจะแสดงพฤติกรรมการติดพื้นล่าง Cavity ของไดอะแฟรม ซึ่งพบว่าความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีโพลียิลิกอนไดอะแฟรมหนา 0.4 , 0.8 และ 1.5 ไมครอนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความเป็นเชิงเส้นดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 99.9 %FSO และความเป็นเชิงเส้นน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 99.5 %FSO ซึ่งนับว่าการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันมีความเป็นเชิงเส้นดีและเป็นสิ่งที่ดีสำหรับการนำไปใช้งาน

สำหรับค่าฮิสเตอร์รีซิสเป็นค่าแสดงความสามารถในการวัดซ้ำของอุปกรณ์ตรวจจับความดันหรือเป็นค่ากำหนดความผิดพลาด ซึ่งเกิดจากการสูญเสียความยืดหยุ่นของโพลียิลิกอนไดอะแฟรม จากงานวิจัยนี้พบว่าค่าฮิสเตอร์รีซิสมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยตลอดย่านความดันที่ใช้งาน ซึ่งมีไม่เกิน 1 %FSO โดยค่าฮิสเตอร์รีซิสที่มีค่ามากที่สุดที่โพลียิลิกอนไดอะแฟรมหนา 1.5 ไมครอนมีค่าเท่ากับ 0.741 %FSO

#### 4. สัมประสิทธิ์การชดเชยอุณหภูมิ

อุปกรณ์ตรวจจับความดันที่นำไปใช้งานบริเวณอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ นั้น ทำให้ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจจับความดันอาจมีค่าที่ผิดพลาดได้เนื่องจากผลของอุณหภูมิ ดังนั้นการชดเชยอุณหภูมิจึงเป็นวิธีที่ทำให้ผลของอุณหภูมิลดลงหรือปราศจากผลของอุณหภูมิ โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ชี้วัดความสามารถในการชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือ ค่า TCO และ ค่า TCS ซึ่งจากผลการทดลองและการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ค่า TCO มีค่ามากขึ้นตามความหนาของโพลียิลิกอนไดอะแฟรม คือ มีค่าเท่ากับ 0.436 %/°C, 1.618 %/°C FSO และ 2.229 %/°C FSO ที่ไดอะแฟรมหนา 0.4 , 0.8 และ 1.5 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า TCO มีความสัมพันธ์กับการขยายตัวและการติดพื้นล่าง Cavity ของโพลียิลิกอนไดอะแฟรม [43] โดยที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นการขยายตัวของไดอะแฟรมจะเพิ่มมากขึ้น [44] ซึ่งจากงานวิจัยนี้มีไดอะแฟรมที่ความหนา 1.5 ไมครอนมีลักษณะการแอ่นตัวที่ยังไม่ติดพื้นล่างของ Cavity ทำให้การขยายตัวของไดอะแฟรมที่เกิดจากอุณหภูมิมากกว่าไดอะแฟรมที่มีความหนา 0.8 และ 0.4 ไมครอนที่เริ่มติดพื้นและติดพื้นล่างของ Cavity แล้ว

สำหรับค่า TCS เป็นค่าความไวในการตอบสนองของอุณหภูมิซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทำให้ค่า TCS มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ความไวในการตอบสนองต่อความดันมีค่าลดลง

ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-1.144\% / ^\circ\text{C FSO}$ ,  $-0.067\% / ^\circ\text{C FSO}$  และ  $-2.164\% / ^\circ\text{C FSO}$  ตามความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะไซด์คือ 0.4, 0.8 และ 1.5 ไมครอนตามลำดับ

จากการศึกษาผลของความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะไซด์ที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อความดันของอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ ที่มีโครงสร้างแบบเชิงผิวที่กล่าวไว้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสามารถนำไปพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับความดันได้ โดยควรมีการปรับปรุงโครงสร้างของช่อง Cavity ให้มีความลึกมากขึ้นประมาณ 5 ไมครอนและความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะไซด์ให้มีความเหมาะสมกับความลึกของ Cavity เพื่อแก้ปัญหาการติดพื้นล่าง Cavity ของโพลีซิลิคอนไดอะไซด์อีกทั้งการเพิ่มพื้นที่ของไดอะไซด์หรือการเพิ่มตัวต้านทานเปียโซรีซิสทีฟ  $R_M$  และ  $R_{ref}$  ให้มากกว่า 1 ตัว เพื่อเพิ่มความไวในการตอบสนองและลดผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิ ซึ่งเป็นแนวทางการพัฒนาให้อุปกรณ์ตรวจจับความดันให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Julian W. Gardner, **Microsensor, MEMS and Smart Device**. Chichester. John Wiley & Sons Ltd. 2001
- [2] SP Reilly, RK Leach, A Cuenat, M Lowe, **Overview of MEMS sensors and the metrology requirements for their manufacture**. NPL Report DEPC-EM: 2008, pp 13
- [3] E. Kalvesten, L. Smith, L. Tener and G. Stemme, **“The First Surface Micromachined Pressure Sensor For Cardiovascular Pressure Measurement,”** 1998, IEEE, pp 574 – 579.
- [4] Edvard Kälvesten, and Göran Stemme, **“A Surface-Micromachined Resonant-Beam Pressure-Sensing Structure,”** JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 10, NO. 4, DECEMBER 2001
- [5] Bian Tian, Yulong Zhao, Zhuangde Jiang, Ling Zhang, Nansheng Liao, Yuanhao Liu and Chao Meng, **“Fabrication and Structural Design of Micro Pressure Sensors for Tire Pressure Measurement Systems (TPMS),”** Sensors 2009, pp 1382 – 1393.
- [6] Yong Xu, Fukang Jiang, Yu-Chong Tai, Eric Donzier, William A. Loomis and Arthur D. Liberman, **“A SURFACE-MICROMACHINED NITRIDE-DIAPHRAGM HIGH-PRESSURE SENSOR FOR OIL WELL APPLICATION,”** Electrical Engineering, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA
- [7] E. Kalvesten, L. Smith, L. Tener and G. Stemme, **“Small piezoresistive silicon microphone specially designed for the characterization of turbulent gas flows,”** Sensors and Actuators A 47-47 (1995), pp 151–155.
- [8] บุญเกื้อ พิณบุญ การุณ แซ่จอก โอภาส ศรีทวีศักดิ์ เอกลักษณ์ เชาววิวัฒน์ ชาญเดช หอรุณนันท วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง และ อัมพร โพธิ์ไย, **“การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีบ์ในอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซิสทีบ์ชนิดโครงสร้างเชิงผิวที่มีโพลิซิติคอนเป็นเมมเบรนสำหรับการวัดความดันในสุญญากาศ,”** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 32, ปี 2552, หน้า 987-990.
- [9] Hermann Sandmaier and Karl Kuhl, **“A Square-Diaphragm Piezoresistive Pressure Sensor with a Rectangular Central Boss for Low-Pressure Ranges,”** IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 40, NO. 10, OCTOBER 1993, pp 1754 – 1759.

