

การศึกษาการจำลองแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟที่มี
โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมเพื่อนำไปใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก

STUDY ON SIMULATION OF PIEZORESISTIVE TRANSDUCER ON
POLYCRYSTALLINE SILICON DIAPHRAM FOR SMALL MICROPHONE

นภาพร ชำรงวัฒนชัย
NAPAPORN THAMRONGWATTANACHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL.-2003-EN-M-043-021

การศึกษาการจำลองแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปโดยมี
โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมเพื่อนำไปใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก

STUDY ON SIMULATION OF PIEZORESISTIVE TRANSDUCER ON
POLYCRYSTALLINE SILICON DIAPHRAM FOR SMALL MICROPHONE

นภาพร ชำรงวัฒนชัย

NAPAPORN THAMRONGWATTANACHAI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 79838
วัน,เดือน,ปี..... 18 เม.ย. 2551

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL - 2008 - EN - M - 043 - 021

**STUDY ON SIMULATION OF PIEZORESISTIVE PRESSURE
TRANSDUCER ON POLYCRYSTALLINE SILICON DIAPHRAM FOR
SMALL MICROPHONE**

NAPAPORN THAMRONGWATTANACHAI

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

2008

KMITL - 2008 - EN - M - 043 - 021

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการจำลองแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ
เปียโซรีซิสทีปโดยมีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมเพื่อ
นำไปใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก

นักศึกษา

นางสาวนภาพร ชำรงวัฒนชัย

รหัสประจำตัว

48061304

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

พ.ศ.

2551

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจำลองแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโครงสร้างไดอะแฟรมเป็นโพลีซิลิคอน โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ พื้นที่ของไดอะแฟรมมีทั้งหมด 4 ค่าคือ 100×100 , 200×200 , 300×300 และ $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ และความหนาของไดอะแฟรมมีทั้งหมด 5 ค่าคือ 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ $2 \mu\text{m}$ โดยความดันที่ใช้จะอยู่ในช่วง 2 – 20 mPa จากพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ทำการศึกษา ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความไวในการตอบสนองและผลตอบสนองต่อความถี่โดยใช้ CoventorWare™ ผลจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า ทรานสดิวเซอร์ความดันที่ออกแบบมีแนวโน้มที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นไมโครโฟนขนาดเล็กได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากแนวโน้มจะพบว่าที่ความหนาของไดอะแฟรม $0.5 \mu\text{m}$ จะต้องมีพื้นที่ $620 \times 620 \mu\text{m}^2$ และที่ความหนาของไดอะแฟรม $1 \mu\text{m}$ จะต้องมีพื้นที่ $895 \times 895 \mu\text{m}^2$ จึงจะเหมาะสมต่อการตอบสนองความถี่เสียง

Thesis Title	Study on Simulation of Piezoresistive Pressure Transducer on Polycrystalline Silicon Diaphragm for Small Microphone
Student	Miss.Napaporn Thamrongwattanachai
Student ID.	48061304
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

In this thesis, we propose the synthesis of piezoresistive pressure transducer which has polysilicon diaphragm structure. Regarding the experiment, we focus on three kinds of synthesis parameters, area and thickness of diaphragm as well as applied pressure. Varying these synthesis parameters as, 100 x 100, 200 x 200, 300 x 300 and 400 x 400 μm^2 for area, 0.5, 0.8, 1, 1.5 and 2 μm for thickness and 2-20 mPa for applied pressure, we would like to study the effects of these parameters on sensitivity and frequency respond of synthesized transducer by utilizing ConventerWareTM to analyze. According to the experiment results, we conclude that this proposed pressure transducer with appropriate synthesis conditions, 620 x 620 μm^2 size/0.5 μm thickness and 895 x 895 μm^2 size/ 1 μm thickness, can be implemented as a small microphone.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆมากมาย ซึ่งผู้เขียนขอกล่าวขอบพระคุณ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ผู้ซึ่งได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้และให้แนวความคิดในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร.อัมพร โพธิ์โย หัวหน้าศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ซึ่งให้แนวความคิด คำแนะนำ ข้อปฏิบัติ ตลอดจนวิธีการแก้ไขปัญหาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกลักษณ์ เชาว์วิฆารัตน์ และนายการุณ แซ่จอก นักวิจัยงานวิจัยกระบวนการผลิต ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ซึ่งให้แนวความคิดในการแก้ไขปัญหาต่างๆ มาตลอด

ขอขอบคุณ คุณจริยา นามเสนาะ, ดร.วิสิษฐ์ วงศ์สุทธิธรรม และพี่น้อง Superconductor ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่เป็นอย่างยิ่ง ที่คอยให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด และญาติพี่น้อง เพื่อนๆภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมทุกๆคนที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นภาพร ธำรงวัฒนชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
ศัพท์เทคนิค.....	XIV
สัญลักษณ์.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ทรานสดิวเซอร์.....	1
1.1.1 ทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้า.....	1
1.1.2 การแยกประเภท.....	2
1.1.2.1 ตัวแปลงแบบไวงาน.....	2
1.1.2.2 ตัวแปลงแบบเฉื่อยงาน.....	2
1.2 ไมโครโฟน.....	3
1.2.1 ชนิดของไมโครโฟน.....	3
1.2.1.1 ไมโครโฟนแบบคาร์บอน.....	4
1.2.1.2 ไมโครโฟนแบบไดนามิก.....	4
1.2.1.3 ไมโครโฟนแบบรีบบอน.....	5
1.2.1.4 ไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์หรือคาปาซิเตอร์.....	6
1.2.1.5 ไมโครโฟนแบบคริสตัล.....	7
1.3 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	8
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1 फिल्म पोलीथिलिकोन.....	10
2.1.1 โครงสร้างฟิล์มโพลิซิติคอน.....	10
2.1.2 คุณสมบัติฟิล์มโพลิซิติคอน.....	11
2.1.3 กระบวนการสร้างฟิล์มโพลิซิติคอน.....	12
2.2 ทรานสดิวเซอร์.....	13
2.2.1 ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซีสทีป.....	13
2.2.2 สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีสทีปตามยาวและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีสทีปตามขวาง.....	13
2.2.3 ความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวาง.....	16
2.2.4 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีสทีปในตัวต้านทาน.....	17
2.3 วงจรวีทสโตนบริดจ์.....	21
2.4 ความไวในการตอบสนอง.....	22
2.5 ไมโครโฟน.....	23
2.5.1 คุณสมบัติของไมโครโฟน.....	23
2.5.1.1 ความไวในการตอบสนอง.....	24
2.5.1.2 การตอบสนองต่อความถี่.....	24
2.5.1.3 ทิศทางในการตอบสนอง.....	24
บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	31
3.1 โควนเตอร์แวร์.....	31
3.2 ชุดเครื่องมือทดสอบความดัน.....	32
บทที่ 4 การทดลอง.....	33
4.1 โครงสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซีสทีปที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
4.2 การทดลอง.....	34
4.2.1 เงื่อนไขในการทดลอง.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.1 ขนาดของไดอะแฟรม.....	34
4.2.1.2 ความหนาของไดอะแฟรม.....	34
4.2.1.3 ความดัน.....	34
4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	34
4.2.2.1 การหาตำแหน่งการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม.....	34
4.2.2.1.1 การเขียนลำดับกระบวนการสร้าง.....	35
4.2.2.1.2 การออกแบบ.....	36
4.2.2.1.3 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์.....	37
4.2.2.1.4 การประมวลผล.....	38
4.2.2.2 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่มี โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม.....	39
4.2.2.3 การหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดัน แบบเปียโซรีซิสทีฟที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม.....	39
4.2.2.4 การหาค่าผลตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดัน แบบเปียโซรีซิสทีฟที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม.....	43
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
5.1 ผลการหาตำแหน่งการวางตัวด้านทาน.....	44
5.1.1 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$	44
5.1.1.1 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนาน.....	44
5.1.1.2 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก.....	47
5.1.2 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$	50
5.1.2.1 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนาน.....	50
5.1.2.2 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก.....	53
5.1.3 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3.1 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนาน.....	56
5.1.3.2 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก.....	59
5.1.4 โพลีซิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$	62
5.1.4.1 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนาน.....	62
5.1.4.2 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก.....	65
5.2 ผลการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียก โซริซีสทีปที่มี โพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรม.....	69
5.2.1 การออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานที่โพลีซิลิกอนขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$	69
5.2.2 การออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานที่โพลีซิลิกอนขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$	71
5.2.3 การออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานที่โพลีซิลิกอนขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$	72
5.2.4 การออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานที่โพลีซิลิกอนขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$	73
5.2.5 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียก โซริซีสทีปที่มี โพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรม.....	74
5.3 ผลการหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดัน แบบเปียก โซริซีสทีปที่มีโพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรม.....	76
5.4 ผลการหาผลตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดัน แบบเปียก โซริซีสทีปที่มีโพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรม.....	80
5.4.1 โพลีซิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$	80
5.4.2 โพลีซิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$	82
5.4.3 โพลีซิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$	85
5.4.4 โพลีซิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$	88
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
เอกสารอ้างอิง.....	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. การตั้งค่าในโปรแกรมโคเวนเตอร์แวร์.....	97
ภาคผนวก ก. ความดันเสียงและระดับความดันเสียง.....	123
ภาคผนวก ข. หน่วยต่างๆ ของโคเวนเตอร์แวร์.....	124
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	142

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างการแยกประเภทของทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้า.....	3
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ.....	12
5.1 แสดงค่าช่วงตำแหน่งในการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่มีลักษณะการวางแบบขนานและแบบตั้งฉาก.....	68
5.2 เปรียบเทียบผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมโครงสร้างเดิมของTMEC จากทั้งสองวิธี.....	76
5.3 ผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่ขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า.....	77
5.4 ผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่ขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า.....	77
5.5 ผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่ขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า.....	78
5.6 ผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่ขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า.....	78
5.7 สรุปช่วงความถี่ในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปทุกเงื่อนไขการทดลอง.....	90

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างไมโครโฟนแบบคาร์บอน.....4
1.2	โครงสร้างไมโครโฟนแบบไดนามิก.....5
1.3	โครงสร้างไมโครโฟนแบบรีบบอน.....6
1.4	โครงสร้างไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์หรือคาปาซิเตอร์.....7
1.5	โครงสร้างไมโครโฟนแบบคริสตัล.....8
2.1	โครงสร้างโพลีซิลิคอนและซิลิคอน.....10
2.2	ผิวหน้าของโครงสร้างโพลีซิลิคอน.....11
2.3	โครงสร้างเครื่อง LPCVD แบบเตาความร้อนในแนวนอน.....13
2.4	ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุ.....15
2.5	การกระจายค่าความเค้นไคเมนชันเลสใน 1 คิวทเรนที่บริเวณต่างๆ บนไดอะแฟรม รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....16
2.6	ตัวต้านทาน 4 ตัวบนไดอะแฟรม.....18
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด.....20
2.8	วงจรวีทสโตนบริดจ์.....22
2.9	หลักการทำงานพื้นฐานของไมโครโฟน.....23
2.10	รูปแบบทิศทางของการรับเสียงในไมโครโฟนแบบต่างๆ.....25
2.11	การผสมกันระหว่างโอมนิไดเร็กชันนอลและไบไดเร็กชันนอล.....26
2.12	กราฟวงกลมผลตอบสนองเชิงมุม.....27
2.13	ผลตอบสนองเชิงมุมของโอมนิไดเร็กชันนอล.....27
2.14	ผลตอบสนองเชิงมุมของไบไดเร็กชันนอล.....28
2.15	ผลตอบสนองเชิงมุมของยูนิไดเร็กชันนอล.....28
2.16	ทิศทางเชิงมุมของไมโครโฟนชนิดซูเปอร์คาร์ดิอยด์.....29
2.17	ทิศทางเชิงมุมของไมโครโฟนชนิดไฮเปอร์คาร์ดิอยด์.....29
2.18	ทิศทางเชิงมุมของไมโครโฟนชนิดอูลตราคาร์ดิอยด์.....30
3.1	การทำงานของ CoventorWare TM31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดแรงดัน.....	32
4.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปของ TMEC.....	33
4.2 โครงสร้างภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป ที่ใช้ในการออกแบบในงานวิจัยนี้.....	34
4.3 ลักษณะการวางตัวด้านทานทั้ง 2 แบบ.....	35
4.4 โครงสร้างภาพตัดขวางอย่างง่ายของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป.....	36
4.5 ลำดับกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปใน CoventorWare™	36
4.6 Layout ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่ใช้ในการทดลอง.....	37
4.7 การกำหนด Element size ให้กับทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป.....	38
4.8 การประมวลผลของ CoventorWare™	38
4.9 ภาพรวมของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่ออกแบบด้วย L-Edit.....	39
4.10 ขั้นตอนการทำงานของ CoventorWare™	40
4.11 การทดลองด้วยชุดทดสอบความดัน.....	42
5.1 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนานบนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	45
5.2 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	48
5.3 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนานบนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	51
5.4 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	54
5.5 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนานบนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	57
5.6 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	60
5.7 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนานบนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	63
5.8 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	66
5.9 ขนาดและลักษณะการวางโพสิทีฟสเตอร์แบบขนานที่ขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา.....	70
5.10 ขนาดและลักษณะการวางโพสิทีฟสเตอร์แบบตั้งฉากที่ขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ $2 \mu\text{m}$	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 ขนาดและลักษณะการวางโพลีสไตรีนเตอร์แบบขนานที่ขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ความหนาค่าต่างๆ.....	71
5.12 ขนาดและลักษณะการวางโพลีสไตรีนเตอร์แบบตั้งฉากที่ขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ $2 \mu\text{m}$	71
5.13 ขนาดและลักษณะการวางโพลีสไตรีนเตอร์แบบขนานที่ขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ความหนาค่าต่างๆ.....	72
5.14 ขนาดและลักษณะการวางโพลีสไตรีนเตอร์แบบตั้งฉากที่ขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ $2 \mu\text{m}$	72
5.15 ขนาดและลักษณะการวางโพลีสไตรีนเตอร์แบบขนานที่ขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ความหนาค่าต่างๆ.....	73
5.16 ขนาดและลักษณะการวางโพลีสไตรีนเตอร์แบบตั้งฉากที่ขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ $2 \mu\text{m}$	73
5.17 ลำดับการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปด้วย L-Edit.....	74
5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตอบสนองกับขนาดของไดอะแฟรม.....	79
5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่ ที่โพลีสไตรีนเตอร์ไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$	80
5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่ ที่โพลีสไตรีนเตอร์ไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$	83
5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่ ที่โพลีสไตรีนเตอร์ไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$	85
5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่ ที่โพลีสไตรีนเตอร์ไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$	88
5.23 กราฟแนวโน้มพื้นที่ของโพลีสไตรีนเตอร์ไดอะแฟรมที่สามารถตอบสนองต่อความถี่เสียง.....	92
5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับความถี่ ที่โพลีสไตรีนเตอร์ไดอะแฟรมหนา $0.5 \mu\text{m}$	93

สารบัญรูป (ต่อ)

5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับความถี่ ที่โพลียิลิกอนไดอะเพรมหนา 1 μm	93
---	----

ศัพท์เทคนิค

ไบไดเร็กชันนอล	Bidirectional
โคเวนเตอร์แวร์	CoventorWare™
ไดอะแฟรม	Diaphragm
ขนาด	Dimension
ทิศทาง การตอบสนอง	Directionality
ผลตอบสนองต่อความถี่	Frequency response
ไมโครโฟน	Microphone
โอมนิไดเร็กชันนอล	Omni-directional
เปียโซรีซิสทีฟ	Piezoresistive
โพลีซิลิคอน	Polysilicon
ความดัน	Pressure
ความไวในการตอบสนอง	Sensitivity
ความเค้น	Stress
ความหนา	Thickness
ทรานสดิวเซอร์	Transducer
ยูนิไดเร็กชันนอล	Unidirectional

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

π_l

สัมประสิทธิ์เป็ยโซริซีฟที่ปตามยาว

π_t

สัมประสิทธิ์เป็ยโซริซีฟที่ปตามขวาง

σ_l

ความเค้นตามยาว (Longitudinal Stress)

σ_t

ความเค้นตามขวาง (Transverse Stress)

$\langle \pi_l \rangle$

ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เป็ยโซริซีฟที่ปตามยาว

$\langle \pi_t \rangle$

ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เป็ยโซริซีฟที่ปตามขวาง

$\langle Y \rangle$

ยังโมดูลัส

GF_l

เกจเฟคเตอร์ตามยาว

GF_t

เกจเฟคเตอร์ตามขวาง

S

ความไวในการตอบสนอง

บทที่ 1

บทนำ

มนุษย์สามารถรับรู้สิ่งต่างๆ ที่อยู่รอบตัวเองได้เนื่องจากมนุษย์มีระบบประสาทสัมผัสทั้ง 5 คือ หูรับฟังเสียง รังกายรับการสัมผัส จมูกใช้ในการดมกลิ่น ลิ้นใช้ในการลิ้มรสและตาใช้ในการมอง แต่การรับรู้ของมนุษย์นั้นมีขอบเขตจำกัด ซึ่งถ้าสิ่งที่รับรู้หรือสัมผัสมีปริมาณมากเกินไปจะทำให้เป็นอันตรายต่อร่างกาย แต่ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้มนุษย์ไม่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นมนุษย์จึงพยายามคิดค้นประดิษฐ์อุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดได้โดยการแปลงสัญญาณที่ไม่ทำอันตรายต่อร่างกาย โดยที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ ซึ่งการแปลงสัญญาณอย่างหนึ่งให้เป็นสัญญาณอีกอย่างหนึ่งเราเรียกว่า ทรานสดิวเซอร์ (Transducer)

1.1 ทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หมายถึงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์หนึ่งตัวจึงประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่รับพลังงาน (Sensing Part) และส่วนที่เปลี่ยนพลังงาน (Transducer Part) ทรานสดิวเซอร์จะให้ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตที่สามารถนำไปใช้งานได้เมื่อมีการวัดปริมาณตัวแปรทางด้านอินพุตที่ต้องการซึ่งอาจเป็นปริมาณทางกายภาพหรือเชิงกล โดยที่การตอบสนองนั้นอาจจะเป็นรูปแบบเชิงกลทางไฟฟ้า แม่เหล็ก แสงสี เคมี เสียง ความร้อน นิวเคลียร์ หรือเป็นการรวมกันระหว่างตัวแปร 2 ชนิด หรือมากกว่าที่กล่าวมาก็ได้

1.1.1 ทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้า

ทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้า (Electrical Transducer) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณทางกายภาพทางกล หรือแสงสี ที่ทำการวัดเปลี่ยนรูปของตัวแปรเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าโดยตรงเพื่อให้เหมาะสมกับระบบ โดยที่ความสัมพันธ์ของเอาต์พุตกับอินพุตกับพฤติกรรมของเวลานั้นสามารถทำนายได้เพื่อให้รู้ถึงความแม่นยำ ความไวและการตอบสนองภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญในการบอกถึงความสามารถของทรานสดิวเซอร์ คือความเป็นเชิงเส้น ความสามารถในการซ้ำค่าเดิม การตัดสินใจ (Resolution) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) เป็นต้น ประโยชน์หลักๆ ของทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังนี้

ก) สามารถนำสัญญาณเอาต์พุตที่อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้ามาขยายให้อยู่ในระดับที่ต้องการ

- ข) สามารถนำสัญญาณเอาต์พุตไปแสดงผลและบันทึกค่าในระยะไกลจากตัวตรวจจับได้ และยิ่งกว่านั้นถ้าตัวแสดงผลมีมากกว่า 1 ตัว ตัวแสดงผลทุกตัวจะต้องสามารถทำงานได้พร้อมกัน
- ค) สามารถปรับแต่งสัญญาณเอาต์พุตให้เหมาะสมกับความต้องการของการแสดงผลหรือการควบคุม ซึ่งจะต้องมีความสัมพันธ์กันของขนาดสัญญาณในรูปของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้สามารถเปลี่ยนข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัญญาณอนาลอกให้เป็นข้อมูลทางความถี่หรือพัลส์ (Pulse) ได้ และสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นอนาลอกนั้นต้องสามารถเปลี่ยนเป็นรูปแบบดิจิทัลเพื่อสำหรับแสดงผล พิมพ์ หรือส่งผ่านสาย (On-line)
- ง) สัญญาณจะต้องสามารถอยู่ในภาวะที่เหมาะสม หรือสามารถรวมกับสัญญาณเอาต์พุตจากทรานสดิวเซอร์ตัวอื่นๆ หรือสัญญาณควบคุม
- จ) ทรานสดิวเซอร์นั้นจะต้องถูกออกแบบมาให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดทั้งน้ำหนักและปริมาตร
- ฉ) ในการออกแบบรูปร่างและขนาดของทรานสดิวเซอร์นั้น จะต้องพิจารณาไม่ให้เกิดการรบกวนต่อการตรวจวัด

1.1.2 การแยกประเภท

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า “ทรานสดิวเซอร์” เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงรูปพลังงานจากรูปแบบหนึ่งเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง และในการแปลงพลังงานนั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์แต่ละชนิด ซึ่งจะสามารถแบ่งประเภทของทรานสดิวเซอร์ออกได้เป็น 2 ลักษณะ

1.1.2.1 ตัวแปลงแบบไวงาน

ตัวแปลงไวงาน (Active Transducers) หรือทรานสดิวเซอร์ตัวกระทำ หมายถึง ทรานสดิวเซอร์ที่นำไปตรวจวัดปริมาณของตัวแปรใดๆ แล้วสามารถให้เอาต์พุตออกมาในรูปของสัญญาณไฟฟ้าได้โดยปราศจากพลังงานกระตุ้นจากภายนอก เช่น เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) หรือคริสตัลควอตซ์ (Quartz Crystal) เช่นเดียวกับโซลิดสเตตทรานสดิวเซอร์ เป็นต้น

1.1.2.2 ตัวแปลงแบบเฉื่อยงาน

ตัวแปลงแบบเฉื่อยงาน (Passive Transducers) หรือทรานสดิวเซอร์ตัวถูกกระทำ หมายถึง ทรานสดิวเซอร์ที่ทำงานภายใต้การควบคุมพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรไฟฟ้า เช่น ความต้านทาน ความเหนียวหรือความจุ โดยการกระตุ้นหรืออาศัยแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก

เพื่อให้ได้สัญญาณในรูปของสัญญาณไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต เช่น อาร์ทีดี (RTD) เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) มาตรการวัดความเครียด (Strain Gauge) โหลดเซลล์ (Load Cell) เป็นต้น

หลักการสำคัญพื้นฐานของการแปลง (Transduction) ปริมาณชนิดต่างๆ ภายใต้การทำงานของอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งการทำงานของทรานสดิวเซอร์แต่ละชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับความต้องการของชนิดตัวแปร การติดตั้ง การกำหนดวิธีการทำงานและสภาพแวดล้อม

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างการแยกประเภทของทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้า

ตัวแปลงแบบไวงาน	ตัวแปลงแบบเฉื่อยงาน
เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	ความต้านทาน (Resistive)
เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)	การเหนี่ยวนำ (Inductive)
โฟลโตโวลตาอิก (Photovoltaic)	ความจุ (Capacitive)
แมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostrictive)	โฟลโตคอนดักทีฟ (Photoconductive)
อิเล็กโตรไคเนติก (Electrokinetic)	เพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive)
อิเล็กโตรไดนามิก (Electrodynamic)	แมกนีโตรรีซิสทีฟ (Magnetoresistive)
อิเล็กโตรแมกเนติก (Electromagnetic)	เทอร์โมรีซิสทีฟ (Thermoresistive)
ไฟโรอิเล็กทริก (Pyroelectric)	ฮอลล์ เอฟเฟกต์ (Hall Effect)

1.2 ไมโครโฟน

ไมโครโฟน (Microphone) หรือชาน์ทรานสดิวเซอร์ (sound transducer) จะทำหน้าที่แปลงแรงดันที่เกิดจากคลื่นเสียงให้เป็นแรงดันไฟฟ้า ในระยะแรกๆ นั้นไมโครโฟนได้ถูกผลิตโดยบริษัท Tannoy for the intercom associated ประเทศรัสเซีย เพื่อใช้ในเครื่องรับส่งวิทยุและนำไปติดตั้งไว้ในรถถังสำหรับการรบสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2

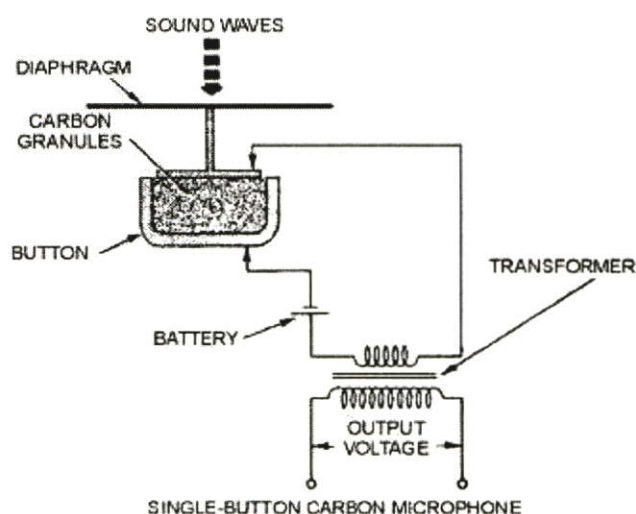
หลักการทำงานของไมโครโฟนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การแปลงการสั่นสะเทือนของคลื่นเสียงทางเชิงกลโดยใช้ไดอะแฟรมและ การแปลงการสั่นสะเทือนของไดอะแฟรมให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของกระแสหรือแรงดันก็ได้

1.2.1 ชนิดของไมโครโฟน

ไมโครโฟนมีหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดของทรานสดิวเซอร์ที่นำมาทำเป็นไมโครโฟนซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

1.2.1.1 ไมโครโฟนแบบคาร์บอน

ไมโครโฟนที่ใช้คาร์บอน (Carbon Microphone) เป็นไมโครโฟนแบบแรกที่คิดค้นขึ้นโดย Thomas Edison ในปี ค.ศ. 1877 แต่คุณภาพของไมโครโฟนแบบนี้ไม่ค่อยดีนักเพราะคุณสมบัติไม่เชิงเส้นและมีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ด้วย และผงคาร์บอนอาจจะทำให้เกิด Electrical Noises หลักการทำงานของไมโครโฟนแบบคาร์บอนสามารถอธิบายได้ดังนี้ คลื่นเสียงจะทำให้ไดอะแฟรมเคลื่อนที่ขึ้นลง การเคลื่อนที่ของไดอะแฟรมนี้จะทำให้ความต้านทานของอุปกรณ์เปลี่ยนแปลงไฟเพราะผงคาร์บอนจะถูกอัดให้แน่นมากขึ้นหรือน้อยลงตามการเคลื่อนที่ของแผ่นไดอะแฟรม ดังนั้นกระแสในวงจรก็จะเปลี่ยนแปลงค่าขึ้นๆ ลงๆ ตามความถี่ของเสียง กระแสนี้จะถูกป้อนให้กับขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil) ของหม้อแปลง (Transformer) และเอาท์พุทที่ได้จากขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil) จะเป็นสัญญาณกระแสสลับ ลักษณะโครงสร้างของไมโครโฟนแบบคาร์บอนแสดงดังในรูปที่ 1.1

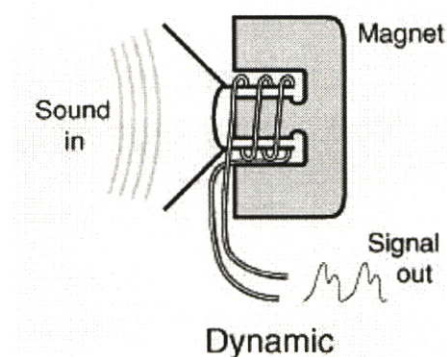


รูปที่ 1.1 โครงสร้างไมโครโฟนแบบคาร์บอน

1.2.1.2 ไมโครโฟนแบบไดนามิก

ไมโครโฟนแบบไดนามิก (Dynamic Microphone) นั้นเป็นทรานสดิวเซอร์ที่ประกอบด้วยขดลวดซึ่งเคลื่อนที่อยู่ในสนามแม่เหล็กตามแรงดันของคลื่นเสียงที่มากระทำบนแผ่นไดอะแฟรม ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในขดลวดนี้และจะถูกส่งไปยังภาคขยายต่อไป เนื่องจากไมโครโฟนแบบนี้อาศัยหลักการของการเคลื่อนที่จึงเรียกไมโครโฟนแบบนี้ว่า ไมโครโฟนแบบไดนามิก ข้อเสียของไมโครโฟนแบบนี้ก็คือขดลวดจะต้องมีการเคลื่อนที่อย่างมากเพื่อที่จะผลิต

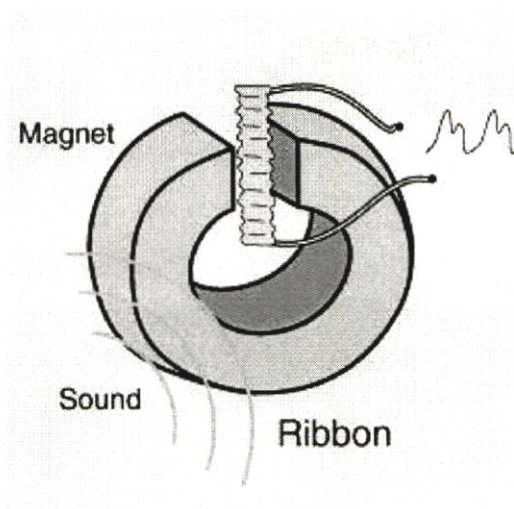
กระแสออกมาแต่แรงดันของคลื่นเสียงที่มากระทำบนแผ่นไดอะแฟรมนั้นมีค่าไม่มาก อย่างไรก็ตาม ข้อเสียนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มากขึ้น โดยนำขั้ว N และขั้ว S ของแม่เหล็กให้มาอยู่ใกล้กันเพื่อที่จะทำให้ขดลวดนั้นเคลื่อนที่อยู่ในช่องแคบๆ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างไมโครโฟนแบบไดนามิก

1.2.1.3 ไมโครโฟนแบบริบบอน

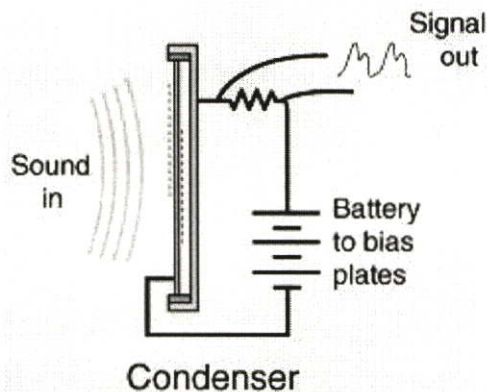
ไมโครโฟนแบบริบบอน (Ribbon Microphone) มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับไมโครโฟนแบบไดนามิก ซึ่งในไมโครโฟนแบบริบบอนนั้นจะใช้แผ่นอลูมิเนียมหรือ Duraluminium foil บางๆ ที่มีความยาวประมาณหนึ่งนิ้วและหนา $1/10,000$ นิ้ว โดยทั่วไปแล้วแผ่น foil นี้จะถูกทำให้เป็นลูกฟูกและติดตั้งไว้ระหว่างขั้วของเหล็กที่แคบและยาว ริบบอนนี้จะทำหน้าที่เป็นทั้งไดอะแฟรมและตัวนำที่เคลื่อนที่ได้ ไมโครโฟนแบบนี้จะมีผลตอบสนองต่อความถี่ดีมาก แต่แรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาจะมีค่าน้อย ข้อเสียของไมโครโฟนแบบนี้คือ จะเสีง่ายและจะรับคลื่นเสียงรบกวนของลมได้ ถ้าใช้ภายนอกอาคารทั้งนี้เพราะทั้งสองด้านของแผ่น foil นั้นไม่มีอะไรปิดไว้ โครงสร้างของไมโครโฟนแบบริบบอนแสดงดังใน รูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 โครงสร้างไมโครโฟนแบบริบบอน

1.2.1.4 ไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์หรือคาปาซิเตอร์

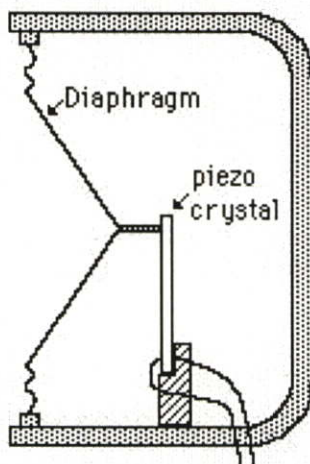
ไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์หรือคาปาซิเตอร์ (Condenser Microphone) นี้จะต้องมีแหล่งจ่ายจากภายนอกมาต่อร่วมด้วยเช่นเดียวกับไมโครโฟนแบบคาร์บอน ไมโครโฟนแบบนี้จะมีประกอบด้วยไดอะแฟรมซึ่งถือเป็น Vibrating plate ของคาปาซิเตอร์ และ plate โลหะอีกอันหนึ่งซึ่งถือเป็น Fixed plate diaphragm นี้จะติดไว้ให้ห่างจาก Fixed plate ประมาณ 0.001 นิ้ว เมื่อมีคลื่นเสียงมากระทบกับแผ่นไดอะแฟรมจนสั่นไปมาค่าความจุของคาปาซิเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงไป เอาท์พุทของไมโครโฟนแบบนี้สามารถวัดได้โดยการนำเอาตัวต้านทานมาต่อเป็นโหลด ไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์นี้จัดว่าเป็นไมโครโฟนที่มีคุณภาพดีมากและนิยมใช้เป็นมาตรฐานในการวัดเกี่ยวกับเสียงและนิยมใช้กันมากในห้องปฏิบัติการ โครงสร้างของไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์หรือคาปาซิเตอร์แสดงดังในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 โครงสร้างไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์หรือคาปาซิเตอร์

1.2.1.5 ไมโครโฟนแบบคริสตัล

ไมโครโฟนแบบคริสตัล (Crystal Microphone) จะมีคุณภาพรองลงมาจากไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์ ไมโครโฟนแบบนี้ก็นิยมใช้กันมากเช่นกันในงานที่ไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก รูปโครงสร้างของไมโครโฟนแบบคริสตัลแสดงดังในรูปที่ 1.5 โครงสร้างของไมโครโฟนจะประกอบไปด้วยคริสตัลซึ่งอาจจะใช้ควอทซ์ (Quartz), Rochelle salt หรือ Tourmaline เพื่อทำหน้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้า (Piezoelectric Effect) โดยทั่วไปแล้วควอทซ์จะเป็นวัสดุที่ดีที่สุดแต่มีราคาค่อนข้างแพง สำหรับคริสตัลแบบ Rochelle salt นั้นก็จะละลายในอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียสและความชื้นสูงๆ ก็ยังมีอิทธิพลต่อมันด้วยดังนั้นการเลือกใช้คริสตัลแต่ละแบบนี้จะต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมด้วย หลักการทำงานของไมโครโฟนแบบคริสตัลสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อไดอะแฟรมสั่นไปมาตามแรงดันของคลื่นเสียงที่มากระทำนั้นคริสตัลก็จะถูกกดหรือคลายตามไปด้วย ดังนั้นคริสตัลก็จะสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้สามารถต่อไปยังวงจรส่วนอื่นได้โดยใช้ Electrode ติดเข้ากับแผ่นคริสตัลทั้งสองด้าน โดยทั่วไปแล้วไมโครโฟนแบบคริสตัลนี้สามารถใช้ได้กับคลื่นเสียงที่มีความถี่น้อยๆ จนถึงหลายๆ ล้านเฮิรตซ์ได้



รูปที่ 1.5 โครงสร้างไมโครโฟนแบบคริสตัล

1.3 ความเป็นมาของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นจากความร่วมมือระหว่าง ERC กับ TMEC เนื่องด้วย TMEC ต้องการจะพัฒนาทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมเดิมที่มีอยู่ มาประยุกต์เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงปัญหาดังกล่าวและได้มีการปรับเปลี่ยน การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมขึ้นมาใหม่ โดยที่ให้มีคุณสมบัติตรงกับกระบวนการสร้างที่มีอยู่เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็กได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

บทที่ 1 เป็นบทนำ ได้กล่าวถึงการแยกทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้าและไมโครโฟนหรือฮาร์วันทรานสดิวเซอร์ชนิดต่างๆ รวมไปถึงความเป็นมาของงานวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โครงสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน เทคนิคการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน การคำนวณหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป และคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไมโครโฟน

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรม CoventorWare™ และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทดสอบความดันในงานวิจัยนี้

บทที่ 4 จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทดลองต่างๆ การหาตำแหน่งในการวางตัวด้านทานโดย CoventorWare™ การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซีสทีปที่มีโพลิซิลิกอนเป็นไดอะแฟรมโดย L-edit การหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซีสทีปโดย CoventorWare™ และ โดยชุดทดสอบความดัน สุดท้ายได้กล่าวถึงการหาค่าผลการตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซีสทีป

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของงานที่ทำทั้งหมด ซึ่งผลที่ได้จากการสรุปและข้อเสนอแนะทั้งหลายเหล่านี้ จะเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาและพัฒนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซีสทีปที่มีโพลิซิลิกอนเป็นไดอะแฟรมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็กต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎี

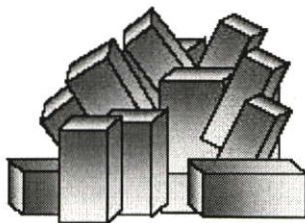
2.1 ฟิสิกส์โพลีซิลิคอน [1]

โครงสร้างของฟิล์มซิลิคอน มี 3 ชนิด คือ ผลึกเดี่ยวซิลิคอน โพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน แต่ในที่นี้เราจะกล่าวเฉพาะ ในส่วนของโพลีซิลิคอนเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

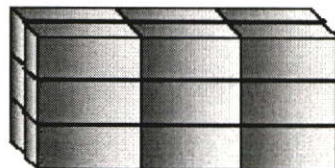
2.1.1 โครงสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน

โพลีคริสตัล (poly crystal) เป็นสารของแข็งที่เป็น หน่วยเซลล์ (unit cell) ที่มีการเรียงตัวอย่างไม่ต่อเนื่อง ลักษณะโครงสร้างของโพลีซิลิคอน คล้ายกับก้อนอิฐที่นำมาวางดังรูปที่ 2.1(ก) ที่มีการวางก้อนอิฐกันอย่างกระจัดกระจายโดยก้อนอิฐแต่ละก้อนเปรียบเหมือน หน่วยเซลล์ และกองของก้อนอิฐเปรียบเหมือนโพลีซิลิคอน

ผลึกโมโนคริสตัลเป็นสารของแข็งที่เป็นหน่วยเซลล์ที่มีการเรียงตัวอย่างต่อเนื่อง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ผลึกรูปเดี่ยว (single crystal) ลักษณะโครงสร้างของผลึกรูปเดี่ยว คล้ายกับก้อนอิฐที่นำมาวางเรียงกันดังรูปที่ 2.1(ข) ที่มีการวางก้อนอิฐอย่างเป็นระเบียบโดยก้อนอิฐเปรียบเหมือน หน่วยเซลล์ และกองของก้อนอิฐเปรียบเหมือนผลึกรูปเดี่ยว ตัวอย่างเช่น ผลึกซิลิคอน เป็นต้น



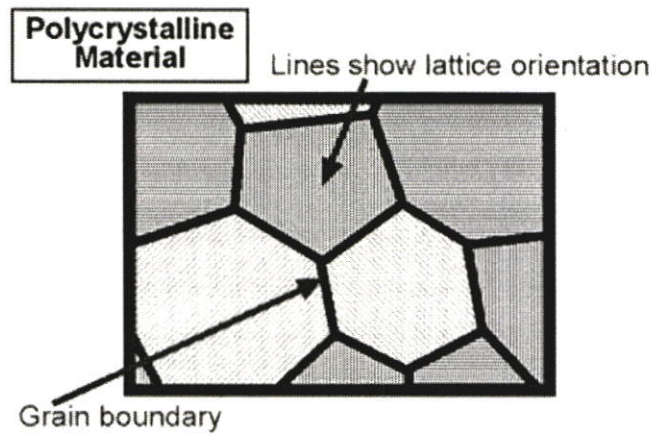
(ก) โครงสร้างโพลีซิลิคอน



(ข) โครงสร้างผลึกซิลิคอน

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโพลีซิลิคอนและซิลิคอน

เมื่อทำการดูที่ผิวหน้าของโพลีซิลิคอนมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 โดยภายในมีผลึกแต่ละก้อนที่แบ่งแยกด้วยขอบเขตเกรน (grain boundary) และผลึกในแต่ละก้อนนี้มี ระบายนาบผลึก (lattice orientation) หลายระบายนาบผลึกอยู่ในเนื้อฟิล์มเดียวกัน เช่น [111] และ [100] เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ผิวหน้าของโครงสร้างโพลีซิลิคอน

2.1.2 คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอน [2-4]

โพลีซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น สร้างได้ง่ายและทำการควบคุมความหนาได้ง่าย ดังในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ เนื่องจากสร้างจากเทคนิค LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่อยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1,000 อังสตรอมต่อชั่วโมงที่เปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอ (uniformity) เท่ากับ 0.5 แต่สำหรับเพอร์เซ็ปเครื่อง CVD สร้างใช้อุณหภูมิในการสร้างเพอร์อยู่ที่ 800-900 องศาเซลเซียส และเมื่อไปสร้างร่วมกับกระบวนการอื่น กระบวนการสร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้เพอร์มีการเปลี่ยนแปลงสภาพได้ สำหรับวัสดุผลึกซิลิคอน แกลเลียมอาร์เซไนด์ ส่วนมากจะสร้างจากเทคนิค MBE (Molecular Beam Epitaxy) ซึ่งราคาเครื่องค่อนข้างสูง และอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มค่อนข้างต่ำ

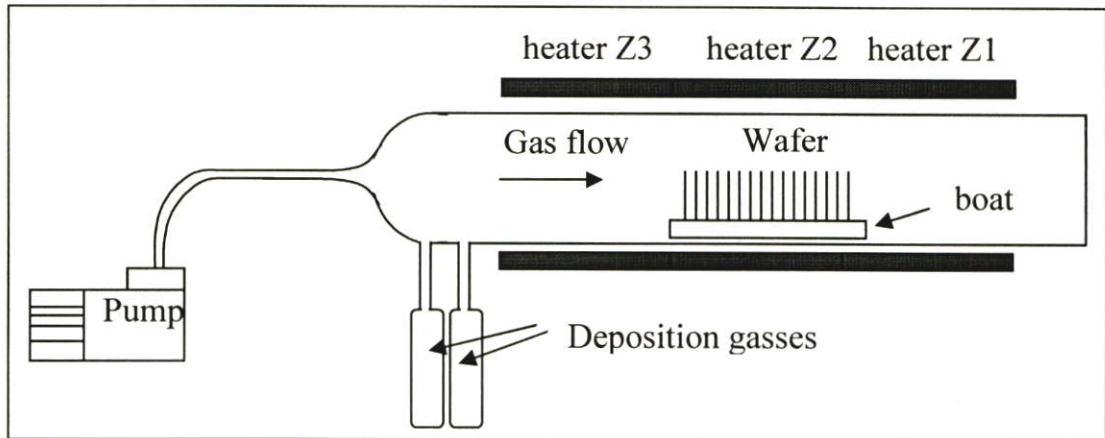
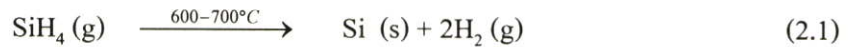
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ

คุณสมบัติ	หน่วย	วัสดุ				
		โพลีซิลิคอน	ผลึกซิลิคอน	เยอรมันเนียม	เพชร	แกเลียมอาร์เซไนด์
Density, ρ_m	(kg/m ³)	2320	2330	5350	3510	5316
Melting point, T_{mp}	(°C)	-	1410	937	3827	1238
Boiling point, T_{bp}	(°C)	-	2355	2830	4827	N/A
Electrical conductivity, σ	(10 ³ S/cm)	-	4 x 10 ⁻³	3 x 10 ⁻⁵	~10 ⁻¹⁷	~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, α_1	(10 ⁻⁶ /K)	2-2.8	2.6	5.7	1	5.7
Dielectric constant, ϵ_r	-	-	11.7	16.3	5.1	12
Yong's modulus, E_m	(GPa)	161	190	-	542	-
Breakdown field	(MV/cm)	-	0.3	0.1	-	0.5

2.1.3 กระบวนการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน [3-4]

ในการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอนจะใช้เครื่อง LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นแบบเตาความร้อนในแนวนอน (horizontal hot wall furnace) มีลักษณะเป็นท่อควอทซ์ (quartz tube) ทรงกระบอกวางในแนวนอนซึ่งถูกล้อมรอบด้วยฮีทเตอร์ 3 โชน โครงสร้างของระบบ LPCVD แสดงดังรูปที่ 2.3

การสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน ก๊าซที่ใช้คือ Silane (SiH_4) ที่อุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเครื่อง LPCVD แบบเตาความร้อนในแนวนอน

2.2 ทรานสดิวเซอร์

2.2.1 ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทีป [2]

โดยทั่วไปทรานสดิวเซอร์ความดันที่ใช้มี 2 วิธีการ คือ หลักพื้นฐานของคาปาซิทีป (capacitive) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของตัวเก็บประจุขณะเกิดการยุบตัวของไดอะแฟรมเมื่อให้ความดันและหลักพื้นฐานของเพียโซรีซิสทีป (piezoresistive) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานขณะเกิดการยุบตัวของไดอะแฟรมเมื่อให้ความดันลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์แบบนี้จะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับตัวต้านทานเพียโซรีซิสทีป และขนาดของไดอะแฟรม แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะในส่วนของทรานสดิวเซอร์ความดันที่ใช้หลักพื้นฐานของเพียโซรีซิสทีปเพราะจะนำเทคนิคนี้ไปทำการวิจัยต่อไป

2.2.2 สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปตามยาวและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปตามขวาง[5-6]

เมื่อมีแรงใดๆมากระทำกับวัสดุแล้วทำให้วัสดุนั้นมีความเค้นเกิดขึ้น พบว่าสนามไฟฟ้า (E) จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแส (J) และความเค้น (σ) ดังสมการที่ 2.2

$$\dot{E} = \rho J + \pi J \sigma \quad (2.2)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพความต้านทาน
 π คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีทีฟ

สำหรับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางใดๆในโครงผลึก เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.3 จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{E} = \rho_0 J_1 + \pi_1 \rho_0 J_1 \sigma_1 \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ_1 คือ สภาพความต้านทานเริ่มต้น
 π_1 คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีทีฟตามยาว (longitudinal piezoresistive coefficient)

จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับสภาพต้านทานและความหนาแน่นกระแส ดังสมการที่ 2.4

$$\dot{E} = \rho J \quad (2.4)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.4 ลงในสมการที่ 2.3 จะได้ว่า

$$\rho_1 J_1 = \rho_0 J_1 + \pi_1 \rho_0 J_1 \sigma_1 \quad (2.5)$$

หรือ

$$\rho_1 = \rho_0 + \pi_1 \rho_0 \sigma_1 \quad (2.6)$$

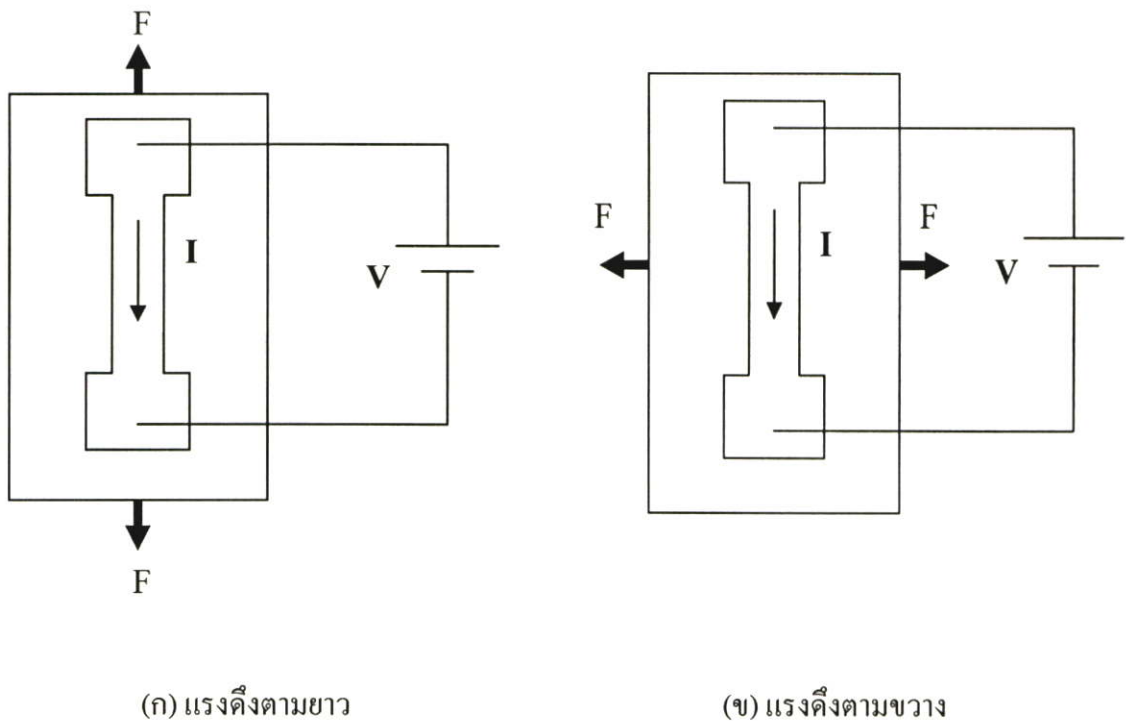
$$\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} = \pi_1 \sigma_1 \quad (2.7)$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_t \sigma_1 \quad (2.8)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อกำหนดให้ π_t คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปตามขวาง (transverse piezoresistive coefficient) ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 ถึง 2.8 จะได้ว่า

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_t \sigma_1 \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 พบว่าทั้งสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปตามยาวและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปตามขวาง เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุแล้วทำให้เกิดความเค้นขึ้นโดยสัมพันธ์กับอัตราเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานในวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของแรง (F) ที่มากระทำโดยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปตามยาวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุดังรูปที่ 2.4 (ก) ส่วนสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปตามขวางจะเกิดเมื่อมีแรงตามขวางมากระทำกับวัสดุดังรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุ

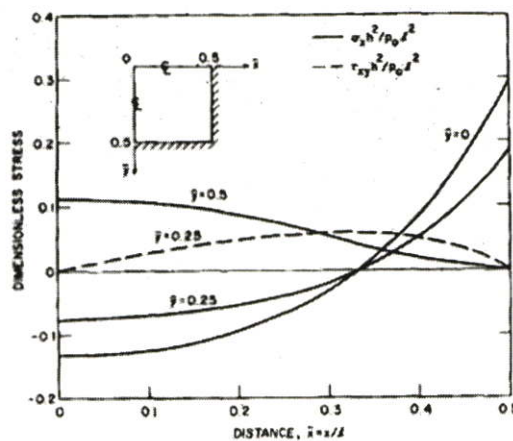
2.2.3 ความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวาง [7]

เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรมแล้ว ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัวทำให้เกิดความเค้นขึ้นในตัว ด้านทาน ซึ่งประกอบด้วยความเค้นตามความยาว (σ_x) และความเค้นตามขวาง (σ_y) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.10

$$\sigma_{(x,y)} = \bar{\sigma}_{(x,y)} \left[\frac{l}{h} \right]^2 p \quad (2.10)$$

- เมื่อ $\sigma_{(x,y)}$ คือ ตำแหน่งความเค้นบนไดอะแฟรม
 $\bar{\sigma}_{(x,y)}$ คือ ความเค้นโดเมนชันเลส (dimensionless stress)
 l คือ ความกว้างของไดอะแฟรม
 h คือ ความหนาของไดอะแฟรม
 p คือ ความดันที่ให้กับไดอะแฟรม

จากสมการที่ 2.10 จะเห็นว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของไดอะแฟรม ความหนาของไดอะแฟรม และความดันที่ป้อนให้กับไดอะแฟรมแล้วยังขึ้นอยู่กับความเค้นโดเมนชันเลสเป็นส่วนสำคัญอีกด้วยซึ่งค่าของความเค้นโดเมนชันเลสนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามตำแหน่งการวางตัวด้านทานไดอะแฟรมดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกระจายค่าความเค้นโดเมนชันเลสใน 1 ควอดรอนที่บริเวณต่างๆ บนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากรูปที่ 2.5 เป็นกราฟแสดงการกระจายค่าความเค้นไคเมนชันเลสใน 1 ควอทแรนที่บริเวณต่างๆ กันบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความเค้นไคเมนชันจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของไดอะแฟรมทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นเมื่อป้อนความดันให้กับไดอะแฟรมจะทำให้ความเค้นตามความยาวและความเค้นตามขวางเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยที่ความเค้นตามความยาวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0, \bar{y} = 0.5$ บนไดอะแฟรมและความเค้นตามขวางอยู่ที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0.5, \bar{y} = 0$ บนไดอะแฟรม และเมื่อแทนค่าความเค้นไคเมนชันเลสที่ตำแหน่งดังกล่าวลงในสมการที่ 2.10 จะทำให้สามารถคำนวณหาความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวางได้ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12 ดังนี้