- [10] นภาพร ชำรงวัฒนชัย, “การศึกษาการจำลองแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟโดยมีโพสิทีฟคอปเปอร์ไดอะแฟรมเพื่อนำไปใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก,”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2550, หน้า 44 – 80.
- [11] Liwei Lin, Member, Huey-Chi Chu, and Yen-Wen Lu, “A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors,”*Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, No. 4, December 1999, pp 514 – 522.
- [12] Wolf, S. and Tauber, R.N. 1986 **Silicon Processing For VLSI** .Vol. 1: Process Technology. Sunset Beach, California, LatticePress.
- [13] Thierry Corman, “Vacuum-Sealed and Gas-Filled Micromachined Devices,” Department of Signals, Sensors and Systems Royal Institute of Technology. Stockholm 1999, pp 18-19.
- [14] W.P.Eaton and J.H.Smith, “ Planar Surface-Micromachined pressure Sensor with a Sub-Surface,Embed Refarence pressure Cavity,” The SPIE, Vol 2882,Austin,TX,Oct 14-15,1996.
- [15] H.S. Ko a, C.W. Liu b, C. Gaua, “Micropressure sensor fabrication without problem of stiction for a wider range of measurement,” *Sensors and Actuators A* 138 (2007) 261–267
- [16] NATO Advanced Study Institute, **RESPONSIVE SYSTEMS MEMS** .Course Brussels, September 10-19, 2001.
- [17] Edvard Kälvesten, “Pressure and Wall Shear Stress Sensors for Turbulence Measurements. DEPARTMENT OF SIGNALS,” **SENSORS AND SYSTEMS ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY**.Stockholm 1996,pp 10.
- [18] Nadim Maluf and Kirt Williams, **Introduction to Microelectromechanical System Engineering**.Second edition, pp 81
- [19] S. K. Clark and K. D. Wise, “Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors,” *IEEE Trans. Electron Devices*,vol. ED-26, pp. 1887–1896, 1979.
- [20] Motorola Semiconductor Products Sector, **Pressure Sensors-Device Data**. Phoenix, AZ, 1994.
- [21] H. Guckel, “Surface micromachined pressure transducers,” *Sens. Actuators*,vol. A28, pp. 133–146, 1991.

- [22] S. Sugiyama, K. Shimaoka, and O. Tabata, “Surface micromachined micro-diaphragm pressure sensors,” in Proc. 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers’91), 1991, pp. 188–191.
- [23] William P. Eaton, James H. Smith, David J. Monk, Gary O’Brien, and Todd F. Miller, “Comparison of Bulk and Surface Micromachined Pressure Sensor”. *Micromachined Devices and Components*, Proc SPIE, Vol 3514, pp 431.
- [24] การุณ แซ่จอก. “การศึกษาความต้านทานของฟิล์มโพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟัสซิลิคอน หลังกระบวนการยิงฝัประจุเพื่อใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2550, หน้า 34 – 36.
- [25] Changzhi Shi, Xiaowei Liu and Rongyan Chuai, “Piezoresistive Sensitivity, Linearity and Resistance Time Drift of Polysilicon Nanofilms with Different Deposition Temperatures Sensors 2009, pp 1141-1166.
- [26] Ching-Liang Daia, Pin-Hsu Koa, Yao-Wei Taia, Chyan-Chyi Wu, “Micro FET pressure sensor manufactured using CMOS-MEMS technique,” *Microelectronics Journal* 39 (2008), pp744–749.
- [27] Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White, *MEMS Mechanical Sensors*. pp. 123 – 125.
- [28] Xiaodong Wang, Baoqing Li, Sanghwi Lee, Yan Sun, Harry T. Roman, Ken Chin, Kenneth R. Farmer, “A New Method to Design Pressure Sensor Diaphragm,” *NSTI-Nanotech 2004*, Vol.1.
- [29] Venkata Chivukula, Ming Wang, Hai-Feng Ji, Abdul Khaliq, Ji Fang, Kody Varahramyan. “Simulation of SiO<sub>2</sub>-based piezoresistive microcantilevers,” *Sensors and Actuators A* 125 (2006), pp 526–533.
- [30] Mohamed Gad-el-Hak, *MEMS: Applications*. The Mems handbook, Second Edition. pp 41
- [31] สิทธิชัย โกโคยอุดม, อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับวงจรรวมยุคใหม่. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2551, หน้า 381-396.
- [32] พงนาฏ สุวรรณฉวี, เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้า 62-66.