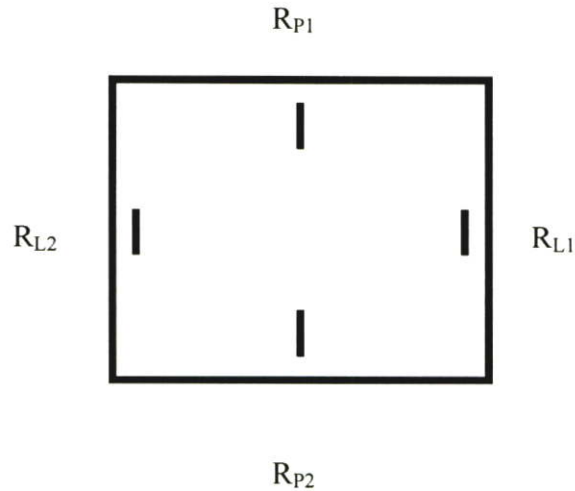
$$\begin{aligned} \sigma_l &= \sigma(0,0.5) \\ &= 0.155 \left[\frac{l}{h} \right]^2 p \end{aligned} \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \sigma(0.5,0) \\ &= 0.294 \left[\frac{l}{h} \right]^2 p \end{aligned} \tag{2.12}$$

เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรม ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัว ทำให้มีความเค้นขึ้นซึ่งที่บริเวณตำแหน่งขอบของไดอะแฟรมจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุดดังสมการที่ 2.11 และ 2.12 ดังนั้นจะเห็นว่าในการออกแบบการวางตำแหน่งของตัวต้านทานบนไดอะแฟรมจึงควรออกแบบให้ตัวต้านทานอยู่ชิดขอบไดอะแฟรม เพื่อให้เกิดความเค้นในตัวต้านทานมากที่สุดใน 1 ควอทแรน ดังนั้นเมื่อพิจารณาครบทั้ง 4 ควอทแรน บริเวณที่เกิดความเค้นในตัวต้านทานมากที่สุด คือ บริเวณตรงกลางของขอบ

2.2.4 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิวิตีในตัวต้านทาน[8-9]

การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทั้ง 4 ตัวบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะประกอบไปด้วยตัวต้านทานในแนวขนานขอบไดอะแฟรม (parallel resistor) 2 ตัวคือ R_{L1}, R_{L2} และตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก (perpendicular resistor) 2 ตัวคือ R_{P1}, R_{P2} ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทั้งในแนวขนานและในแนวตั้งฉากขณะให้ความดันบนไดอะแฟรมนี้จะมีสัมพันธ์กับความเค้นที่เกิดขึ้นและ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิวิตีดังสมการที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 ตัวต้านทาน 4 ตัวบนไดอะแฟรม

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_L = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.13)$$

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_P = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.14)$$

เมื่อ $\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_L$ คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในแนวขนาน

$\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_P$ คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในแนวตั้งฉาก

π_l คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ไปตามยาว (longitudinal piezoresistive coefficient)

π_t คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ไปตามขวาง (transverse piezoresistive coefficient)

σ_l คือ ความเค้นตามยาว (longitudinal stress)

σ_t คือ ความเค้นตามขวาง (transverse stress)

โพลีซิลิคอนที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธี LPCVD จะมีลักษณะไม่เป็นผลึกเดี่ยว แต่จะเป็นผลึกแบบหลายรูป ซึ่งมีทั้งระนาบ (100) และระนาบ (111) ดังนั้นตัวต้านทานโพลีซิลิคอน ที่สร้างขึ้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ไปตามยาวและสัมประสิทธิ์ตามขวางเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งไม่สามารถ

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์เป็ยโซริชี่สที่ปได้เหมือนกับโครงสร้างผลึกรูปเดี่ยวได้ คังนั้นค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เป็ยโซริชี่สที่ปของโพลิชี่ลิกอนหาได้จากความสัมพันธ์ของเกจแฟคเตอร์ (gage factor) และค่าของยัง โมคูลัส (young's modulus) ดังสมการที่ 2.15 และ 2.16 ดังนี้

$$\langle \pi_l \rangle = \frac{GF_l}{\langle Y \rangle} \quad (2.15)$$

$$\langle \pi_t \rangle = \frac{GF_t}{\langle Y \rangle} \quad (2.16)$$

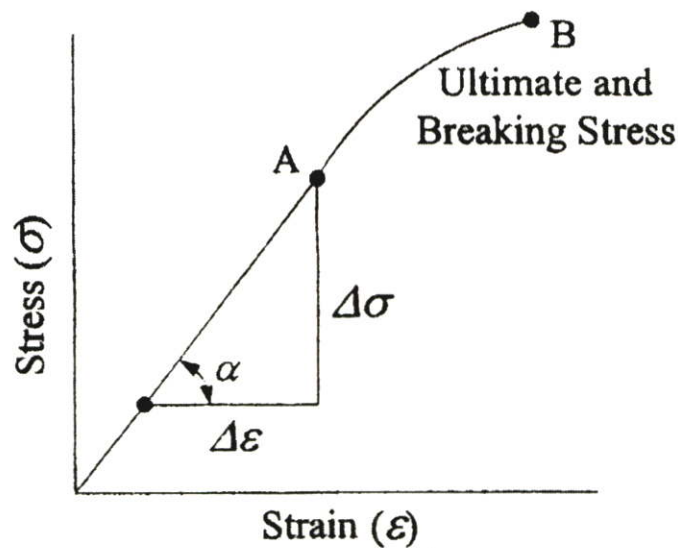
- เมื่อ $\langle \pi_l \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เป็ยโซริชี่สที่ปตามยาว
 $\langle \pi_t \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เป็ยโซริชี่สที่ปตามขวาง
 $\langle Y \rangle$ คือ ยัง โมคูลัสเฉลี่ยของฟิล์มโพลิชี่ลิกอน
 GF_l คือ เกจแฟคเตอร์ตามยาว (longitudinal gage factor)
 GF_t คือ เกจแฟคเตอร์ตามขวาง (transverse gage factor)

จากการค้นพบของฮุก (Hook) พบว่าในวัสดุหลายๆชนิดที่มีขนาดจำกัด อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าคงที่ซึ่งค่าคงที่ตามกฎของฮุก นี้เรียกว่าดัชนีการยืดหดตัวของวัสดุหรือ โมคูลัสของวัสดุ (Modulus of elastic of material) ดังสมการที่ 2.17

$$Y = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.17)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แสดงไว้ข้างต้น จะเห็นว่าค่าของความเค้นของวัสดุที่มีแรงภายนอกมากกระทำนั้นสามารถคำนวณได้โดยการวัดความเครียดของวัสดุนั้นแล้วคูณด้วยดัชนีของการยืดหดตัวของวัสดุนั้น ความเค้นนี้ไม่ได้เป็นปริมาณทางกายภาพที่มีอยู่แต่เป็นปริมาณที่ต้องการหา อย่างไรก็ตามค่าของความเค้นนี้จะสามารถหาได้ภายในขอบเขตที่กำหนดเท่านั้น ทั้งนี้เพราะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัตถุจะเป็นเชิงเส้นในช่วงแรกๆ เท่านั้น รูปที่ 2.7 แสดงถึงเส้นโค้ง (Curve) ของความเค้นและความเครียดโดยทั่วๆ ไป ถ้าหากว่านำเอาโลหะชิ้นหนึ่งมาทำการยืดในเครื่องทดสอบและทำการวัดอย่างเที่ยงตรงแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะคล้ายกับรูปที่ 2.7 มาก จากรูปมีจุดสำคัญที่ควรพิจารณาดังนี้

1. ในช่วงแรกของ Curve นั้นค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง นั่นคือความชันมีค่าคงที่
2. เมื่อพ้นจุด A ไปแล้ว ความเครียดจะไม่เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความเค้น จุด A นี้เรียกว่าจุด Proportional Limit จากจุด A ถึงจุด B นั้นวัตถุยังอยู่ในขอบเขตของการยืดตัวและสามารถกลับไปสู่ความยาวเดิมได้เมื่อนำแรงที่มากกระทำออกไป
3. จุด B เป็นจุดล้า (yield point) ของโลหะ เมื่อถึงจุด B ความเครียดก็จะยังคงมีอยู่เรื่อยๆ ถึงแม้ว่าจะไม่มีการเพิ่มแรงกระทำ
4. เมื่อวัตถุถูกยืดจนเลยจุด B วัตถุนั้นจะไม่สามารถกลับไปมีค่าความยาวเดิมได้ ถึงแม้ว่าจะมีแรงที่มากกระทำออกไปก็ตาม



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ค่าของยังโมดูลัสในแต่ละวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากัน และแตกต่างกันไปดังแสดง ในตาราง 2.1 สำหรับเกจแฟกเตอร์ตามยาวและเกจแฟกเตอร์ตามขวางในสมการที่ 2.16 และ 2.17 จะสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสภาพด้านทานกับความเครียดที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.19 และ 2.20 ดังนี้

$$GF_l = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \frac{1}{\epsilon_l} \quad (2.19)$$

$$GF_l = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \frac{1}{\varepsilon_l} - 1 \quad (2.20)$$

เมื่อ ε_l คือ ความเครียด (strain) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมต่อความยาวเดิมก่อนถูกแรงกระทำดังสมการที่ 2.21

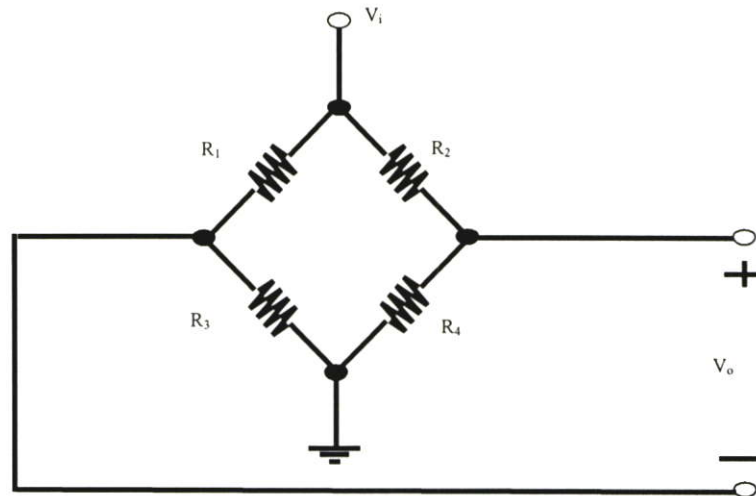
$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.21)$$

ค่าเกจแฟกเตอร์นี้ในแต่ละวัสดุมีค่าไม่เท่ากันซึ่งค่าของเกจแฟกเตอร์นี้จะเป็นตัวแปรที่จะบอกถึงความไวของเกจ เช่น ถ้าเกจแฟกเตอร์มีค่าสูงหมายถึง เกจนั้นมีความไวในการเปลี่ยนแปลงสูงเป็นต้น

2.3 วงจรวิทสโตนบริดจ์ [10]

วงจรวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge circuit) จะถูกนำมาใช้กับทรานสดิวเซอร์ความดันเพื่อใช้ในการแปรค่าจากความดันไปสู่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้สามารถทราบถึง ปริมาณความดันที่เปลี่ยนแปลงไปโดยพิจารณาได้จากปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น วงจรวิทสโตนบริดจ์ชนิดพาสซีฟเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัวต่อกันเป็นรูปดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเมื่อวงจรบริดจ์อยู่ในสถานะสมดุลแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท V_0 จะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ และจะทำให้อัตราส่วนค่าความต้านทานดังสมการที่ 2.22

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.8 วงจรวีทสโตนบริดจ์

เมื่อความต้านทานในวงจรบริดจ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง วงจรบริดจ์จะอยู่ในสถานะไม่สมดุลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเอาต์พุต V_o ขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหา V_o ได้ดังสมการที่ 2.23

$$V_o = V_i \times \frac{\Delta R}{R} \quad (2.23)$$

2.4 ความไวในการตอบสนอง [6]

ทรานสดิวเซอร์ทุกชนิดสิ่งแรกที่จะต้องคำนึงคือ ความไวในการตอบสนอง (sensitivity) ซึ่งเซนเซอร์ที่ดีนั้นควรจะต้องมีความไวสูงและคงที่นั่นหมายความว่าเซนเซอร์นั้นจะมีการตอบสนองต่ออินพุตที่มากขึ้นได้ ความไวในการตอบสนองจะเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาต์พุตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางอินพุต เมื่อให้ y เป็นเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์กับ x ซึ่งเป็นเอาต์พุต โดยเป็นไปตามฟังก์ชัน $y = f(x)$ ดังนั้นสมการความไว S ที่จุด x_a ใดๆจะสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a} \quad (2.24)$$

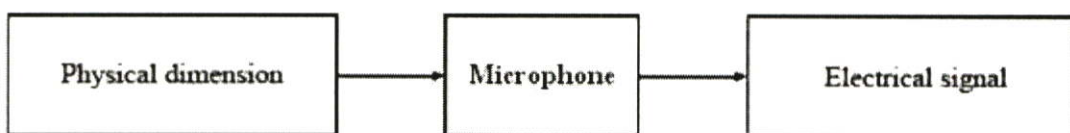
สำหรับทรานสดิวเซอร์ความดันนั้น ความไวในการตอบสนองต่อความดันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.25 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อแรงดันคงที่ของวงจรวีทสโตนบริดจ์

$$S = \frac{\Delta V}{V_i \Delta P} = \frac{\Delta R}{R \Delta P} \quad (2.25)$$

- S คือ ความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน
 ΔV คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตของวงจรวีทสโตนบริดจ์
 ΔR คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน
 ΔP คือ การเปลี่ยนแปลงความดัน
 V_i คือ แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ของวงจรวีทสโตนบริดจ์
 R คือ ค่าความต้านทาน

2.5 ไมโครโฟน [11]

ไมโครโฟนนั้นเป็นทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันที่เกิดจากคลื่นเสียงให้เป็นแรงดันไฟฟ้า แสดงดังในรูปที่ 2.9 ในระยะแรกๆ นั้นไมโครโฟนได้ถูกผลิตโดยบริษัท Tannoy for the intercom associated ประเทศรัสเซีย เพื่อใช้ในเครื่องรับส่งวิทยุและนำไปติดตั้งไว้ในรถถังสำหรับการรบเมื่อสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานพื้นฐานของไมโครโฟน

2.5.1 คุณสมบัติของไมโครโฟน

คุณสมบัติที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดข้อมูลทั้งหมดของไมโครโฟนนั้นมีด้วยกัน 3 ประการ ซึ่งจำเป็นมากที่ควรจะรู้ ซึ่งมีดังนี้

2.5.1.1 ความไวในการตอบสนอง (Sensitivity)

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของไมโครโฟน คือ ความไวในการรับสัญญาณ ความไวของไมโครโฟนจะแสดงหน่วยเป็น dBV/ μ bar เมื่อ dBV คือ ค่าระดับแรงดันขาออกเป็น dB เทียบกับ 1 V ที่กำลังอัดของคลื่นเสียง 1 μ bar (หรือ 0.1 N/m²) ความไวของไมโครโฟนโดยทั่วไปจะอยู่ในย่าน -50 ถึง -125 dBV/ μ bar ลักษณะโดยทั่วไปไมโครโฟนขนาดใหญ่ๆ จะมีความไวสูง แต่ความถี่ตอบสนอง (Frequency Response) ต่ำ และไมโครโฟนขนาดเล็กๆ จะมีความไวต่ำแต่ความถี่ตอบสนองสูง

2.5.1.2 การตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response)

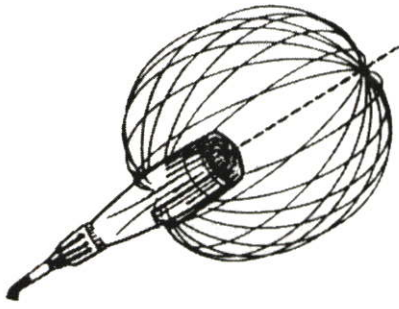
การที่ไมโครโฟนสามารถขยายได้ไม่น้อยกว่า ± 0.01 เดซิเบล จากไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเป็นสิ่งที่ดี แต่ผลจากการใช้การตอบสนองต่อความถี่ที่สมดุลนั้นสามารถทำให้ได้ผลดีขึ้น คือจะได้สัญญาณที่ราบเรียบขึ้นเป็นสิ่งที่ผิด จากการทดลองได้พบว่า การตอบสนองต่อความถี่ที่สมดุลนั้นจะให้ค่าการขยายต่ำกว่า -3 เดซิเบล ที่ความถี่ 1 Hz และจะให้ค่าการขยายที่สูงกว่า -3 เดซิเบล ที่ความถี่ 400 Hz ซึ่งในการทำงานจะเห็นได้ชัดสำหรับความถี่ที่ 20 Hz - 20 kHz ส่วนที่ความถี่ 40 Hz และ 10 kHz จะแสดงผลที่ชัดเจนน้อยลงซึ่งสามารถยอมรับได้น้อยที่สุด ที่ความถี่ 200 Hz และ 2 kHz แต่ในระบบโทรศัพท์นั้นจะจำกัดความถี่ไว้ที่ 300 Hz และ 3.4 kHz ซึ่งมันจะทำให้การขยายสัญญาณมีค่า 1020 และในระบบงานที่จำกัดความถี่ไว้ที่ 200 Hz และ 5.1 kHz ก็คือโทรศัพท์ขนาดเล็ก หรือในวิทยุก็ได้

2.5.1.3 ทิศทางในการตอบสนอง (Directionality)

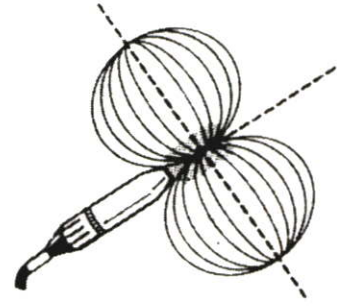
ไมโครโฟนโดยทั่วไปนั้นจะมีอุปกรณ์ที่ตอบสนองต่อสัญญาณเสียง คือ ไดอะแฟรม โดยไมโครโฟนประเภทนั้นๆ จะถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความไวต่อเสียงในทิศทางนั้นๆ ซึ่งสามารถแบ่งทิศทางการรับเสียงได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. โอมนิไดเร็กชันนอล (Omni directional) เป็นไมโครโฟนที่รับทิศทางเสียงรอบตัว
2. ไบไดเร็กชันนอล (Bidirectional) ทำหน้าที่รับเสียงทางด้านริมซ้ายขวา หรือหน้าหลัง
3. ยูนิไดเร็กชันนอล (Unidirectional) รับเสียงทางด้านหน้าอย่างเดียว

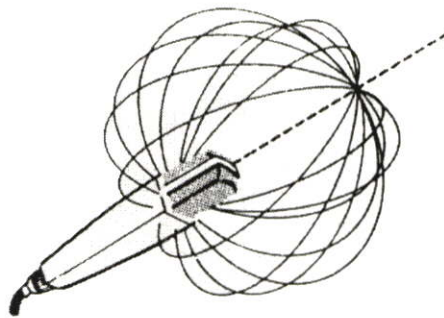
ซึ่งรูปแบบทิศทางเสียงของไมโครโฟนทั้ง 3 ประเภทได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.10 โดยไมโครโฟนที่ให้ทิศทางเสียงโอมนิไดเร็กชันนอลและไบไดเร็กชันนอลได้มีการนำมาผสมกัน โดยวิธีการออกแบบที่ยืดหลักการอิเล็กทรอนิกส์ไฮบริด ส่วนไมโครโฟนชนิดยูนิไดเร็กชันนอลเป็นไมโครโฟนที่ไม่ได้เอาหลักการของทิศทางไปผสมกับตัวอื่นๆ โดยการผสมระหว่างโอมนิไบไดเร็กชันนอล สามารถดูได้จากรูปที่ 2.11



(ก) โอมนิไดเร็คชั่นนอล

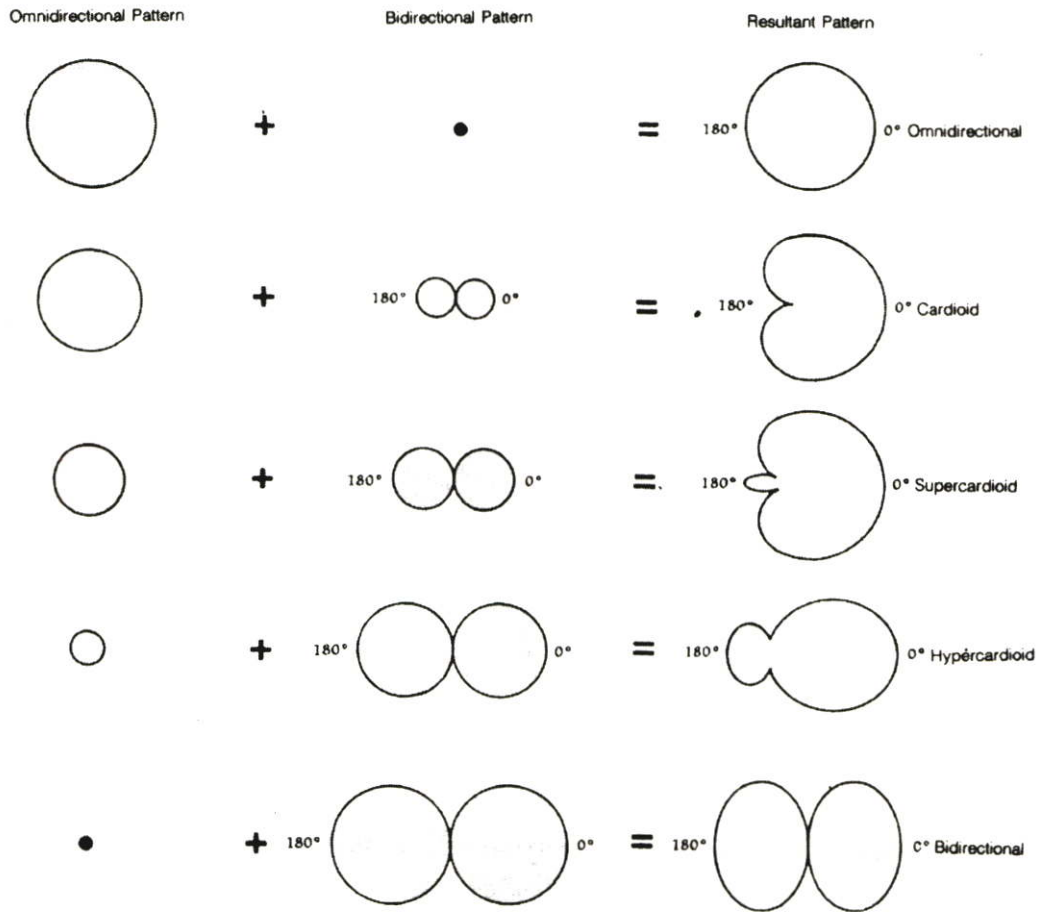


(ข) ไบไดเร็คชั่นนอล



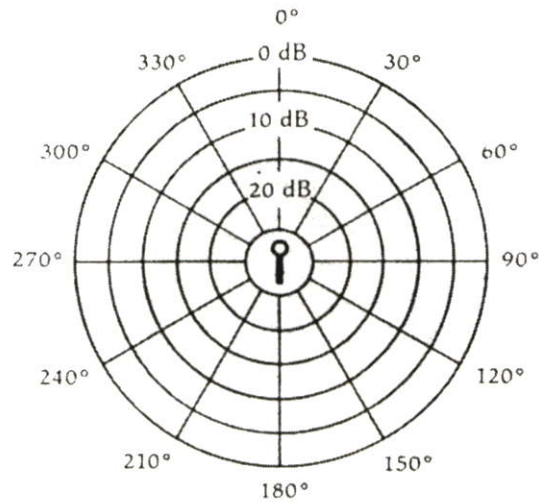
(ค) ยูนิไดเร็คชั่นนอล

รูปที่ 2.10 รูปแบบทิศทางของการรับเสียงในไมโครโฟนแบบต่างๆ



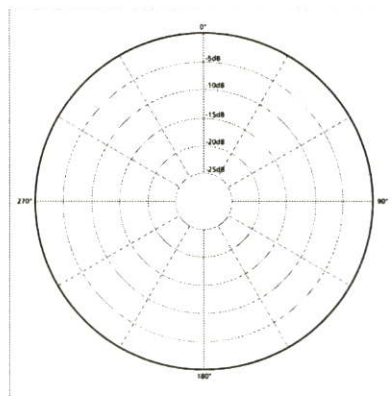
รูปที่ 2.11 การผสมกันระหว่างโอมนิไดเรกชันนอลและไบไดเรกชันนอล

ความแม่นยำแน่นอนของไมโครโฟนตัวหนึ่งกับไมโครโฟนอีกตัวหนึ่งต้องประกอบไปด้วย ลักษณะเชิงมุมหรือผลตอบสนอง “โพลาร์” (Polar) ด้วย หากจะพิจารณาถึงผลตอบสนองมุมเสียงที่ ถูกต้องเด่นชัด สามารถจะศึกษาได้จากสเปคของไมโครโฟนที่ทางผู้ผลิตระบุมา อย่างไรก็ดีเพื่อให้เกิด ความเข้าใจโดยเบื้องต้น จึงขอพิจารณาจากรูปแบบทิศทางเสียงจากรูปที่ 2.12 ซึ่งได้แสดงเป็นรูปกราฟ วงกลม มีการแยกส่วนออกไปเป็นส่วนต่างๆ ด้วยค่ามุม 30 องศา การอ่านทำความเข้าใจสามารถแสดง ได้ด้วยการอ่านรอบต่างๆ ของกราฟ ไม่ว่าจะเป็นรอบในหรือรอบนอก แต่ละวงรอบที่ปรากฏจะให้ค่า รอบละ 5 เดซิเบล

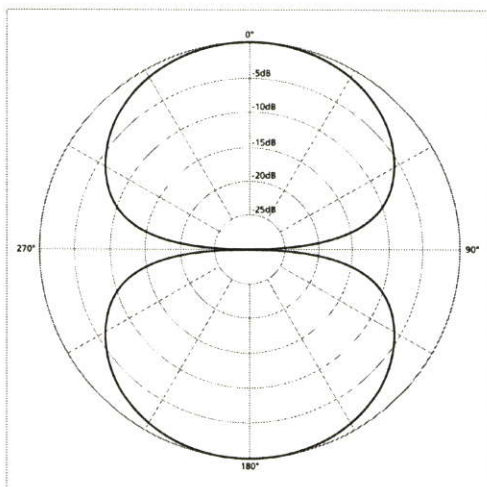


รูปที่ 2.12 กราฟวงกลมผลตอบสนองเชิงมุม

ผลการตอบสนองเชิงมุมของโอมนิไดเร็กชันนอลจะมีพิคอัพแพทเทิร์นรอบทิศทาง ซึ่งมีระดับความแรงสม่ำเสมอในทุกทิศทางดังรูปที่ 2.13 ในขณะที่ไมโครโฟนชนิดไปไดเร็กชันนอลจะมีความไวต่อสัญญาณเสียงที่มาจากด้านหน้าและด้านหลัง (มุม 0 และ 180 องศา) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ความไวของการรับสัญญาณจะดีขึ้นเสียงนั้นอยู่ทางด้านหน้าเสียงที่มุม 50, 130, 230 (และ 310 องศาจะถูกลดทอนลง 5 เดซิเบล เสียง ณ มุม 60, 120, 240 และ 300 องศาจะถูกลดทอนลง 10 เดซิเบล และมุมที่ 90 และ 270 องศา ไมโครโฟนชนิดนี้จะไม่สามารถตอบสนองได้)

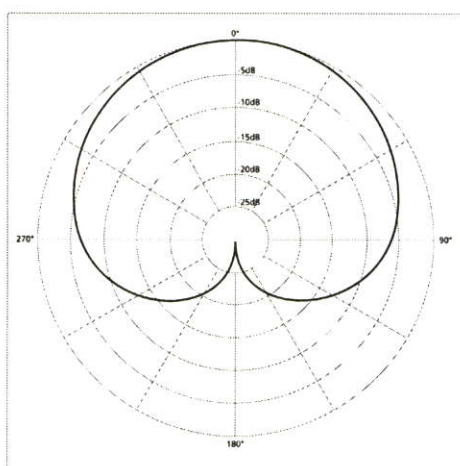


รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองเชิงมุมของโอมนิไดเร็กชันนอล

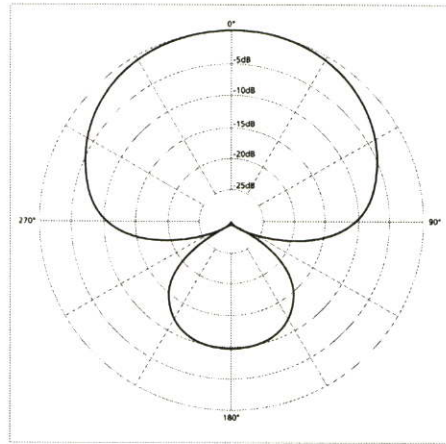


รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองเชิงมุมของไบโคเร็คชั่นนอล

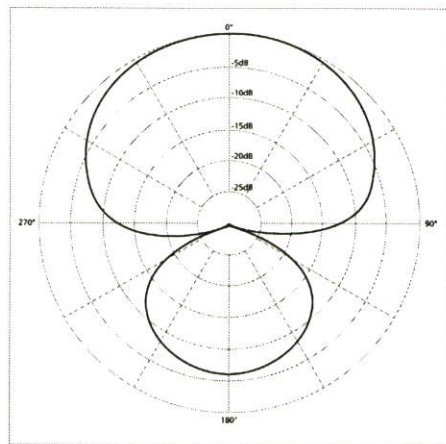
ในขณะที่ไมโครโฟนแบบคาร์ดิอยด์ตอบสนองทิศทางเสียงได้เพียงด้านเดียว เสียง ณ มุม 180 องศาจะถูกคัดทิ้งจนหมด ไม่มีโอกาสจะรับได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 ในพัฒนาการของคาร์ดิอยด์ได้พัฒนาไปมากกว่าระบบรับสัญญาณเสียงทิศทางเดียวอย่างชนิดที่เรียกว่า “ยูนิโคเร็คชั่นนอล” ไปแล้ว ซึ่งพบว่าไมโครโฟนแบบนี้แยกออกไปเป็นซูเปอร์และไฮเปอร์ แพทเทิร์นเชิงมุมของไมโครโฟนแบบนี้จะให้มุมที่แคบ โดยเน้นทิศทางเสียงด้านหน้าเป็นประเด็นหลัก และพยายามกันสัญญาณเสียงด้านริมออกไปดังรูปที่ 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองเชิงมุมของยูนิโคเร็คชั่นนอล



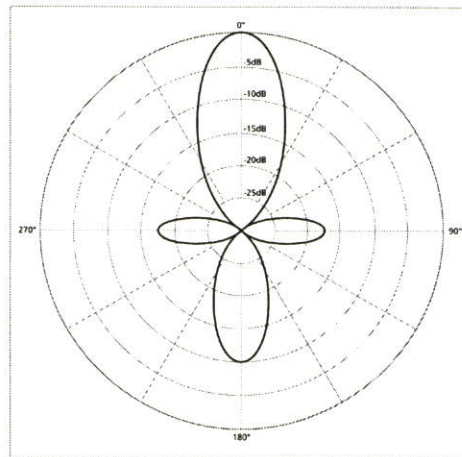
รูปที่ 2.16 ทิศทางเชิงมุมของไมโครโฟนชนิดซูปเปอร์คาร์ดิอยด์



รูปที่ 2.17 ทิศทางเชิงมุมของไมโครโฟนชนิดไฮเปอร์คาร์ดิอยด์

ความต่างระหว่างซูปเปอร์กับไฮเปอร์คาร์ดิอยด์ไมโครโฟน อยู่ที่ไมโครโฟนแบบซูปเปอร์คาร์ดิอยด์สามารถจัดเสียงริมๆ ทั้งสองด้านและเสียงด้านหลังไม่ให้เข้ามาจนได้ เพราะคุณสมบัติของไมโครโฟนแบบนี้รับสัญญาณทิศทางเดียว ในขณะที่ชนิดไฮเปอร์คาร์ดิอยด์สามารถจัดเสียงด้านข้างทั้งสองด้านได้ดีกว่า แต่ขจัดเสียงที่มาจากด้านหลังได้เร็วกว่า และเพื่อบัพมูมของการรับสัญญาณให้แคบลง จึงได้มีการคิดอุลตร้าคาร์ดิอยด์ขึ้นมาดังแสดงทิศทางเชิงมุมเอาไว้ในรูปที่ 2.18 เพื่อให้เห็นว่า มันมีทิศทางแคบ แต่ก็ยังมีเสียงด้านข้างและด้านหลังลอดเข้าไปได้เล็กน้อย การใช้ไมโครโฟนมีทิศทาง

และเชิงมุมแบบโคไซน์ขึ้นอยู่กับงาน ดังนั้นงานบางอย่างที่ไม่ต้องการเสียงก้องเสียงทิศทางอื่นก็ต้องเลือกไมโครโฟนที่มีทิศทางเชิงมุมแคบไว้



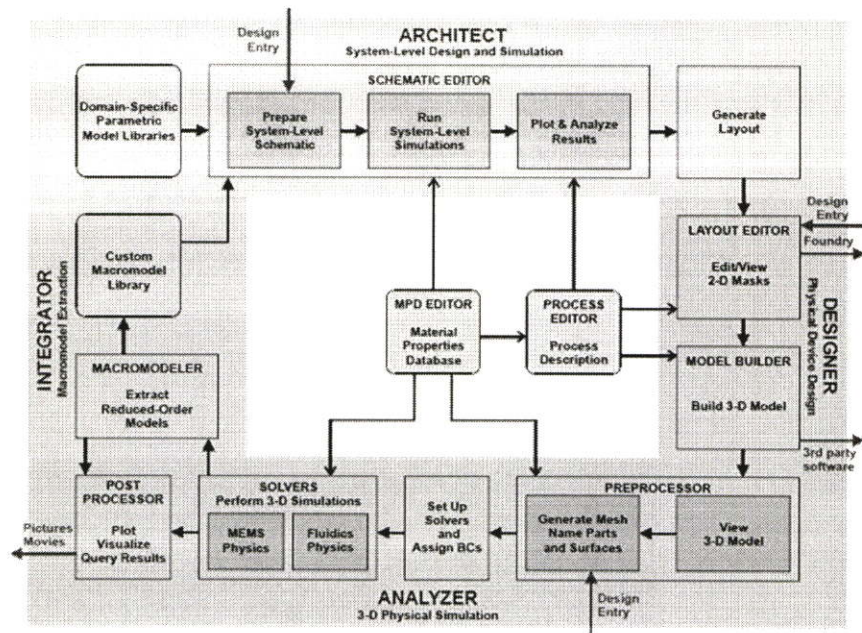
รูปที่ 2.18 ทิศทางเชิงมุมของไมโครโฟนชนิดอูลตราคาร์ดิอยด์

บทที่ 3

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1 โคเวนเตอร์แวร์

โปรแกรม CoventorWare™ [12] เป็นโปรแกรม ใช้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ MEMS (Micro Electro Machine System) และ Microfluidic ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระดับ System และ Physical โดยลักษณะใกล้เคียงกับระดับ System นำไปสู่การอธิบายพฤติกรรมของโมเดลโดยใช้กับระบบที่มีความเร็วสูง การออกแบบระดับ System สามารถใช้การสร้าง 2-D layout ที่ตรงกันกับระดับ Physical ได้ การที่จะทำให้มีลักษณะใกล้เคียงกับ Physical ทำได้โดยเริ่มจากการสร้าง 2-D layout เพื่อนำไปสู่การสร้าง 3-D Model แล้วสร้าง Mesh และจำลองการทำงานโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ FEM หรือ BEM โดยสามารถลดระดับของ Micromodels เพื่อที่จะสามารถลดความต้องการระบบในการจำลองได้ ถ้า 2-D layout ถูกต้องก็สามารถนำไปสู่การผลิตได้ ซึ่งโปรแกรม CoventorWare™ มีทางเลือกมากมายในการออกแบบและการแก้ปัญหา (Solver) โดยที่การทำงานของโปรแกรม CoventorWare™ สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน แสดงดังในรูปที่ 3.1

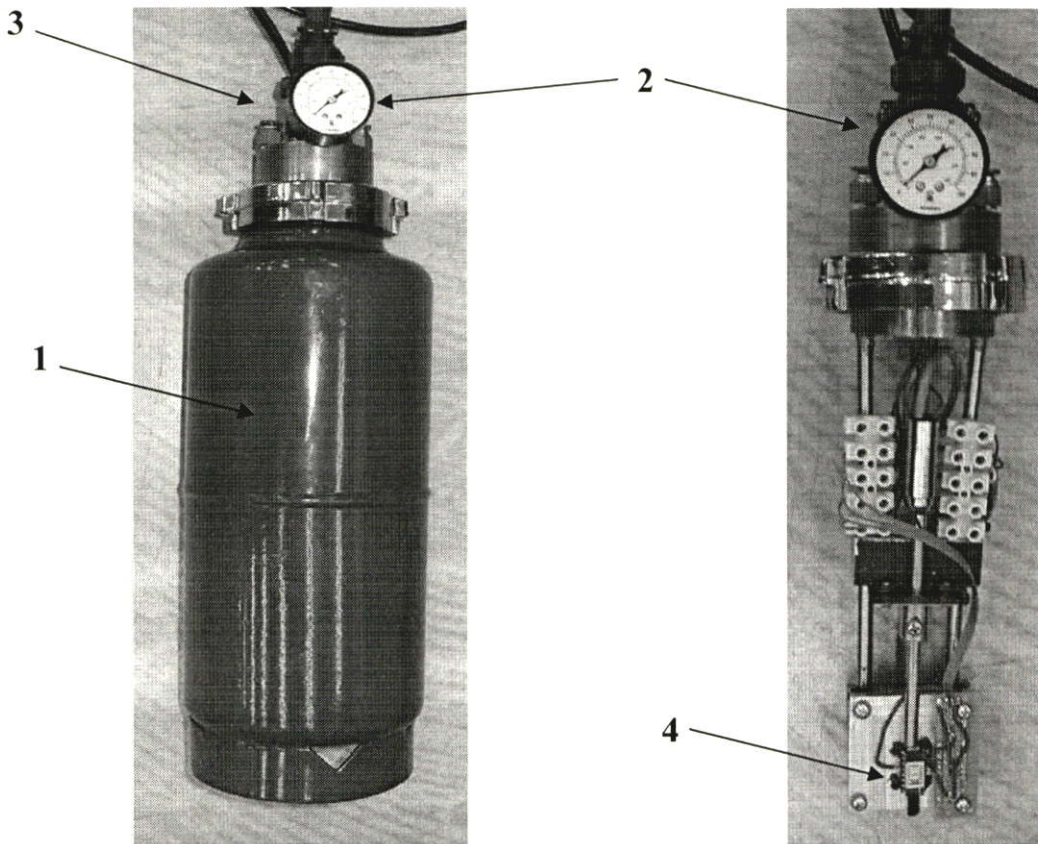


รูปที่ 3.1 การทำงานของ CoventorWare™

3.2 ชุดเครื่องมือทดสอบความดัน

ชุดเครื่องมือที่ใช้วัดความดันในงานวิจัยนี้ได้ทำการประกอบสร้างขึ้นเองซึ่งมีส่วนประกอบด้วยดังนี้

1. ถังอัดความดัน
2. เกจสำหรับวัดความดัน
3. ท่อจ่ายแรงดันไปยังถังอัดความดัน
4. อุปกรณ์ยึดจับและจับสัญญาณเช่นเซอร์วัดความดัน



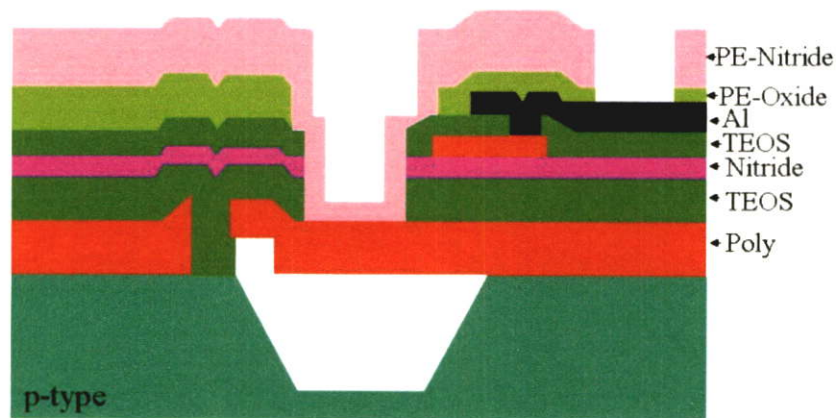
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดแรงดัน

บทที่ 4

การทดลอง

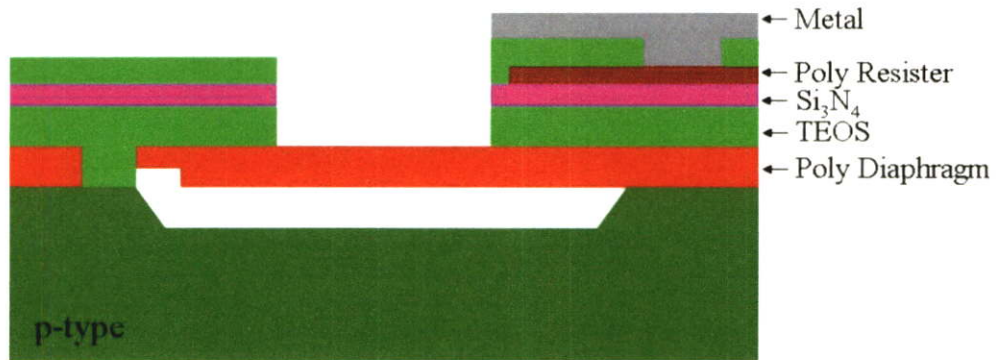
4.1 โครงสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรมของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็กได้ ซึ่งโครงสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปของ TMEC แสดงดังในรูปที่ 4.1 ที่มีโพลีซิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ และมีความหนา $1.5 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปของ TMEC

สำหรับโครงสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปของงานวิจัยนี้แสดงดังในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเชิงผิว [13] โดยแสดงถึงภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดเงื่อนไขของโพลีซิลิกอนดังนี้ โพลีซิลิกอนไดอะแฟรมจะมีขนาดทั้งหมด 4 ค่าคือ 100×100 , 200×200 , 300×300 และ $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ และที่ความหนา 5 ค่าคือ 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ $2 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.2 โครงสร้างภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเป็ยโซริสที่ป
ที่ใช้ในการออกแบบในงานวิจัยนี้

4.2 การทดลอง

4.2.1 เงื่อนไขในการทดลอง

เงื่อนไขในการทดลองของงานวิจัยนี้จะมีอยู่ 3 เงื่อนไขดังนี้

4.2.1.1 ขนาดของไดอะแฟรม

เงื่อนไขของขนาดพื้นที่ของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่งานวิจัยนี้กำหนดจะมีทั้งหมด 4 ค่าดังนี้
คือ 100×100 , 200×200 , 300×300 และ $400 \times 400 \mu\text{m}^2$

4.2.1.2 ความหนาของไดอะแฟรม

เงื่อนไขของความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่งานวิจัยนี้กำหนดจะมีทั้งหมด 5 ค่าดังนี้
คือ 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ $2 \mu\text{m}$

4.2.1.3 ความดัน

เงื่อนไขของความดันที่งานวิจัยนี้จะมี 2 เงื่อนไขด้วยกัน คือ เงื่อนไขที่ใช้กับ CoventerWare™
ความดันที่ใช้จะอยู่ในช่วงความดันเสียงซึ่งคือความดันในช่วง 2-20 mPa และเงื่อนไขที่ใช้กับชุด
เครื่องมือทดสอบความดันจะอยู่ที่ 0-50 kPa

4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

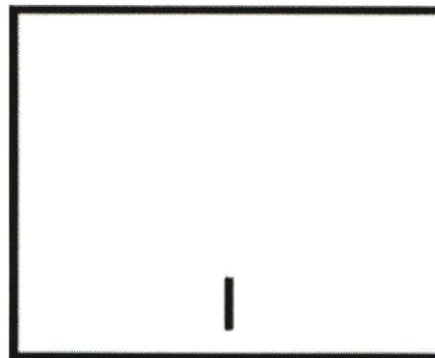
ขั้นตอนในการทดลองของงานวิจัยนี้จะสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

4.2.2.1 การหาตำแหน่งการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม

ในขั้นตอนการทดลองนี้จะทำการทดลองด้วย CoventorWare™ การหาตำแหน่งในการวางตัวด้านทานนี้จะแบ่งลักษณะการวางตัวด้านทานออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การวางตัวด้านทานในแนวขนานกับโพลีซิลิกอนไดอะแพรม และการวางตัวด้านทานในแนวตั้งฉากกับโพลีซิลิกอนไดอะแพรมรูปที่ 4.3 ความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 2 – 20 mPa โดยที่ CoventorWare™ จะสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้



(ก) ลักษณะการวางตัวด้านทานในแนวขนาน



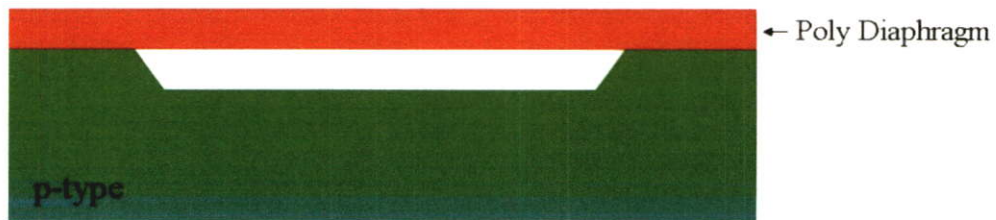
(ข) ลักษณะการวางตัวด้านทานในแนวตั้งฉาก

รูปที่ 4.3 ลักษณะการวางตัวด้านทานทั้ง 2 แบบ

4.2.2.1.1 การเขียนลำดับกระบวนการสร้าง (Process flow)

การเขียนกระบวนการสร้างใน CoventorWare™ นั้นสามารถที่จะกำหนดกระบวนการสร้างต่างๆ ได้เหมือนกัน Process flow ที่จะใช้สร้างจริง เช่น การกำหนดชนิดของวัสดุต่างๆที่จะสร้างเป็นชั้น

ฟิล์ม, ความลึกในการกัด, ความหนาของชั้นฟิล์มต่างๆ เป็นต้น ในการทดลองนี้กระบวนการสร้างที่เขียนนั้นจะเป็นโครงสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปอย่างง่ายคือ จะมีเพียงฐานรองกับไดอะแฟรมเท่านั้นแสดงดังในรูปที่ 4.4 ซึ่งลักษณะการเขียน Process flow ใน CoventorWare™ แสดงดังในรูปที่ 4.5 วัสดุที่ใช้เป็นฐานรองและไดอะแฟรมในการทดลองนี้คือ ซิลิคอนและโพลีซิลิคอนตามลำดับ



รูปที่ 4.4 โครงสร้างภาพตัดขวางอย่างง่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป

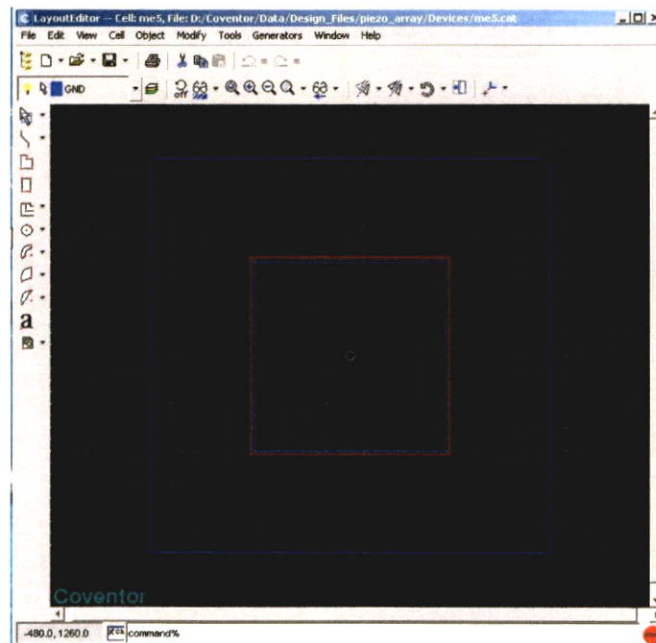
Step	Action	Type	Layer Name	Material	Thic...	Color	Mask Name/ Polarity	Depth	Offset	Sidewall Angle	Comment
0	Base		Substrate	SILICON	200.0	blue	GND				
1	Etch	Front, Partial				blue	cavity	- 3.0	0.0	0.0	
2	Deposit	Stacked	Layer1	SIN	0.2	fore...					
3	Etch	Front, Last L...				fore...	etch	+ 0.2	0.0	0.0	
4	Deposit	Conformal	Layer2	POLYSILICON	0.5 ...	red					
5	Etch	Front, Last L...				red	diaphragm	+ 0.5	0.0	0.0	
6	Sacrif...			SIN							

รูปที่ 4.5 ลำดับกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปใน CoventorWare™

4.2.2.1.2 การออกแบบ (Layout)

ในการออกแบบแบบที่เขียนขึ้นนั้นจะต้องมีความสอดคล้องกับกระบวนการสร้างที่เขียนและในขั้นตอนนี้ยังสามารถกำหนดรูปร่างและขนาดของอุปกรณ์ที่จะสร้างได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนด

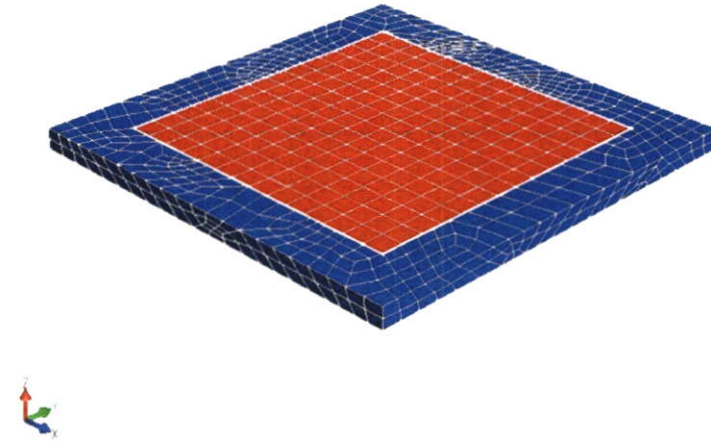
รูปร่างของโคอะเฟรมเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดอยู่ที่ 100×100 , 200×200 , 300×300 และ $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ แบบที่เขียนในการทดลองนี้แสดงดังในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 Layout ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซซีสทิคที่ใช้ในการทดลอง

4.2.2.1.3 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ (Element size)

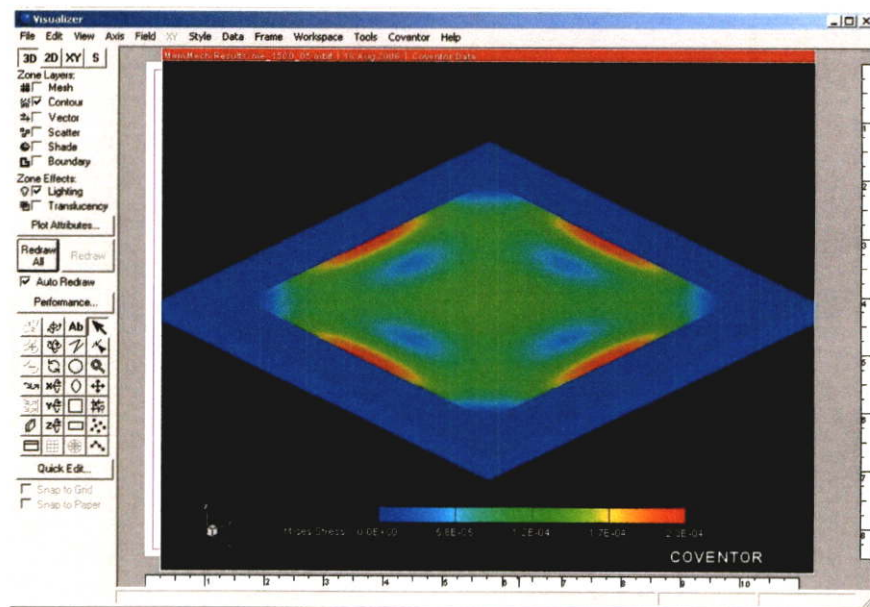
ขนาดเอลิเมนต์ คือค่าความถี่ของตาข่ายของโมเดลที่จะทำการวิเคราะห์แสดงดังในรูปที่ 4.7 ซึ่งถ้ากำหนดขนาดเอลิเมนต์ให้มีค่ามากความถี่ของตาข่ายที่สร้างขึ้นนั้นจะน้อย แต่ถ้ากำหนดขนาดเอลิเมนต์ให้มีค่าน้อยความถี่ของตาข่ายที่สร้างขึ้นนั้นจะมาก และความถี่ของตาข่ายนี้จะส่งผลถึงระยะเวลาในการประมวลผลด้วย กล่าวคือถ้าความถี่ของตาข่ายมากระยะเวลาในการประมวลผลจะมากตามไปด้วย รูปแบบของตาข่ายที่สร้างนี้จะมีให้กำหนดอยู่หลายแบบด้วยกัน เช่นแบบสามเหลี่ยม และแบบสี่เหลี่ยมเป็นต้น ในงานวิจัยนี้ตาข่ายที่สร้างขึ้นจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมที่มีการกำหนดขนาดเอลิเมนต์เป็น 3 ขนาดคือ 10, 10 และ 20