- [33] Reza Moghimi. **Bridge Type Sensor Measurement are Enhanced by Autozeroed Instrument Amplifiers with Digitally Programmable Gain and Output Offset.** *Analogue Dialogue*, 2004.
- [34] Jyh-Jier Ho. **The design and fabrication of a micro-thermal/pressure-sensor for medical electro-skin application.**
- [35] Jaspreet Singh, M M Nayak<sup>1</sup>, K Nagachenchaiah, **“Linearity and Sensitivity Issues in Piezoresistive Pressure,”** *Solid-State Electronics* 46 (2002) , pp 1205–1209.
- [36] K. Saejok, B. Phinyo, E. Chaowicharat, E. Ratanaudomphisut, O. Treethaveesak, C. Hruanun, and A. Poyai, **“ Effect of Temperature to Characteristics of Polysilicon Based Surface Micromachining Piezoresistive Pressure Sensor,”** *etc*, 2008.
- [37] Li Cao , Tae Song Kim , Susan C. Mantell, Dennis L. Polla. **“Simulation and fabrication of piezoresistive membrane type MEMS strain sensors”.** *Sensors and Actuators* 80\_2000. pp 273–279.
- [38] Li Cao , Tae Song Kim, Susan C. Mantell and Dennis L. Polla, **“Simulation and fabrication of piezoresistive membrane type MEMS,”** *Sensors and Actuators* 80\_2000.273–279.
- [39] Quan Wang , Jianning Ding, Wenxiang Wang, **“Fabrication and temperature coefficient compensation technology of low cost high temperature pressure sensor,”** *Sensors and Actuators A* 120 (2005) ,pp 468–473.
- [40] A. Boukabache, P. Pons, G. Blasquez, Z. Dibi, **“Characterisation and modelling of the mismatch of TCRs and their effects on the drift of the offset voltage of piezoresistive pressure sensors,”** *Sensors and Actuators* 84\_2000. pp 292–296.
- [41] Dirk De Bruyker , Robert Puers. **Thermostatic control for temperature compensation of a silicon pressure sensor.** *Sensors and Actuators* 82\_2000. pp 120–127.
- [42] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2544.**
- [43] Dirk De Bruyker , Robert Puers, **“Thermostatic control for temperature compensation of a silicon pressure sensor,”** *Sensors and Actuators* 82\_2000. pp 120–127.
- [44] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, เอกสิทธิ์ นาสารัตนพร, มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อรุณยา, กอบบุญ หล่อทองคำ ราชชาย เหลืองวรานันท์ และ ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร, 2547. หน้า 600 - 601.**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายบุญเกื้อ พิญโญ
วัน เดือน ปีเกิด	24 มกราคม พ.ศ.2528
สถานที่เกิด	จังหวัดกำแพงเพชร
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
งานวิจัยที่สนใจ	-อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทเมมส์ - การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [2] บุญเกื้อ พิญโญ การุณ วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง แซ่จอก โอภาส ตริทวิศักดิ์ เอกลักษณ์ เชาว์วิชารัตน์ ชาญเดช หรือนันต์ และ อัมพร โพธิ์โย. การชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซิสทีปชนิดโครงสร้างเชิงผิวด้วยวงจรวีทสโตนบริดจ์.การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 ,ปี 2552 , หน้า 995-998.
- [1] บุญเกื้อ พิญโญ การุณ แซ่จอก โอภาส ตริทวิศักดิ์ เอกลักษณ์ เชาว์วิชารัตน์ ชาญเดช หรือนันต์ วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง และ อัมพร โพธิ์โย. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีปในอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซิสทีปชนิดโครงสร้างเชิงผิวที่มีโพลีสิลิคอนเป็นเมมเบรนสำหรับการวัดความดันในสูญญากาศ.การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 32 ,ปี 2552, หน้า 987-990.
- [3] K. Saejok, B. Phinyo, E. Chaowicharat, E. Ratanaudomphisut, O. Treethaveesak, C. Hruanun, and A. Poyai. **Effect of Temperature to Characteristics of Polysilicon Based Surface Micromachining Piezoresistive Pressure Sensor .etci,2008.**

### ผลงานวิจัยอื่น ๆ

- [1] B. Phinyo, W. Titirungrueng, K. Seajok, E. Chaowicharat, O. Treethaveesak, C. Hruanun, and A. Poyai. **The Temperature Compensation Dual Membrane surface Micromachining Piezoresistive Pressure Sensor for Vacuum Pressure Measurement. Asiasense, 2009.**
- [2] K. Saejok, B. Phinyo, E. Chaowicharat, O. Treethaveesak, C. Hruanun, and A. Poyai. **The Study of Sensitivity Enhancement Technique for Surface Micromachining Piezoresistive Pressure Sensors Using Wheatstone Bridge Circuit. Asiasense, 2009.**