รูปที่ 4.7 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ให้กับทรานสคิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป

4.2.2.1.4 การประมวลผล (Result)

การประมวลผล ที่ได้นั้นจะแสดงอยู่ในรูปแบบสามมิติแสดงดังในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นรูปจากการประมวลผลการทดลองนี้ ระยะเวลาในการประมวลผลของ CoventorWare™ นั้นจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลักคือ ความถี่ของค่าขายของโมเดลและโครงสร้างที่ออกแบบ



รูปที่ 4.8 การประมวลผลของ CoventorWare™

4.2.2.2 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่มีโพลียิลิกอนเป็นไดอะแฟรม

ในขั้นตอนการทดลองนี้จะเป็นการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่มีโพลียิลิกอนเป็นไดอะแฟรมด้วย L-Edit [14] ซึ่งจะออกแบบตามโครงสร้างที่จะนำไปสร้างจริง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ภาพรวมของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่ได้จากการออกแบบด้วย L-Edit แสดงดังในรูปที่ 4.9

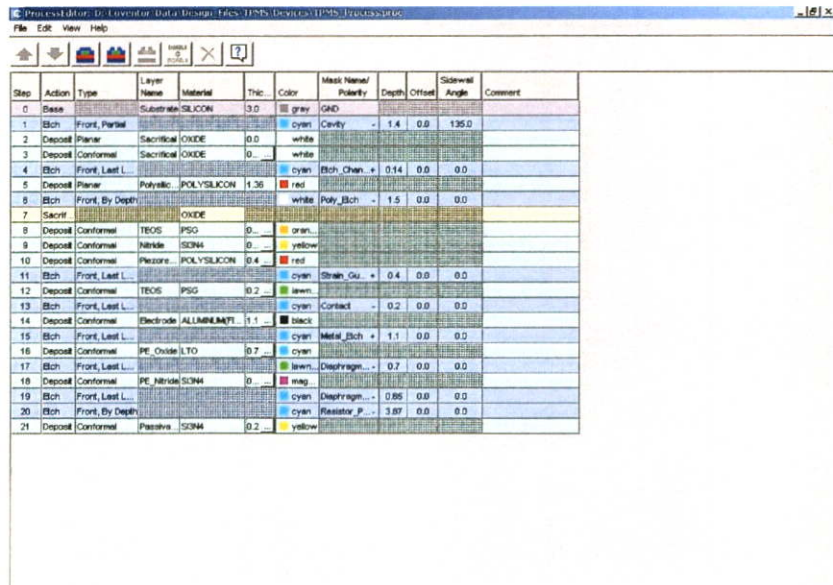


รูปที่ 4.9 ภาพรวมของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่ออกแบบด้วย L-Edit

4.2.2.3 การหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่มีโพลียิลิกอนเป็นไดอะแฟรม

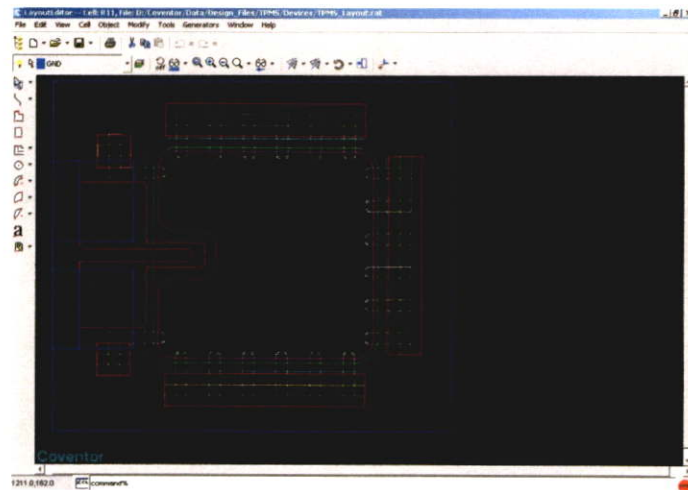
ในขั้นตอนการทดลองนี้จะทดลองด้วย CoventorWare™ โดยที่ CoventorWare™ จะสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.2.1 ซึ่งสามารถแสดงภาพรวมของขั้นตอนการทำงานของ CoventorWare™ ในการทดลองนี้ได้ดังในรูปที่ 4.10 โดยที่โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่ใช้ในการหาค่าความไวในการตอบสนองนี้คือโครงสร้างที่จะนำไปใช้สร้างจริงที่แสดงดังในรูปที่ 4.2 ซึ่งความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 2 – 20 mPa อีกทั้งยังมีการทดลองหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดัน

โครงสร้างของ TMEC ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากชุดเครื่องมือทดสอบความดันในรูปที่ 3.2 ซึ่งการต่อวัดของเครื่องทดสอบความดันจะแสดงดังในรูปที่ 4.11 ความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 0 – 50 kPa



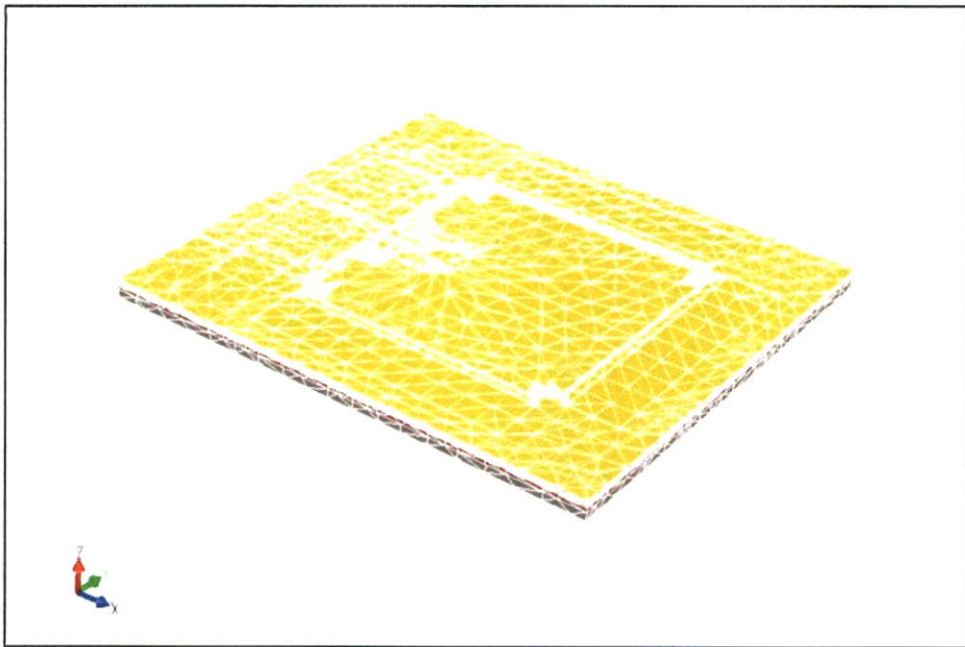
Step	Action	Type	Layer Name	Material	Thic	Color	Mask Name/ Polarity	Depth	Offset	Sidewall Angle	Comment
0	Base		Substrate	SILICON	3.0	gray	GND				
1	Etch	Front, Partial				cyan	Cavity	- 1.4	0.0	135.0	
2	Deposit	Planar	Sacrificial	OXIDE	0.0	white					
3	Deposit	Conformal	Sacrificial	OXIDE	0.0	white					
4	Etch	Front, Last L				cyan	Etch Chan. +	0.14	0.0	0.0	
5	Deposit	Planar	Polyvic	POLYSILICON	1.38	red					
6	Etch	Front, By Depth				white	Poly_Etch -	1.5	0.0	0.0	
7	Secret			OXIDE							
8	Deposit	Conformal	TEOS	PSG	0.2	orange					
9	Deposit	Conformal	Nitride	Si3N4	0.2	yellow					
10	Deposit	Conformal	Plazone	POLYSILICON	0.4	red					
11	Etch	Front, Last L				cyan	Etch_Ou. +	0.4	0.0	0.0	
12	Deposit	Conformal	TEOS	PSG	0.2	green					
13	Etch	Front, Last L				cyan	Contact -	0.2	0.0	0.0	
14	Deposit	Conformal	Electrode	ALUMINUM	1.1	black					
15	Etch	Front, Last L				cyan	Metal_Etch +	1.1	0.0	0.0	
16	Deposit	Conformal	PE Oxide	ILTO	0.7	cyan					
17	Etch	Front, Last L				green	Diephragm...	0.7	0.0	0.0	
18	Deposit	Conformal	PE Nitride	Si3N4	0.2	mag					
19	Etch	Front, Last L				cyan	Diephragm...	0.85	0.0	0.0	
20	Etch	Front, By Depth				cyan	Resistor_P...	3.87	0.0	0.0	
21	Deposit	Conformal	Passiva	Si3N4	0.2	yellow					

(ก) Process flow

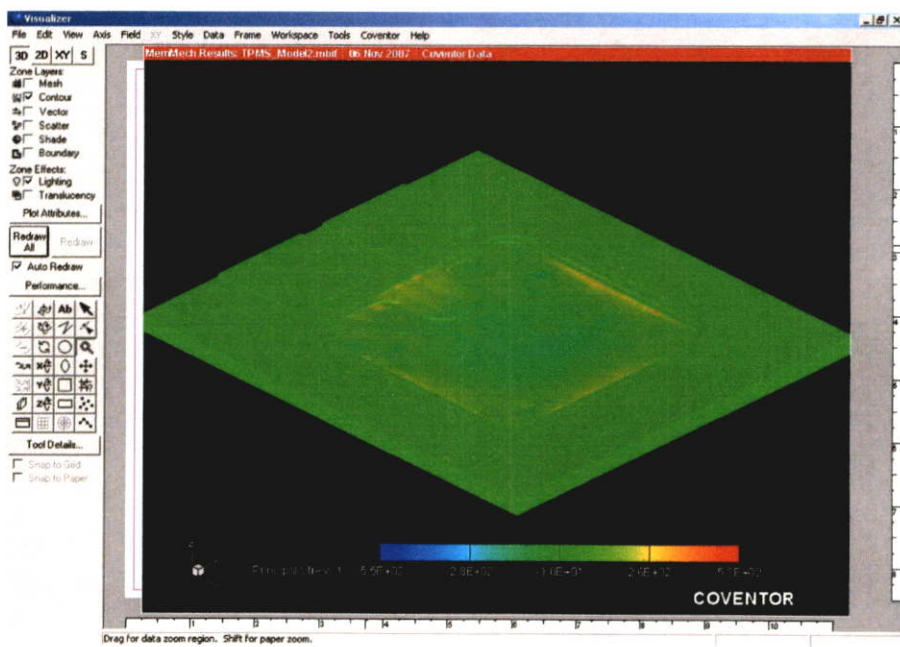


(ข) Layout

รูปที่ 4.10 ขั้นตอนการทำงานของ CoventorWare™

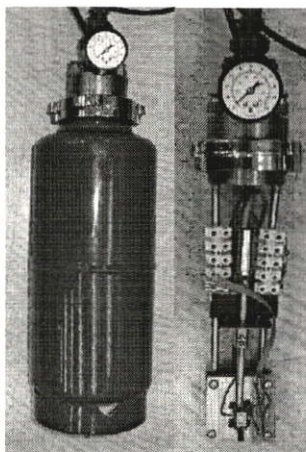


(ก) Element size

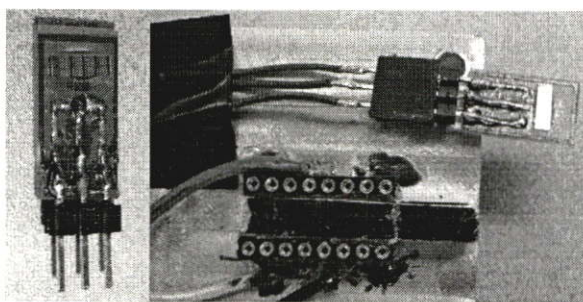


(ข) Result

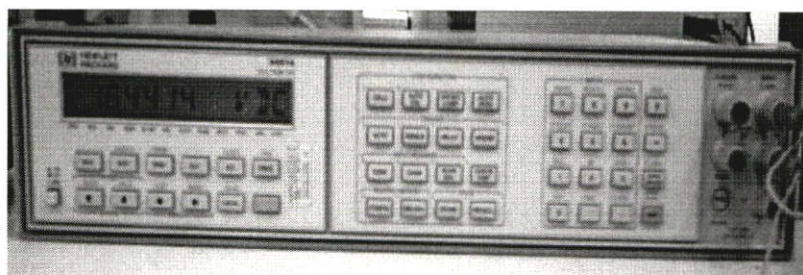
รูปที่ 4.10 (ต่อ)



(ก) ถังทดสอบความดัน



(ข) ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทีปที่มีโพลียเอทิลีนเป็นไดอะแฟรมของ TMEC



(ค) มัลติมิเตอร์ (Multimeter)

รูปที่ 4.11 การทดลองด้วยชุดทดสอบความดัน



(ง) คอมพิวเตอร์ (Computer)

รูปที่ 4.11 (ต่อ)

การทดลองทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทีปที่มีโพลิซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมของ TMEC ด้วยชุดทดสอบความดันนั้นสามารถอธิบายขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้ นำทรานสดิวเซอร์ความดันที่ทำการต่อขาเรียบร้อยแล้วใส่ลงในถังความดัน ซึ่งความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 0 – 50 kPa โดยที่ถังความดันนั้นจะต่อเข้ากับ Multimeter และ Multimeter จะต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการประมวลผล

4.2.2.4 การหาค่าผลตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ เพียโซรีซิสทีปที่มีโพลิซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม

ในขั้นตอนการทดลองนี้จะทดลองด้วย CoventorWare™ ซึ่งจะนำขั้นตอนการทำงานของ CoventorWare™ ในส่วนของโครงสร้างที่ได้ออกแบบขึ้นมาใหม่จากการทดลองหาค่าความไวในการตอบสนองมาใช้ในการพิจารณาหาช่วงความถี่ในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทีปที่มีโพลิซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงเงื่อนไขและลำดับในการทดลอง สำหรับในบทนี้จะเป็นผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่มีโพลียิลิกอนเป็นไดอะแฟรมเพื่อประยุกต์นำไปใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก

5.1 ผลการหาตำแหน่งการวางตัวด้านทาน

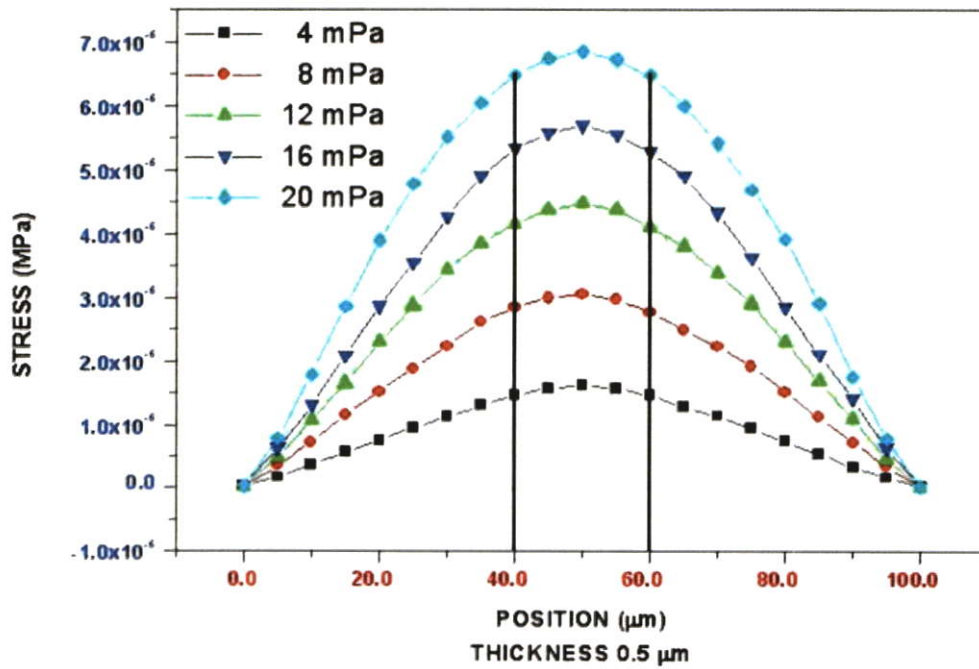
การหาช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานบนโพลียิลิกอนไดอะแฟรมนั้น จะทำการพิจารณาจากความเค้นที่เกิดขึ้นบนโพลียิลิกอนไดอะแฟรมที่ความดันค่าต่างๆ ซึ่งช่วงตำแหน่งที่จะวางตัวด้านทานนั้นต้องเป็นบริเวณที่มีความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุด

5.1.1 โพลียิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$

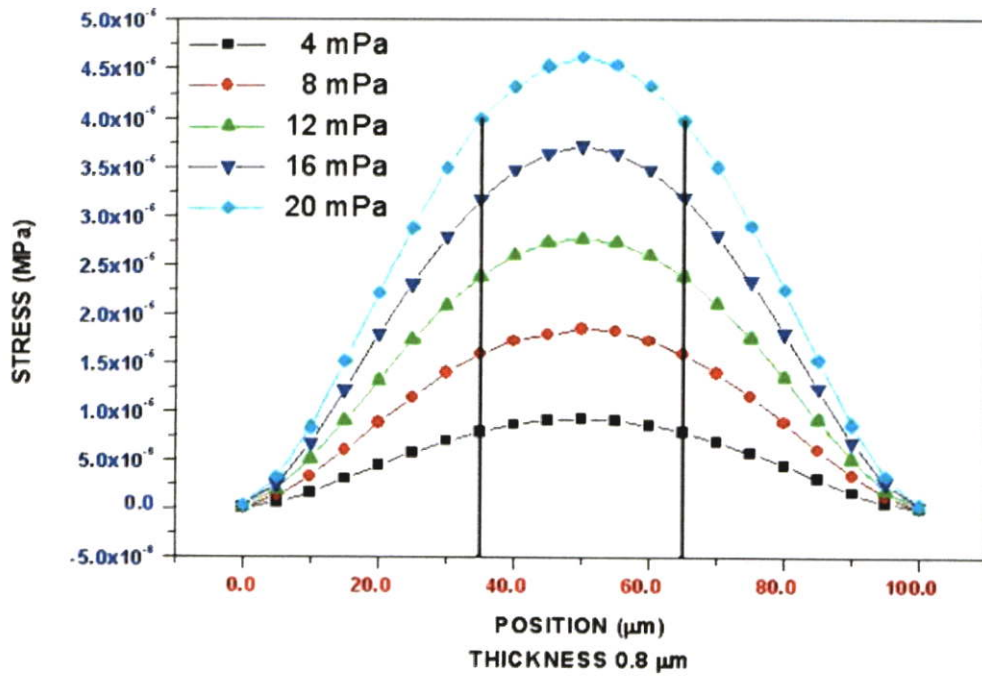
ผลการหาช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานบนโพลียิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm โดยมีความดันที่เปลี่ยนแปลง 5 ค่า คือ 4, 8, 12, 16 และ 20 mPa ซึ่งจะมีลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลียิลิกอน 2 ลักษณะ คือ การวางตัวด้านทานแบบขนาน และการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก

5.1.1.1 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนาน

ผลการหาช่วงตำแหน่งที่ลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลียิลิกอนไดอะแฟรมแบบขนานแสดงดังในรูปที่ 5.1 จากกราฟผลการทดลอง ทำให้สามารถประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนานบนโพลียิลิกอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm เฉลี่ยอยู่ที่ 40 – 60 μm ซึ่งการประมาณช่วงตำแหน่งนั้นจะคิดที่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์จากค่าความเค้นสูงสุดและยังทำให้ทราบตำแหน่งเริ่มต้นในการหาค่าช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากคือพิจารณาที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโพลียิลิกอนไดอะแฟรมซึ่งอยู่ที่ 50 μm

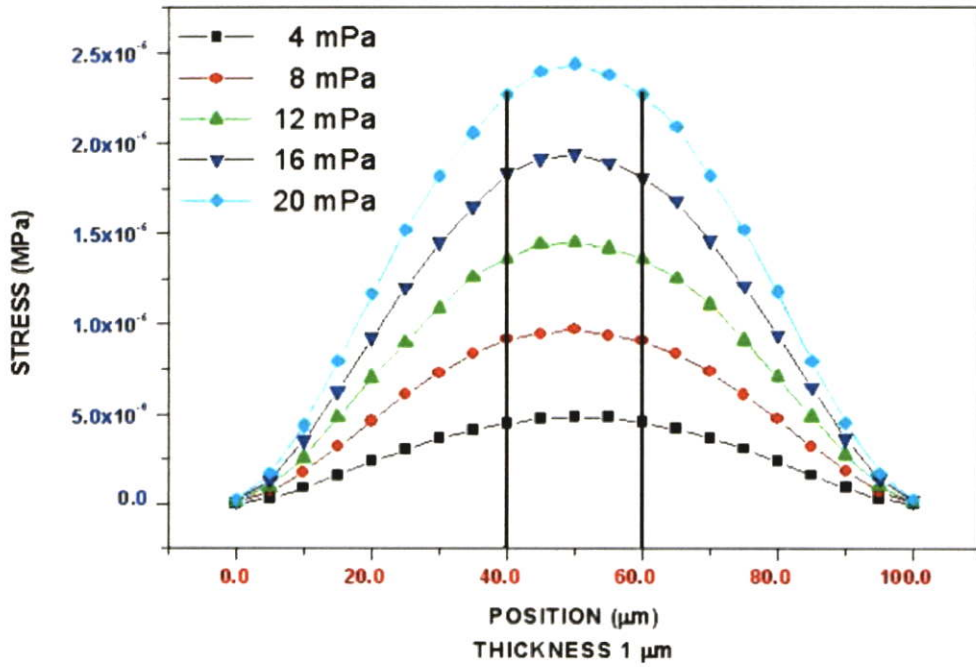


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.5 μm

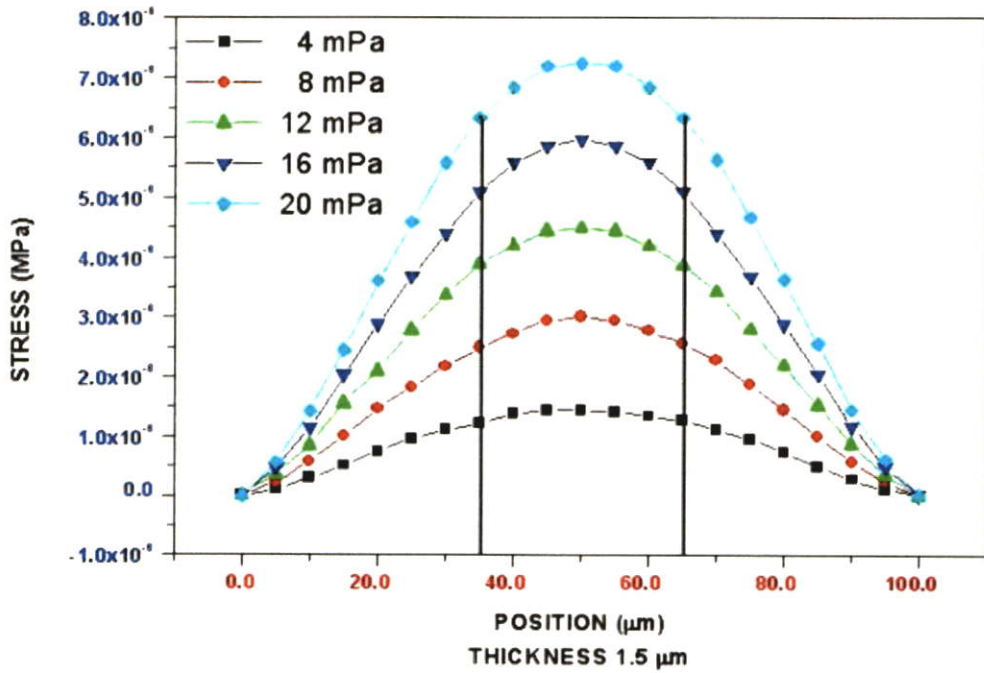


(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.1 ตำแหน่งวางตัวด้านทานแบบขนานบนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาต่างๆ

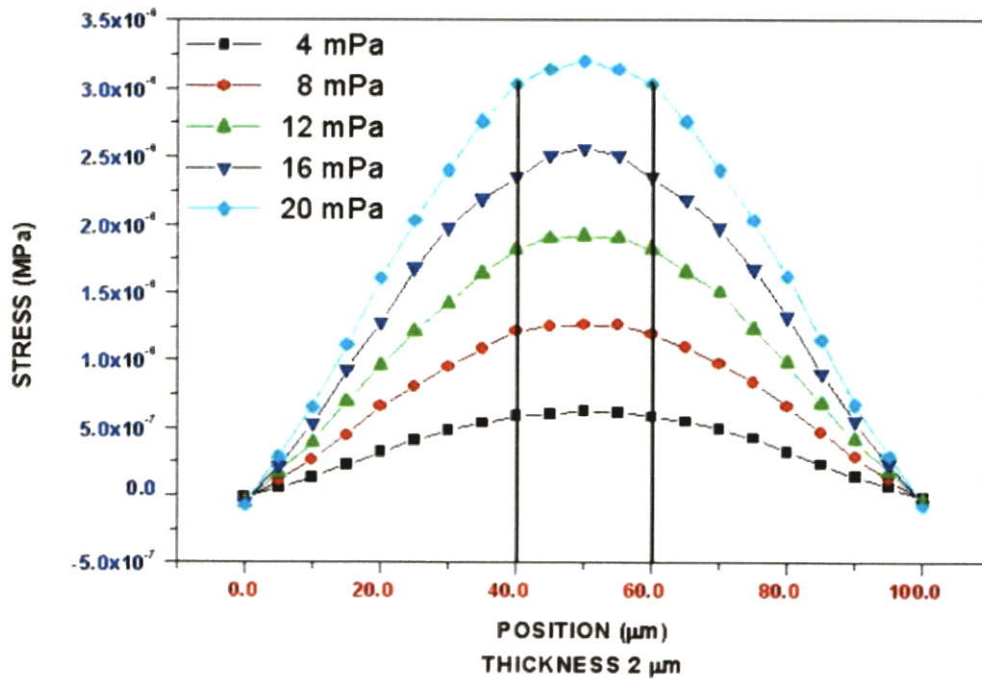


(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 1 μm



(ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 1.5 μm

รูปที่ 5.1 (ต่อ)

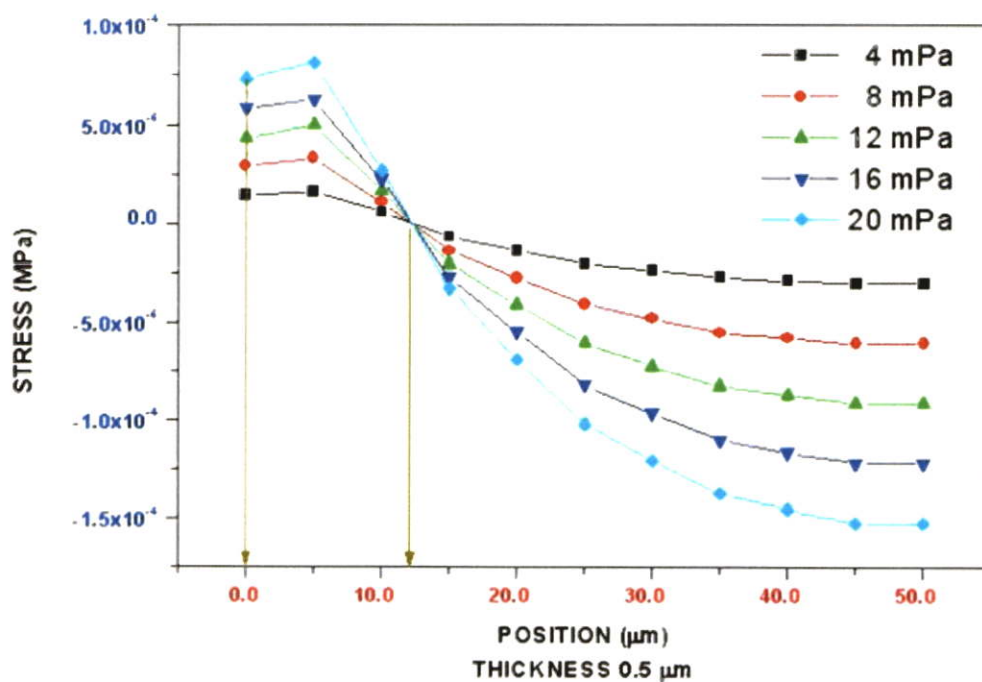


(จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 2 μm

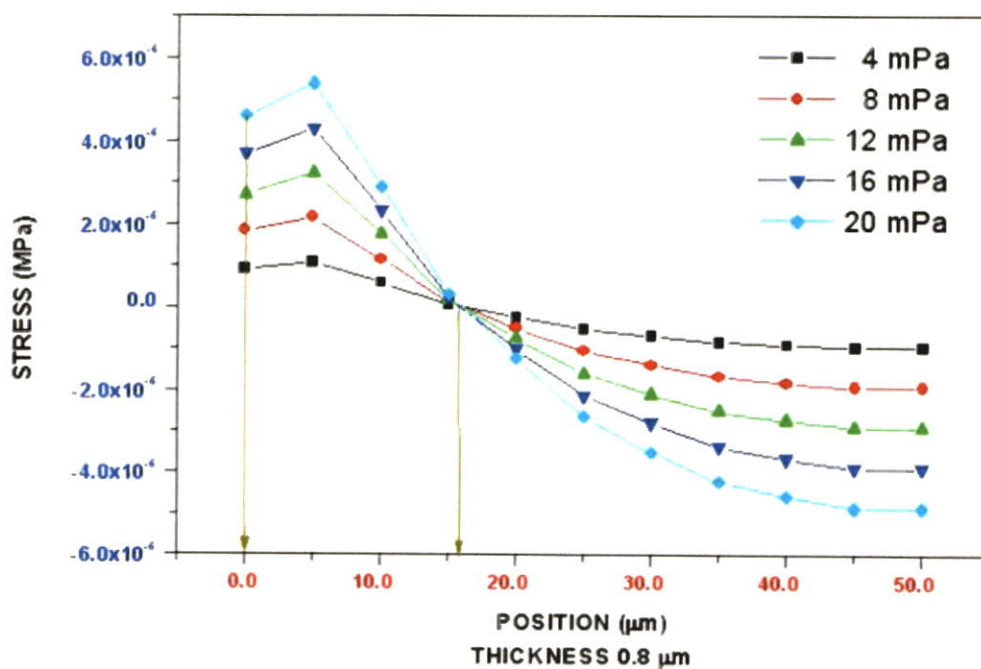
รูปที่ 5.1 (ต่อ)

5.1.1.2 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก

ผลการหาช่วงตำแหน่งที่ลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมแบบตั้งฉาก แสดงดังในรูปที่ 5.2 จากกราฟผลการทดลอง ทำให้สามารถประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า เฉลี่ยอยู่ที่ $0 - 12 \mu\text{m}$ ซึ่งการประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากจะพิจารณาจากค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยโดยรวมของทั้ง 5 ความหนา

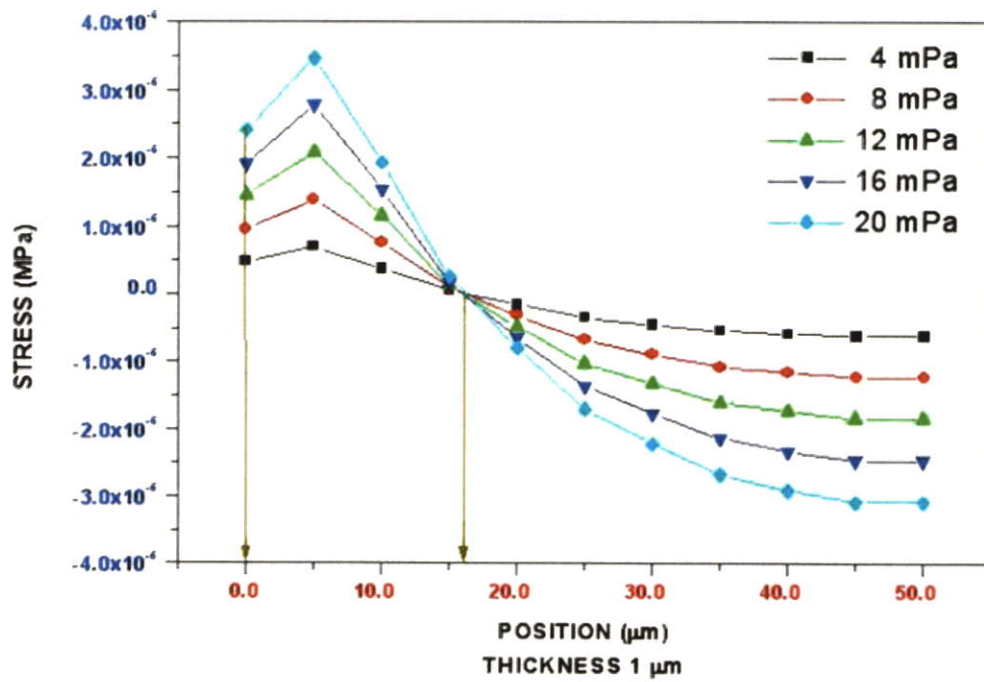


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่มีความหนา 0.5 μm

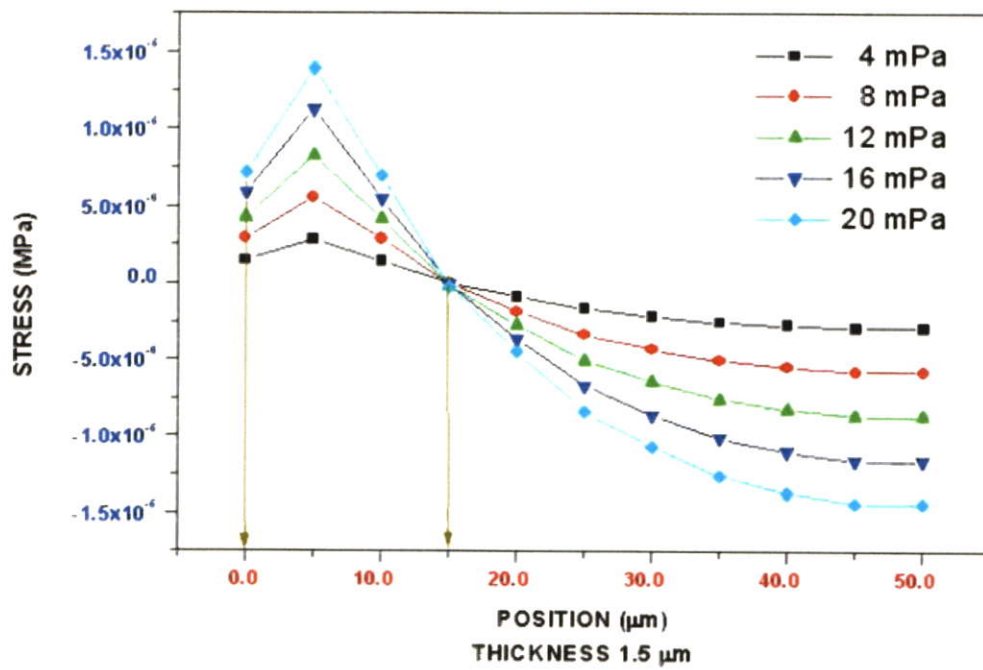


(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่มีความหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.2 ตำแหน่งวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาต่างๆ

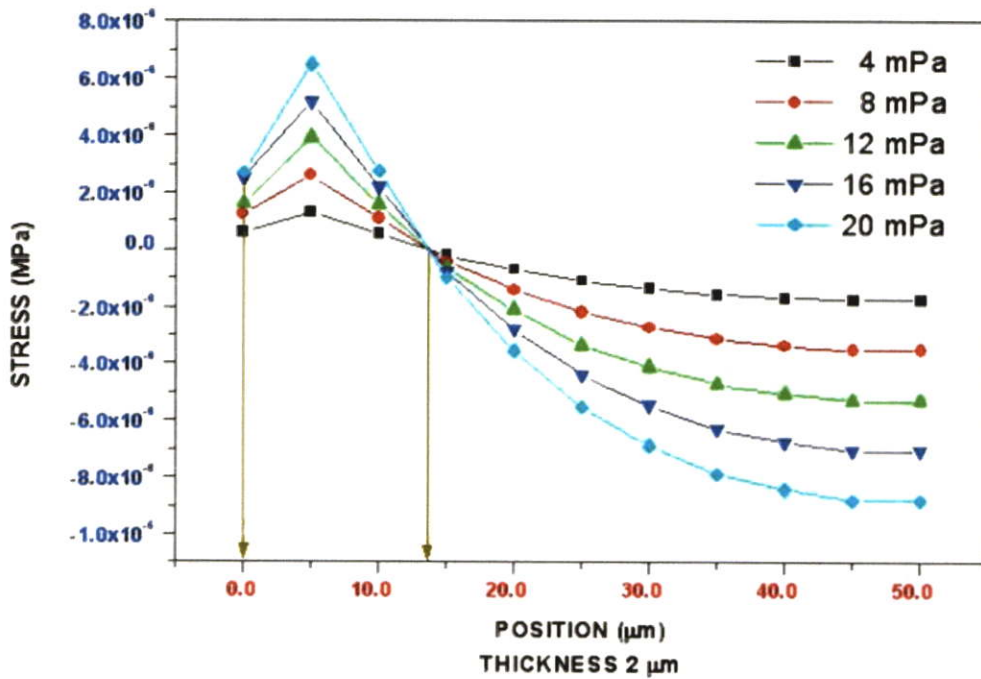


(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 1 μm



(ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 1.5 μm

รูปที่ 5.2 (ต่อ)



(จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 2 μm

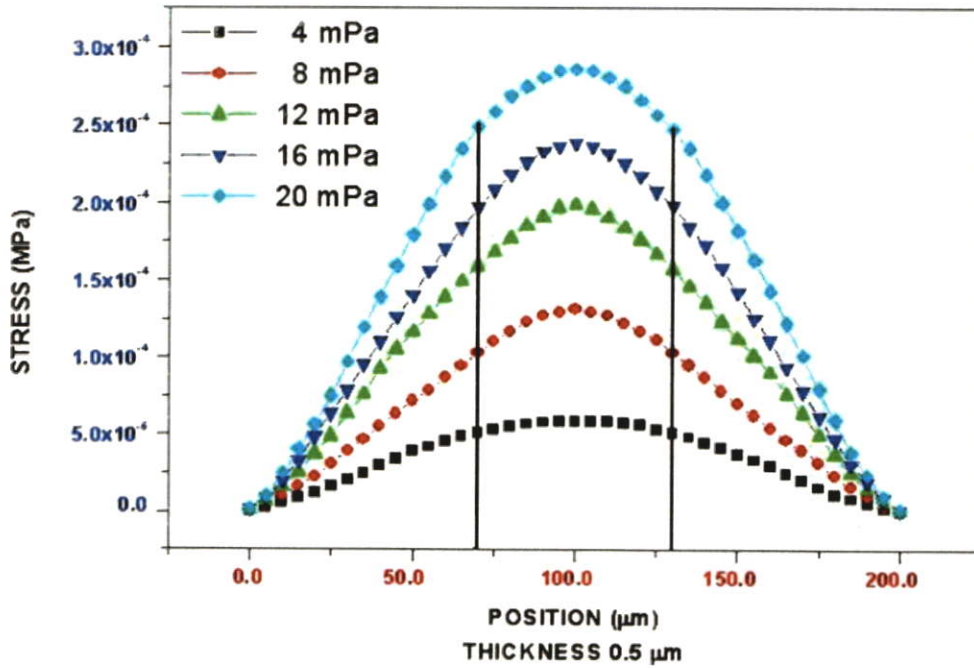
รูปที่ 5.2 (ต่อ)

5.1.2 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$

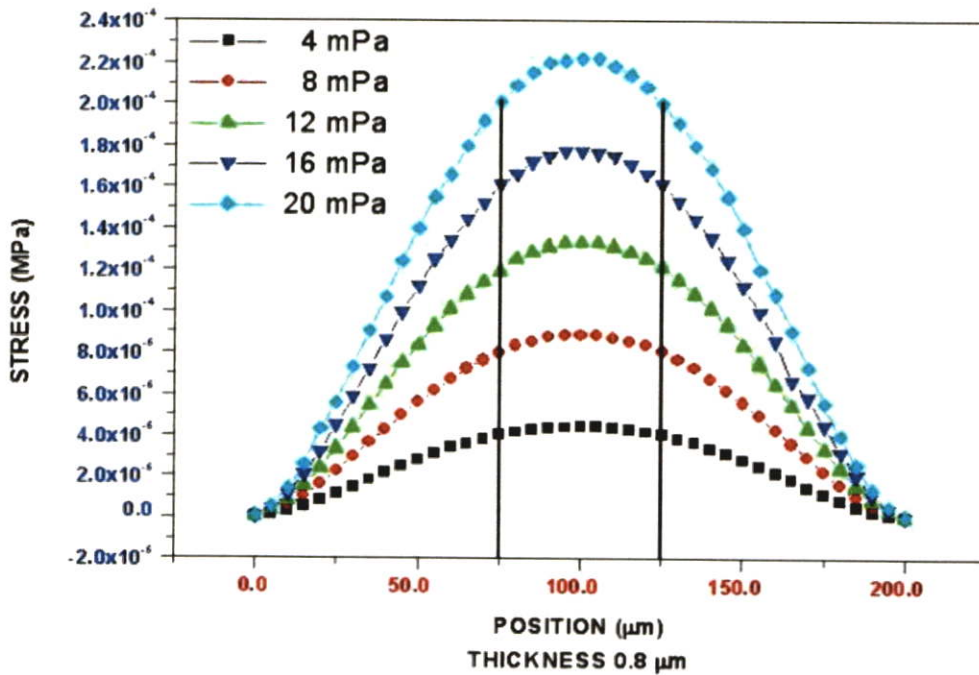
ผลการหาช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm โดยมีความดันที่เปลี่ยนแปลง 5 ค่า คือ 4, 8, 12, 16 และ 20 mPa ซึ่งจะมีลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอน 2 ลักษณะ คือ การวางตัวด้านทานแบบขนาน และการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก

5.1.2.1 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนาน

ผลการหาช่วงตำแหน่งที่ลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมแบบขนาน แสดงดังในรูปที่ 5.3 จากกราฟผลการทดลอง ทำให้สามารถประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm เฉลี่ยอยู่ที่ 75 – 125 μm ซึ่งการประมาณช่วงตำแหน่งนั้นจะคิดที่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์จากค่าความเค้นสูงสุด ตำแหน่งเริ่มต้นในการหาค่าช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากคืออยู่ที่ 100 μm

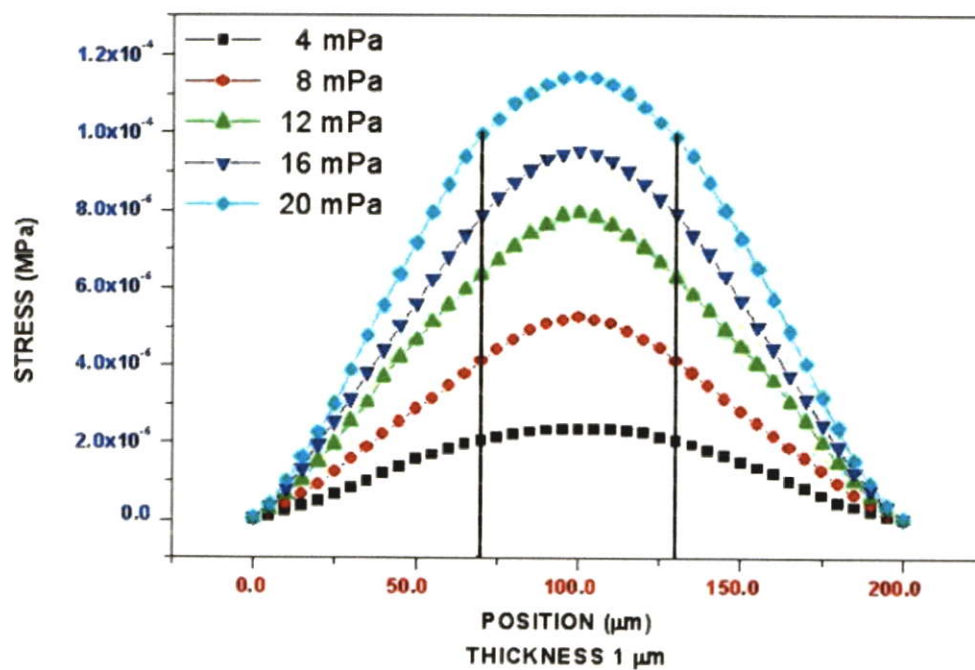


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่มีความหนา 0.5 μm

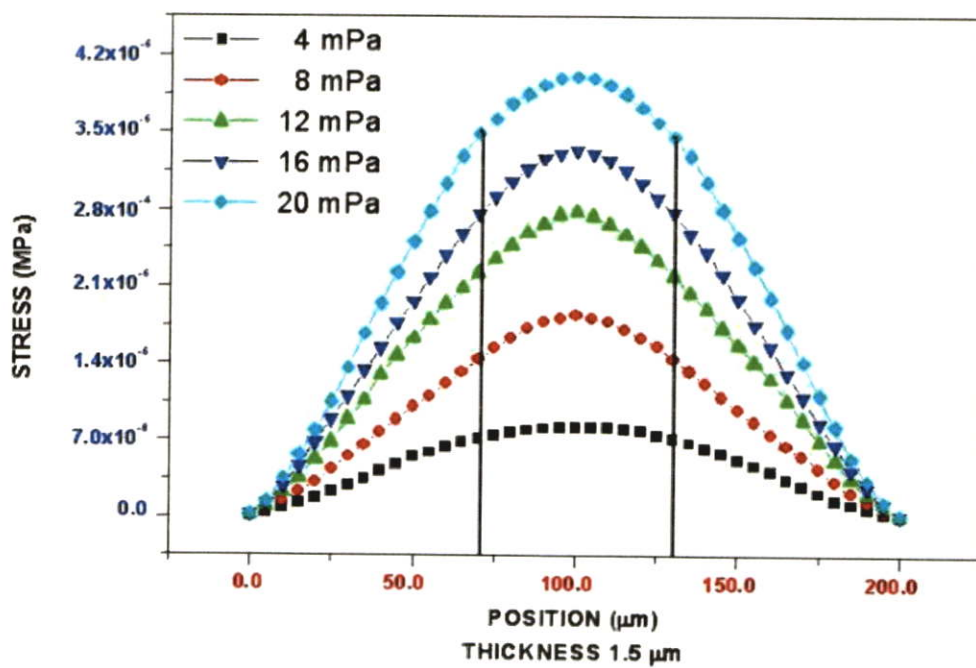


(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่มีความหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.3 ตำแหน่งวางตัวด้านทานแบบขนานบนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาต่างๆ

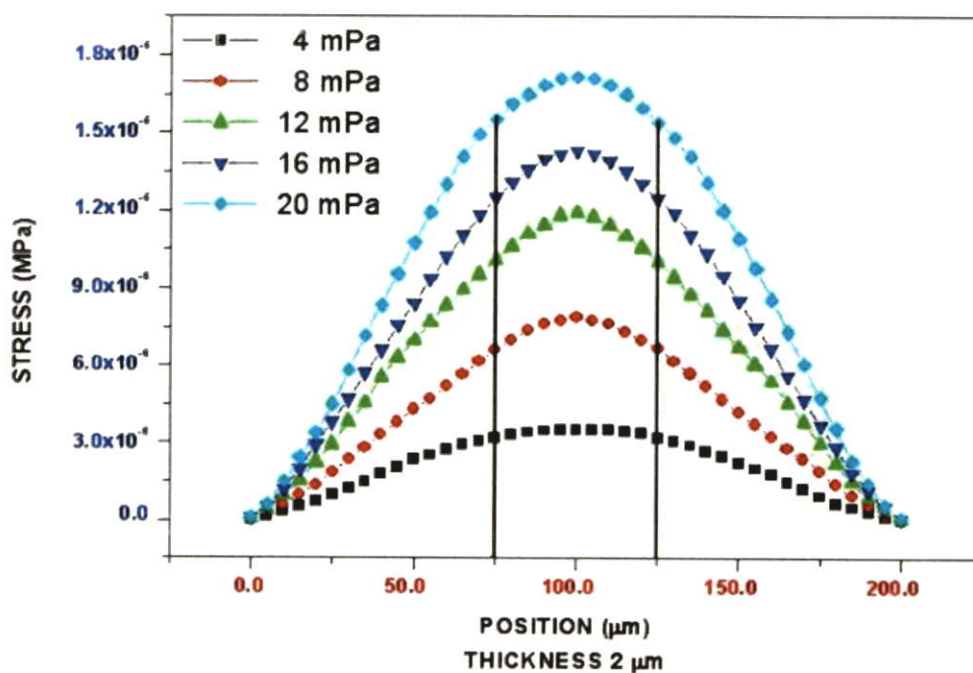


(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่มีความหนา 1 μm



(ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่มีความหนา 1.5 μm

รูปที่ 5.3 (ต่อ)

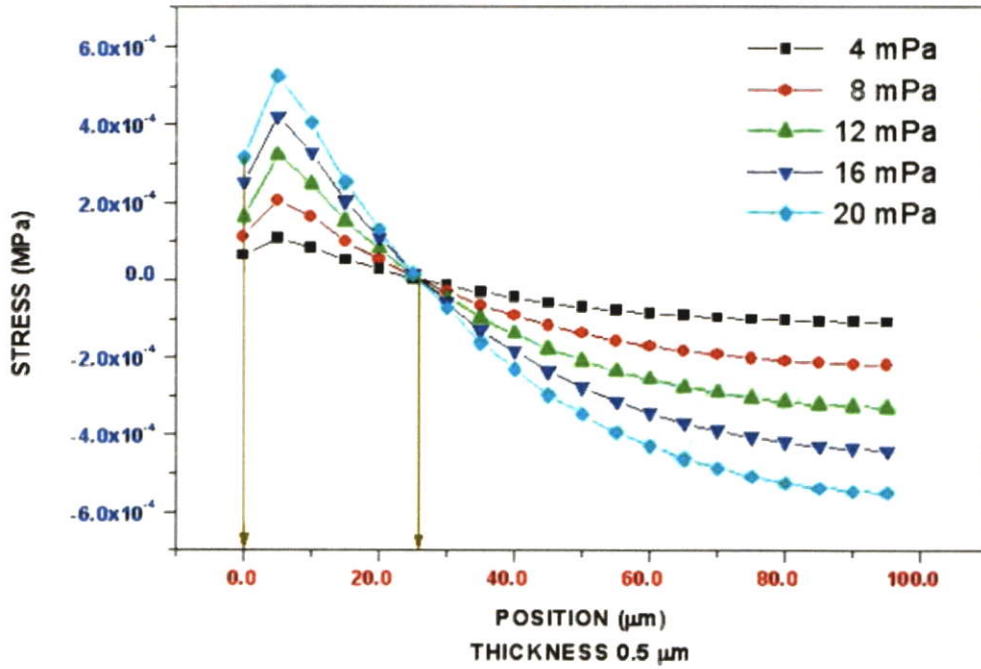


(จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 2 μm

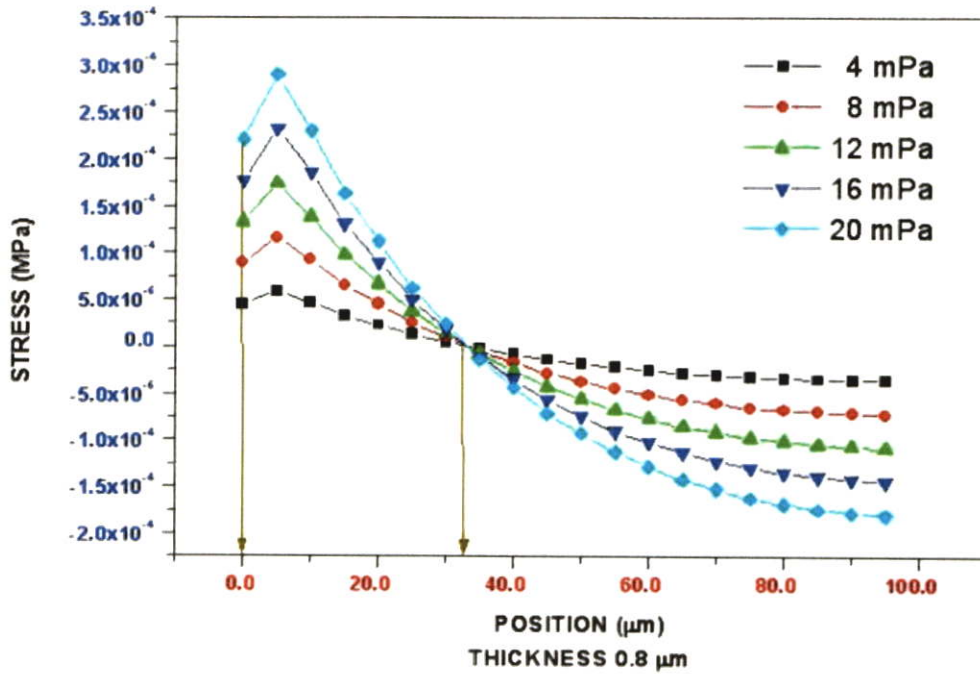
รูปที่ 5.3 (ต่อ)

5.1.2.2 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก

ผลการหาช่วงตำแหน่งที่ลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมแบบตั้งฉาก แสดงดังในรูปที่ 5.4 จากกราฟผลการทดลอง ทำให้สามารถประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า เฉลี่ยอยู่ที่ 0 – 25 μm การประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากจะพิจารณาจากค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยโดยรวมของทั้ง 5 ความหนา

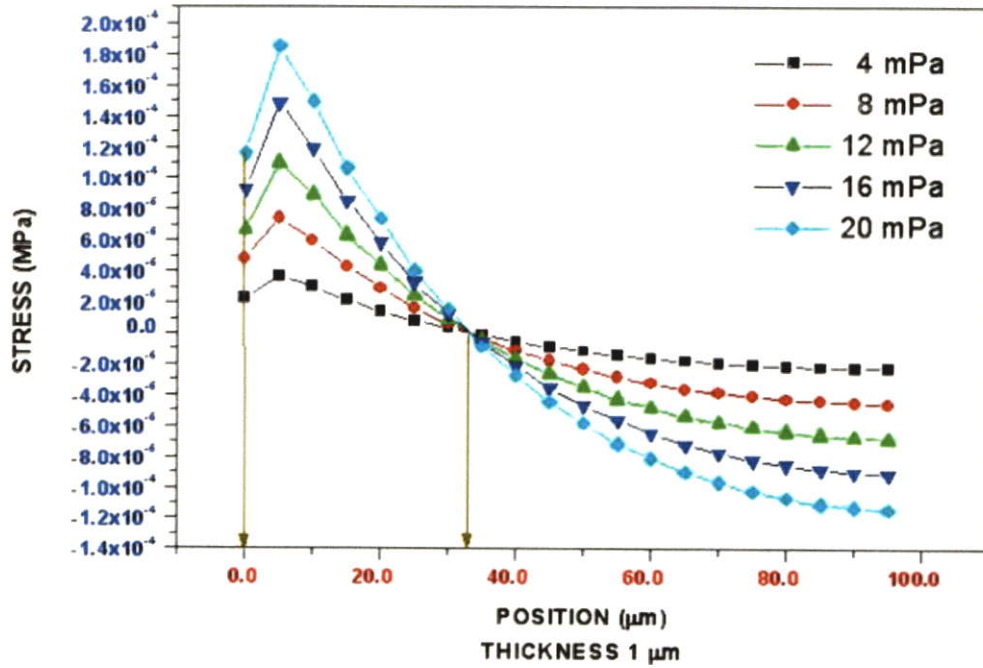


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.5 μm

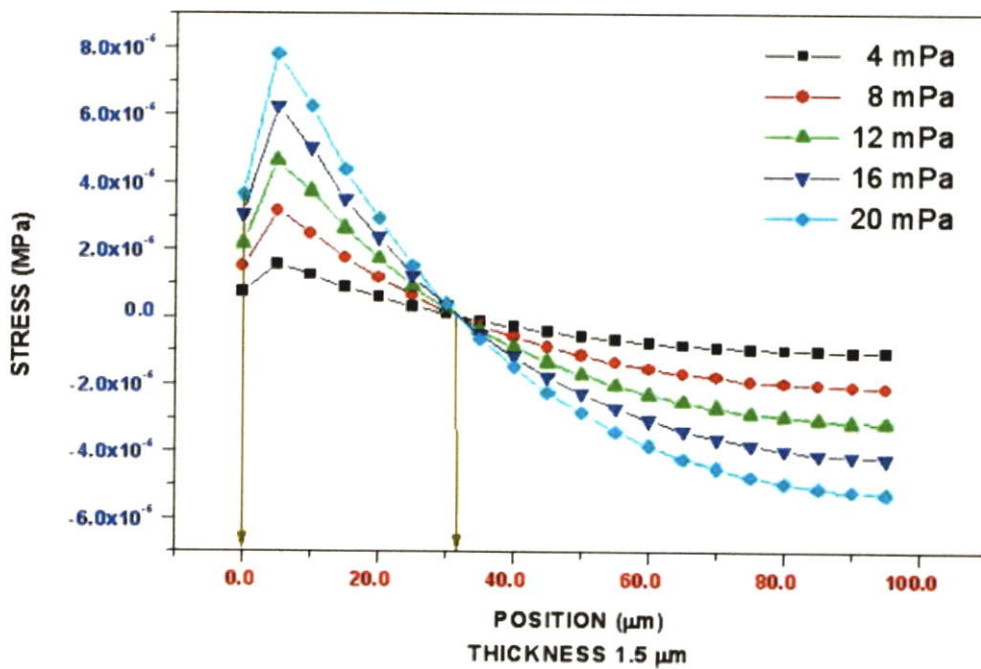


(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.4 ตำแหน่งวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาต่างๆ

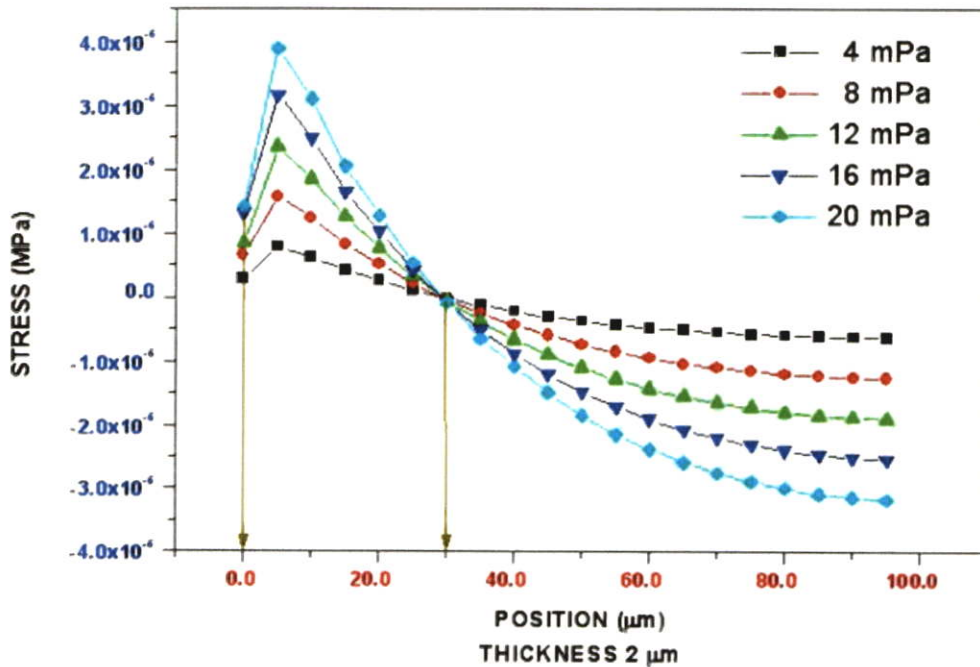


(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 1 μm



(ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 1.5 μm

รูปที่ 5.4 (ต่อ)



(จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 2 μm

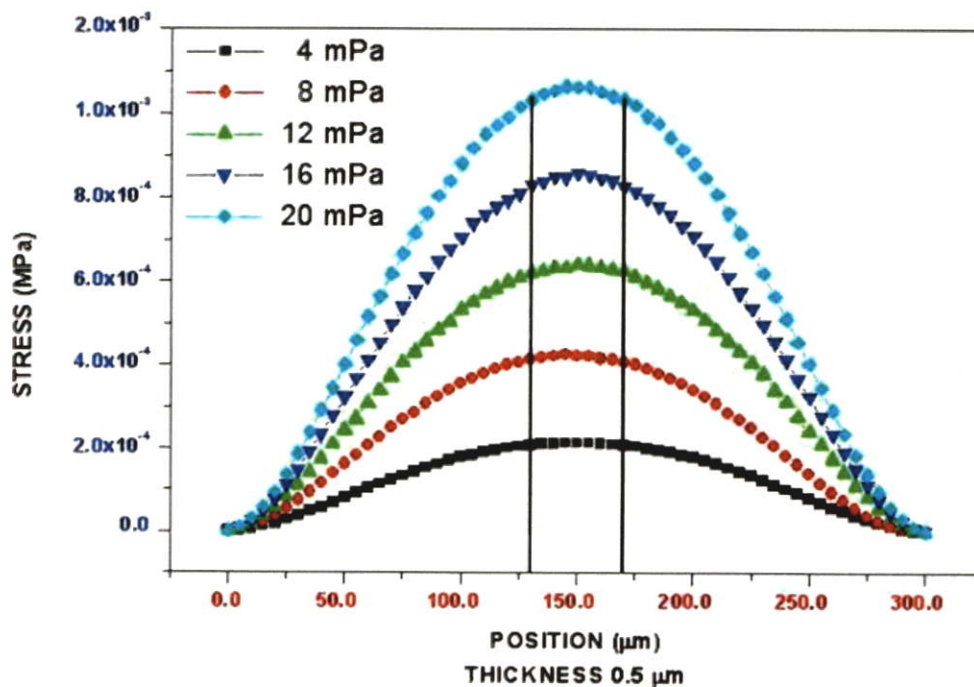
รูปที่ 5.4 (ต่อ)

5.1.3 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$

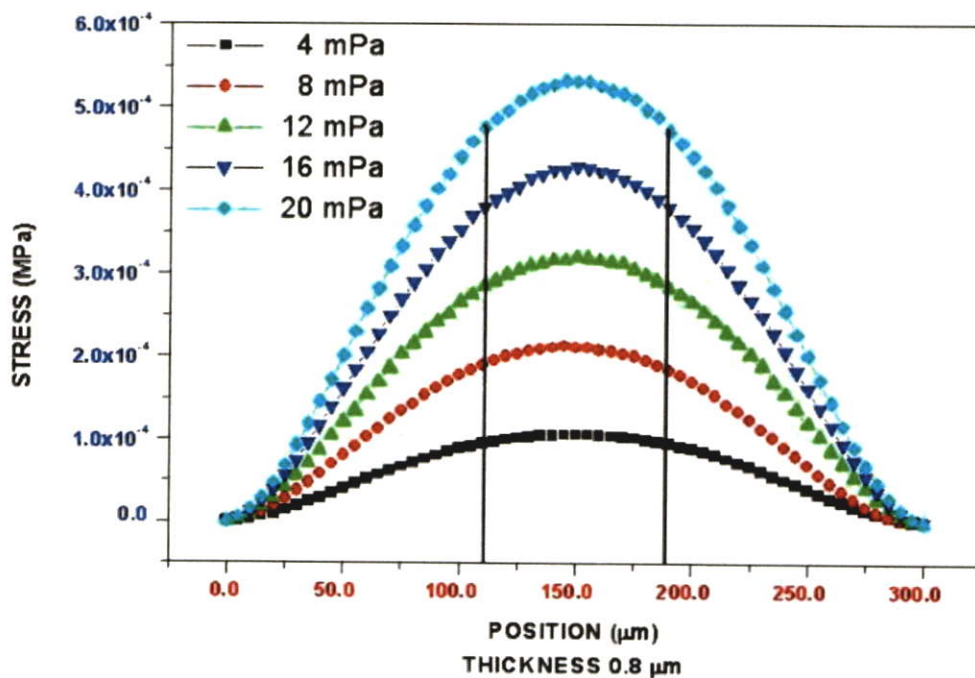
ผลการหาช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm โดยมีความดันที่เปลี่ยนแปลง 5 ค่า คือ 4, 8, 12, 16 และ 20 mPa ซึ่งจะมีลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอน 2 ลักษณะ คือ การวางตัวด้านทานแบบขนาน และการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก

5.1.3.1 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนาน

ผลการหาช่วงตำแหน่งที่ลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมแบบขนานแสดงดังในรูปที่ 5.5 จากกราฟผลการทดลอง ทำให้สามารถประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm เฉลี่ยอยู่ที่ 130 – 170 μm ซึ่งการประมาณช่วงตำแหน่งนั้นจะคิดที่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์จากค่าความเค้นสูงสุด ตำแหน่งเริ่มต้นในการหาค่าช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก คือ อยู่ที่ 150 μm

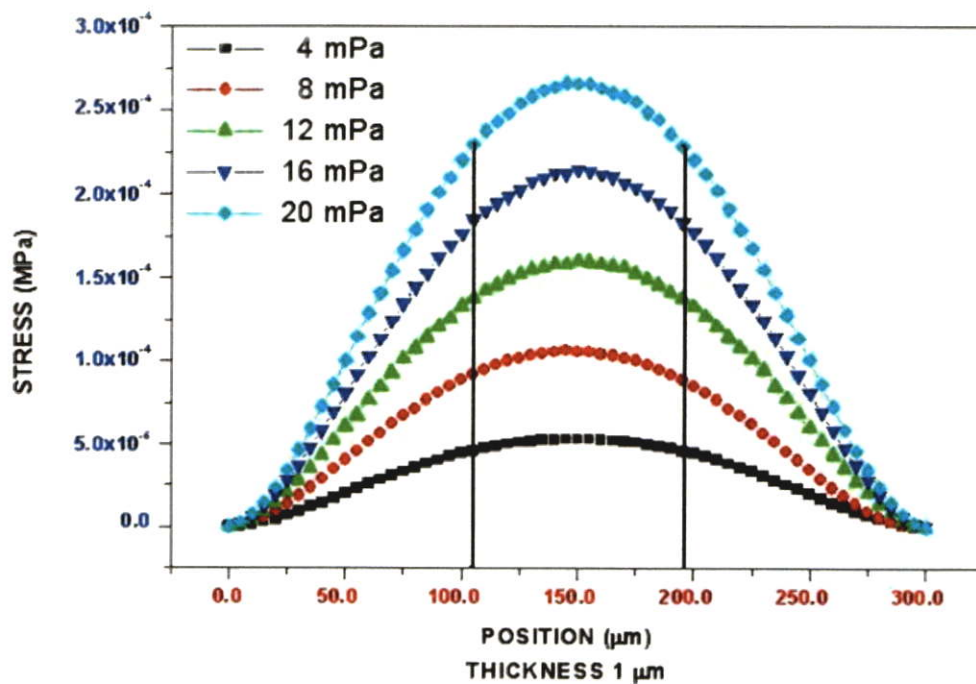


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.5 μm

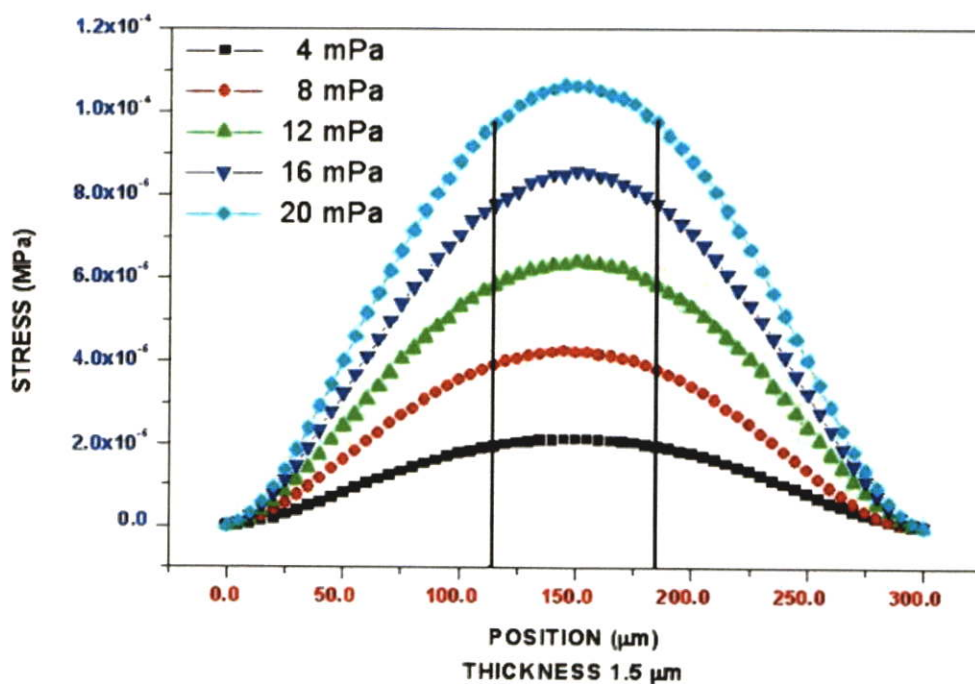


(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.5 ตำแหน่งวางตัวด้านทานแบบขนานบนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาต่างๆ

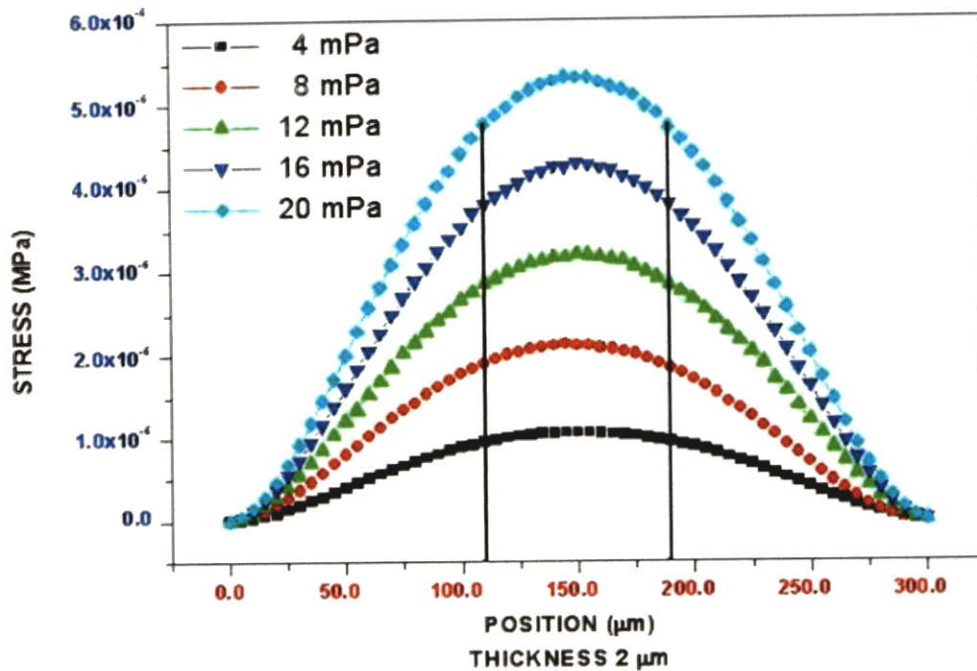


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา $1 \mu\text{m}$



(ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา $1.5 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.5 (ต่อ)

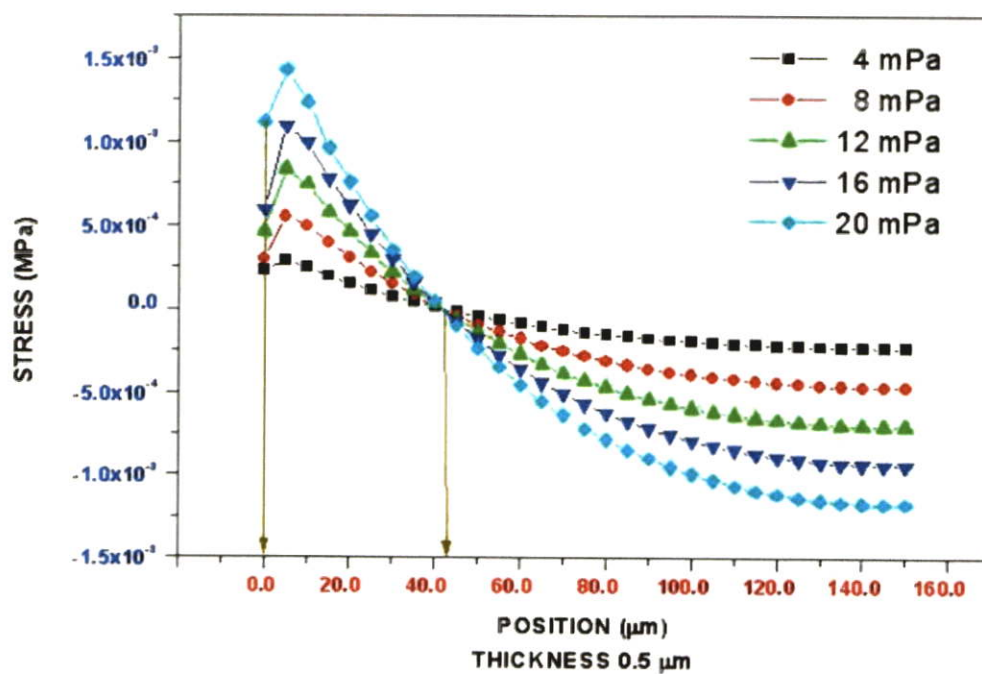


(จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 2 μm

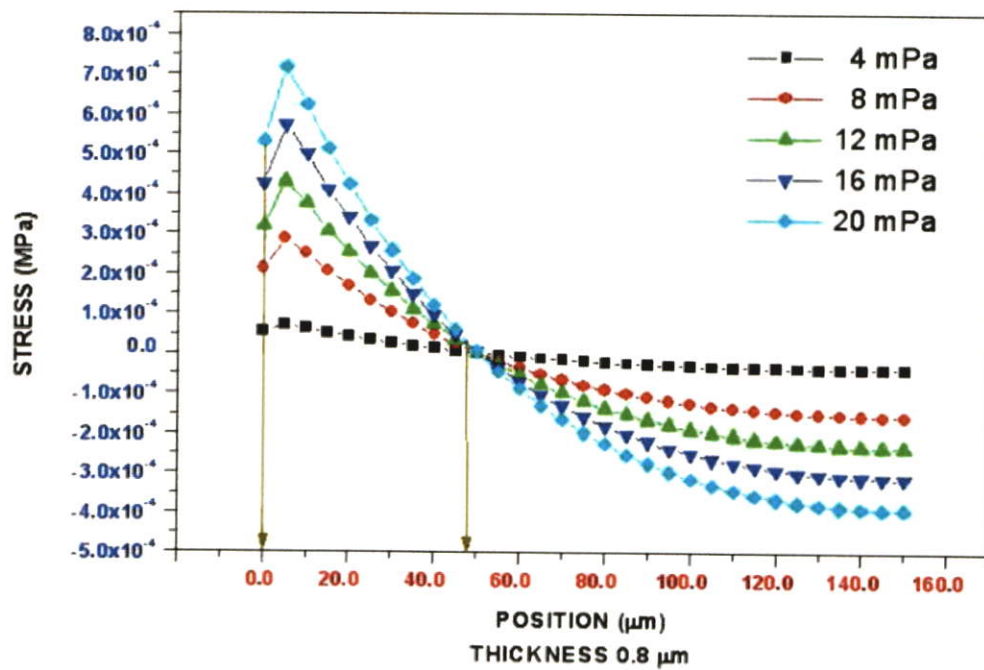
รูปที่ 5.5 (ต่อ)

5.1.3.2 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก

ผลการหาช่วงตำแหน่งที่ลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมแบบตั้งฉาก แสดงดังในรูปที่ 5.6 จากกราฟผลการทดลอง ทำให้สามารถประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า เฉลี่ยอยู่ที่ $0 - 43 \mu\text{m}$ การประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากจะพิจารณาจากค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยโดยรวมของทั้ง 5 ความหนา

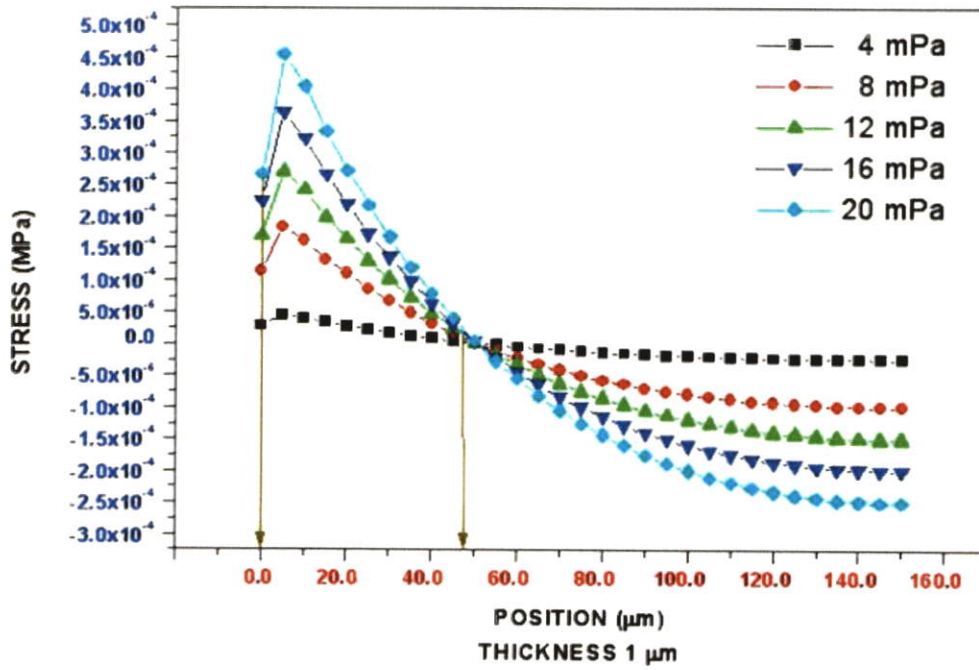


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.5 μm

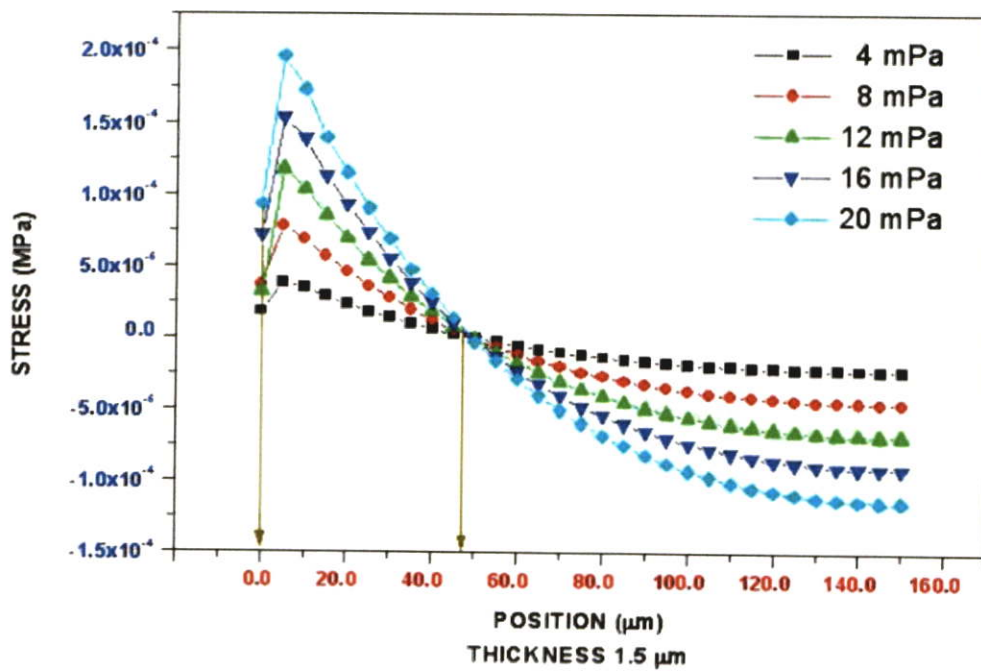


(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.6 ตำแหน่งวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนไคอะแพรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาต่างๆ

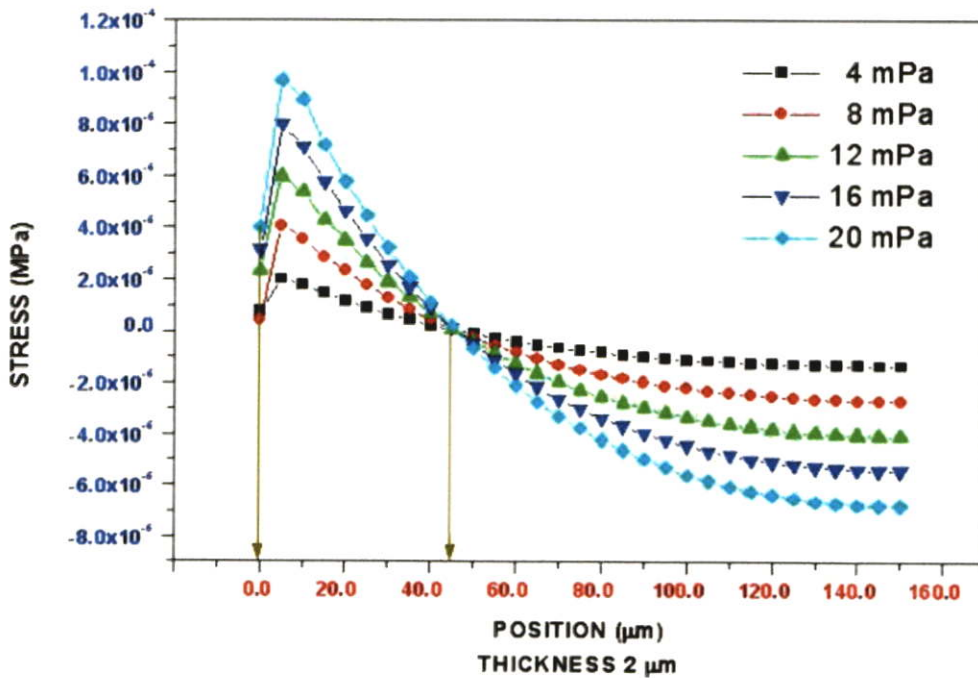


(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่มีความหนา 1 μm



(ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่มีความหนา 1.5 μm

รูปที่ 5.6 (ต่อ)



(จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 2 μm

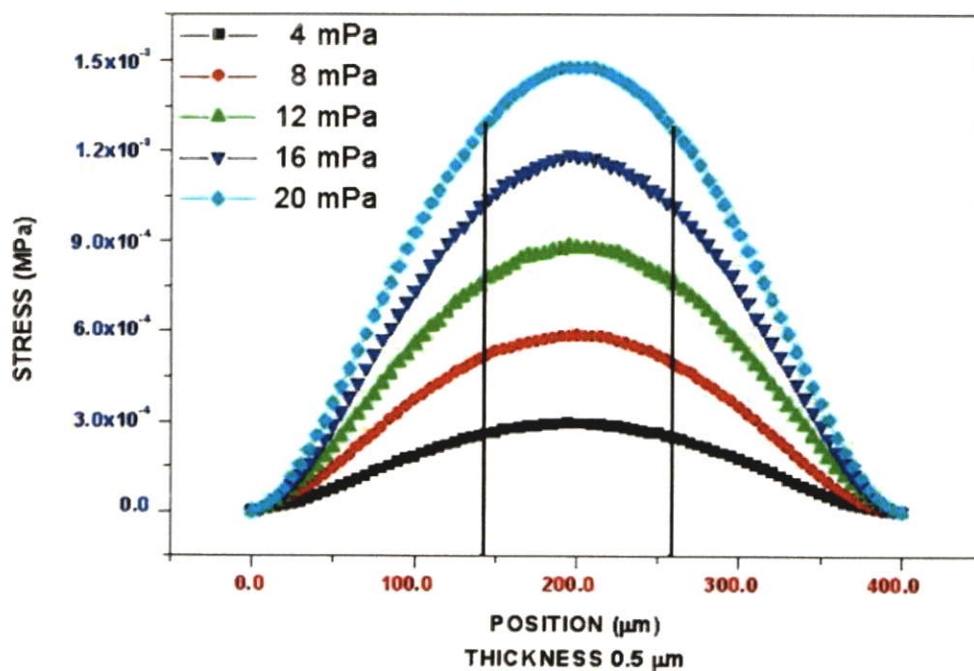
รูปที่ 5.6 (ต่อ)

5.1.4 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$

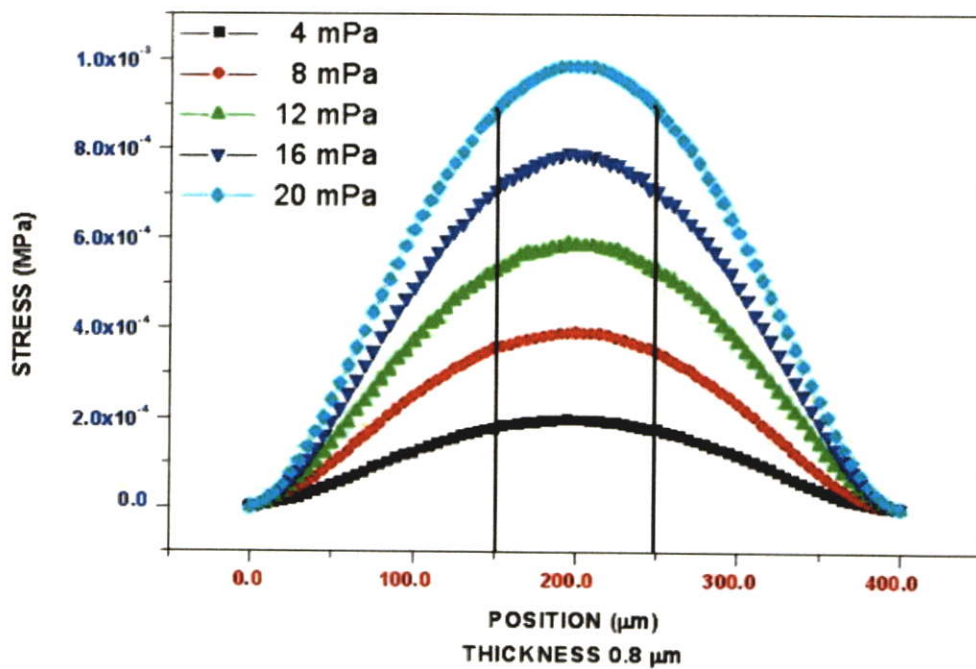
ผลการหาช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm โดยมีความดันที่เปลี่ยนแปลง 5 ค่า คือ 4, 8, 12, 16 และ 20 mPa ซึ่งจะมีลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอน 2 ลักษณะ คือ การวางตัวด้านทานแบบขนาน และการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก

5.1.4.1 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนาน

ผลการหาช่วงตำแหน่งที่ลักษณะการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมแบบขนานแสดงดังในรูปที่ 5.7 จากกราฟผลการทดลอง ทำให้สามารถประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm เฉลี่ยอยู่ที่ 150 – 250 μm ซึ่งการประมาณช่วงตำแหน่งนั้นจะคิดที่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์จากค่าความเค้นสูงสุดและตำแหน่งเริ่มต้นในการหาค่าช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก คือ ที่ตำแหน่ง 200 μm

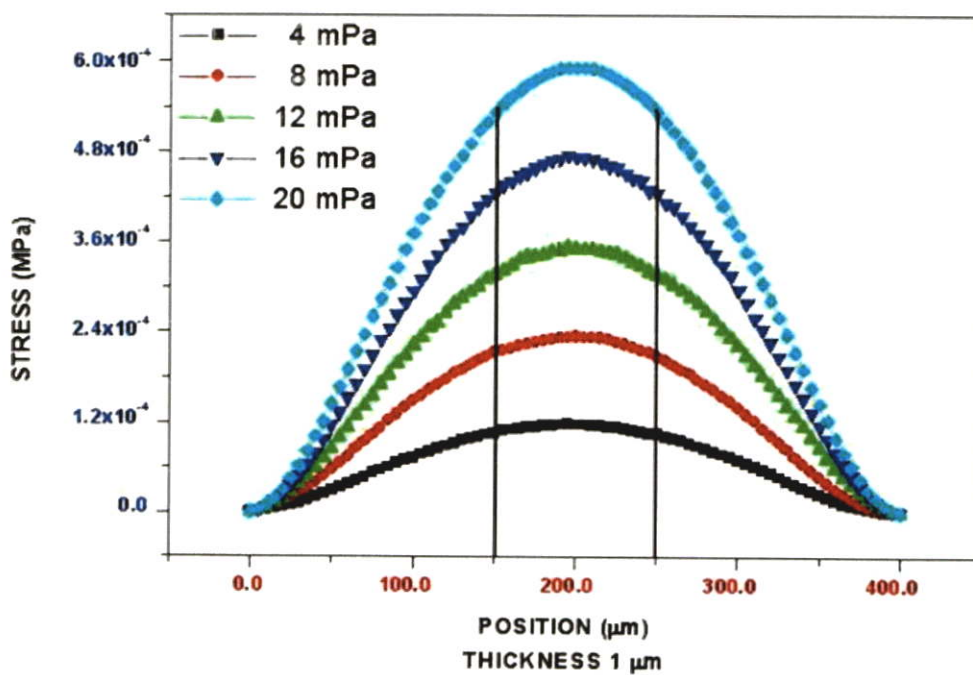


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.5 μm

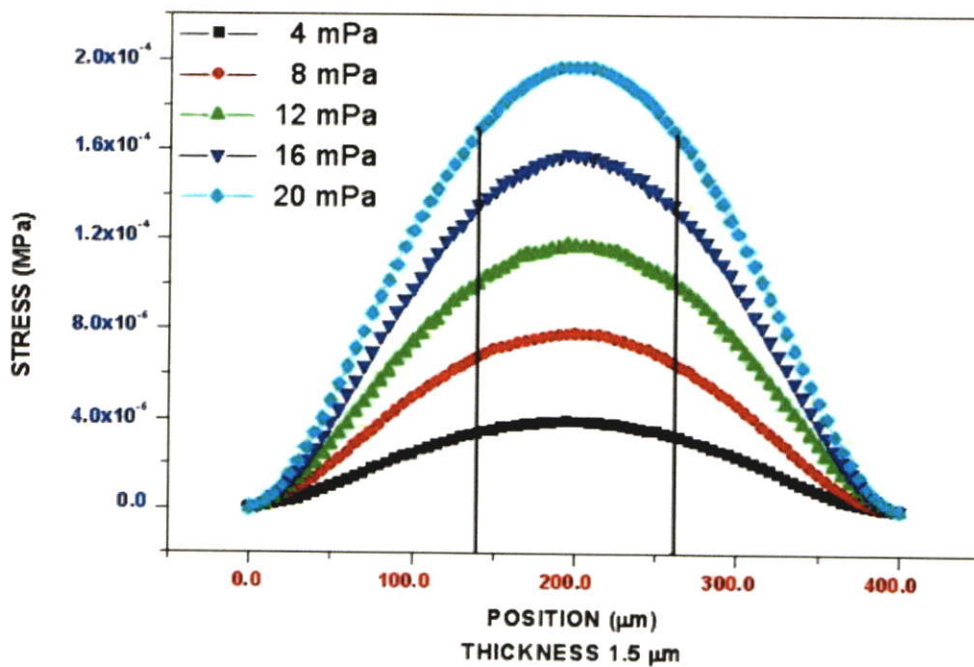


(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.7 ตำแหน่งวางตัวด้านทานแบบขนานบนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาต่างๆ

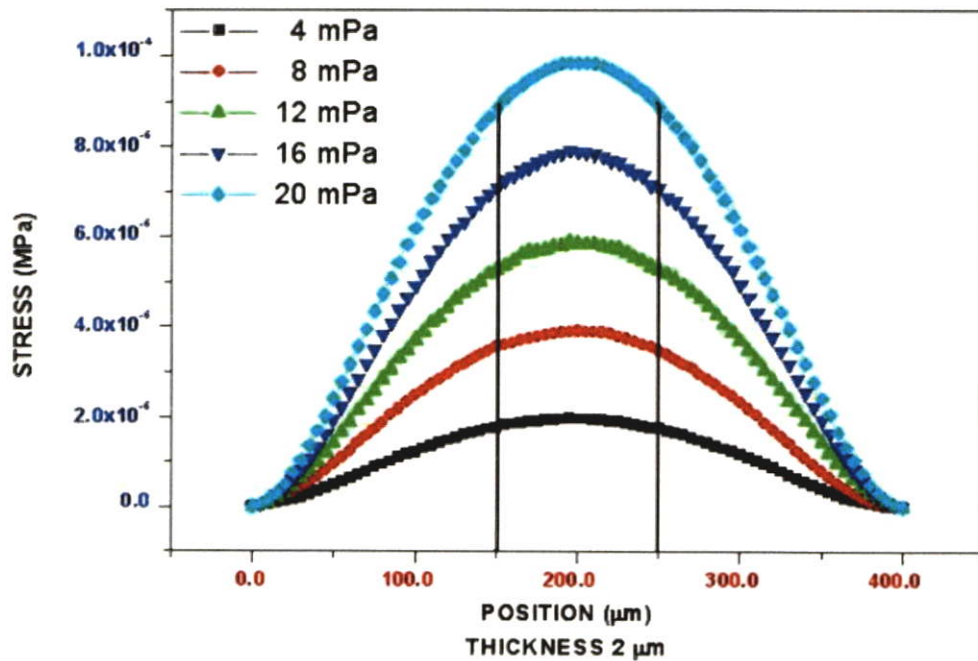


(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา $1 \mu\text{m}$



(ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา $1.5 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.7 (ต่อ)

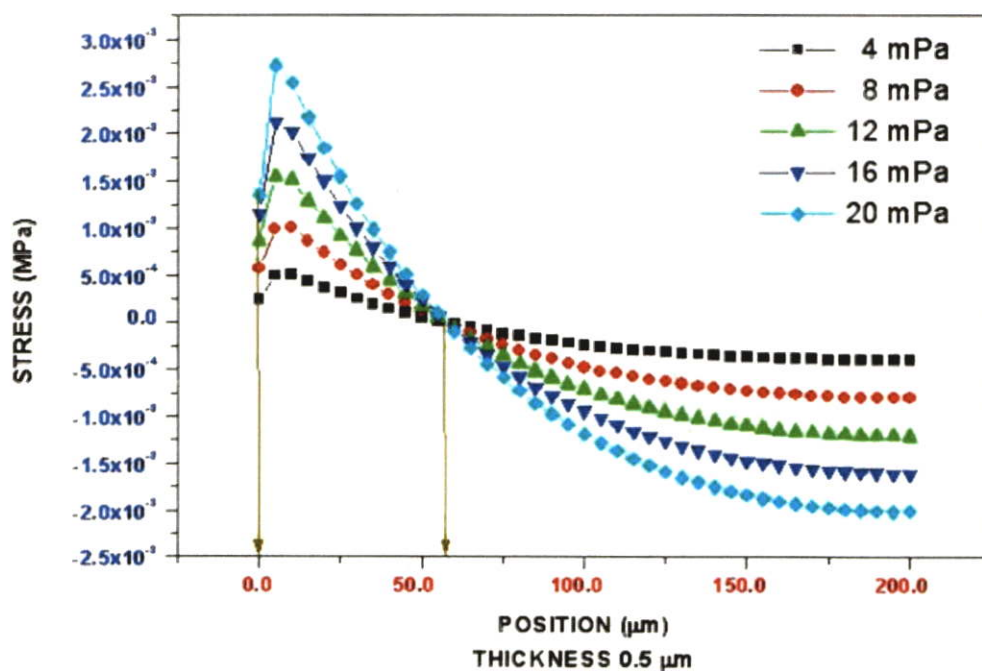


(จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 2 μm

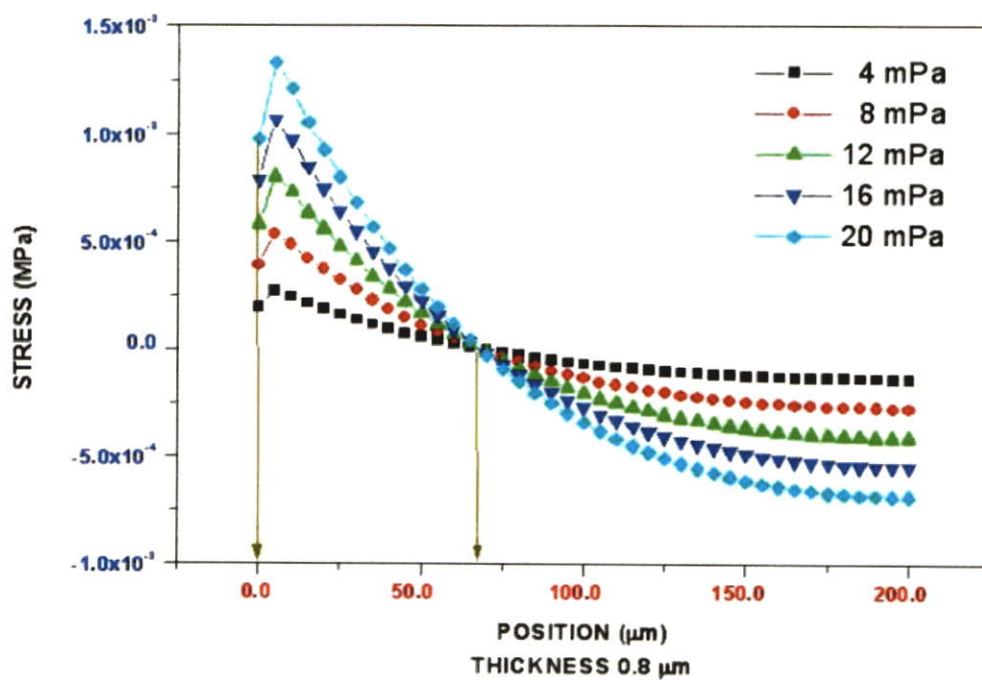
รูปที่ 5.7 (ต่อ)

5.1.4.2 ตำแหน่งลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉาก

ผลการหาช่วงตำแหน่งที่ลักษณะการวางตัวด้านทานบน โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมแบบตั้งฉาก แสดงดังในรูปที่ 5.8 จากกราฟผลการทดลอง ทำให้สามารถประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบน โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า เฉลี่ยอยู่ที่ 0 – 59 μm การประมาณช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากจะพิจารณาจากค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยโดยรวมของทั้ง 5 ความหนา

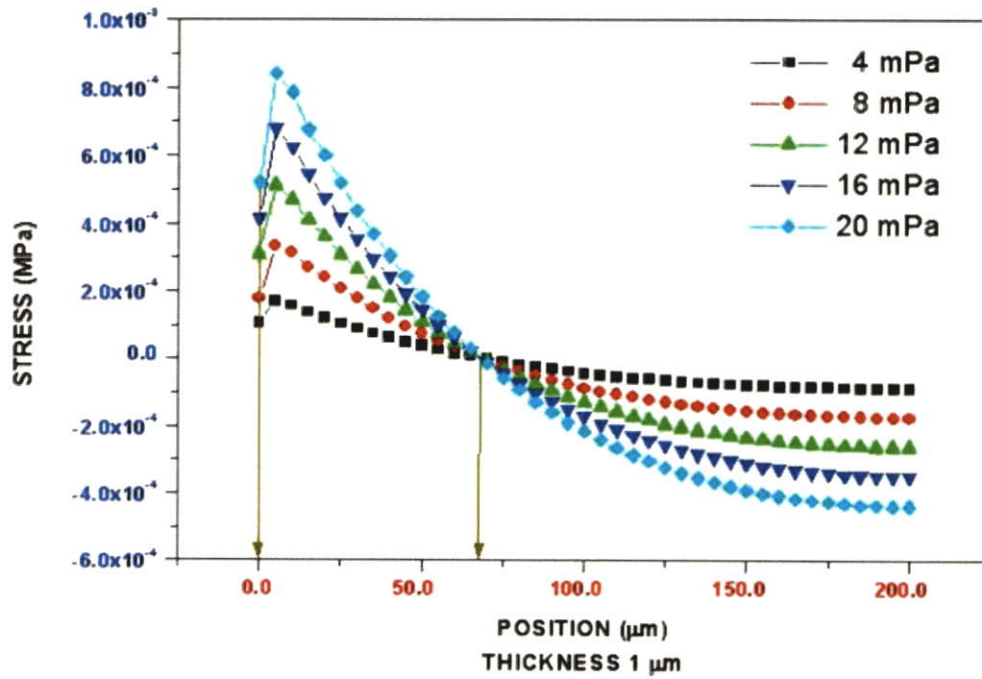


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.5 μm

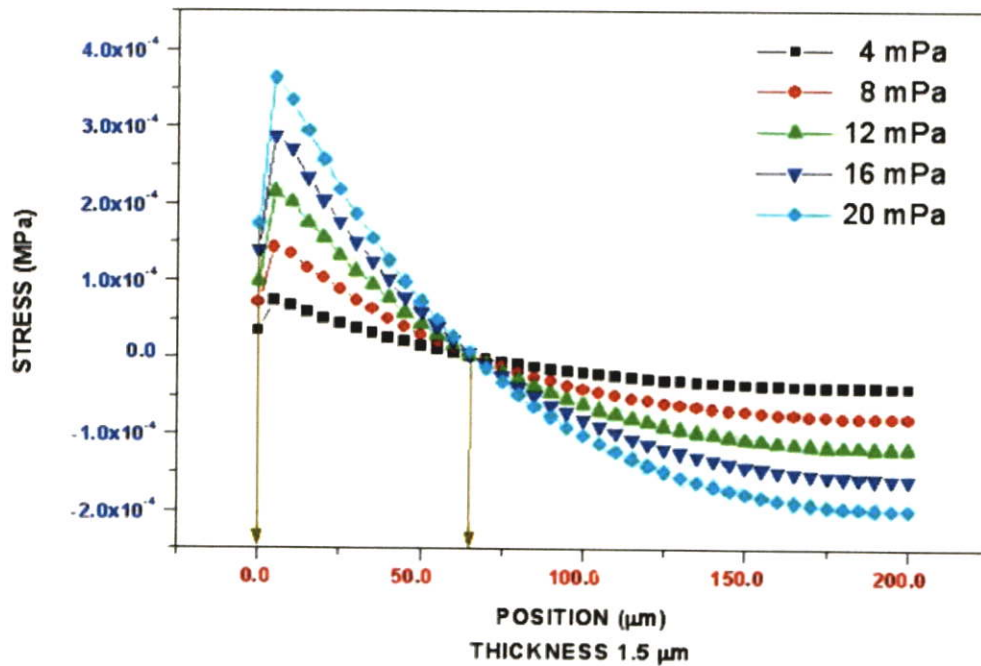


(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.8 ตำแหน่งวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากบนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาต่างๆ

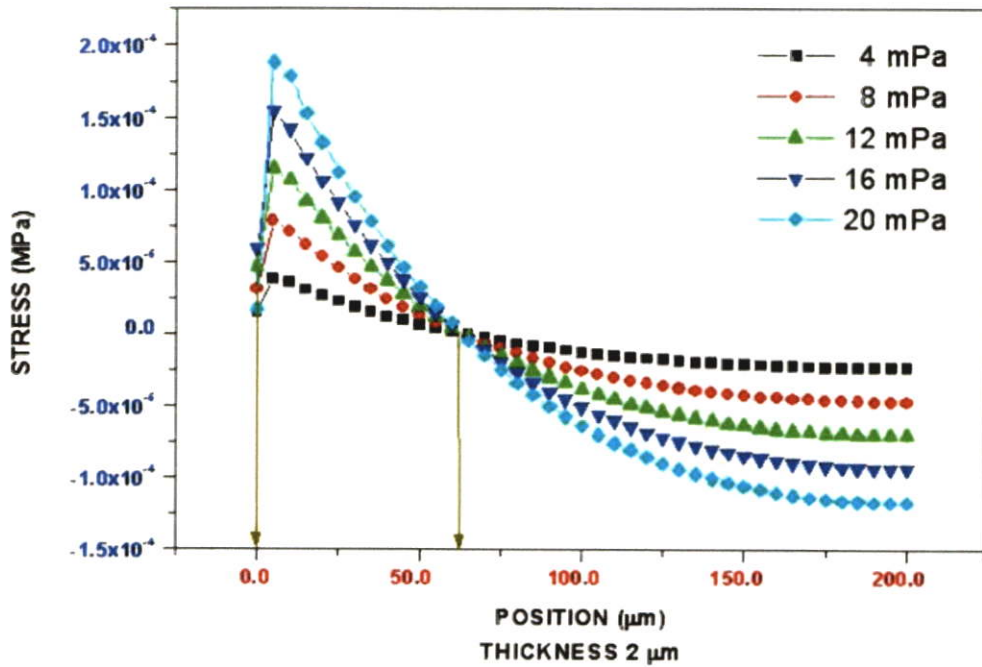


(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 1 μm



(ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 1.5 μm

รูปที่ 5.8 (ต่อ)



(จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับตำแหน่งที่ความหนา 2 μm

รูปที่ 5.8 (ต่อ)

จากผลการทดลองการหาตำแหน่งในการวางตัวด้านทานบน โพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมที่ขนาด ทั้ง 4 ค่า และที่ความหนาทั้ง 5 ค่า สามารถสรุปเป็นตารางช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานแบบขนาน และแบบตั้งฉาก ดังในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าช่วงตำแหน่งในการวางตัวด้านทานบน โพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมที่มีลักษณะ การวางแบบขนานและแบบตั้งฉาก

Dimension	Thickness	Position of parallel	Position of perpendicular
100×100 μm^2	0.5 μm	≈ 40-60 μm	≈ 0-12 μm
	0.8 μm		
	1 μm		
	1.5 μm		
	2 μm		

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

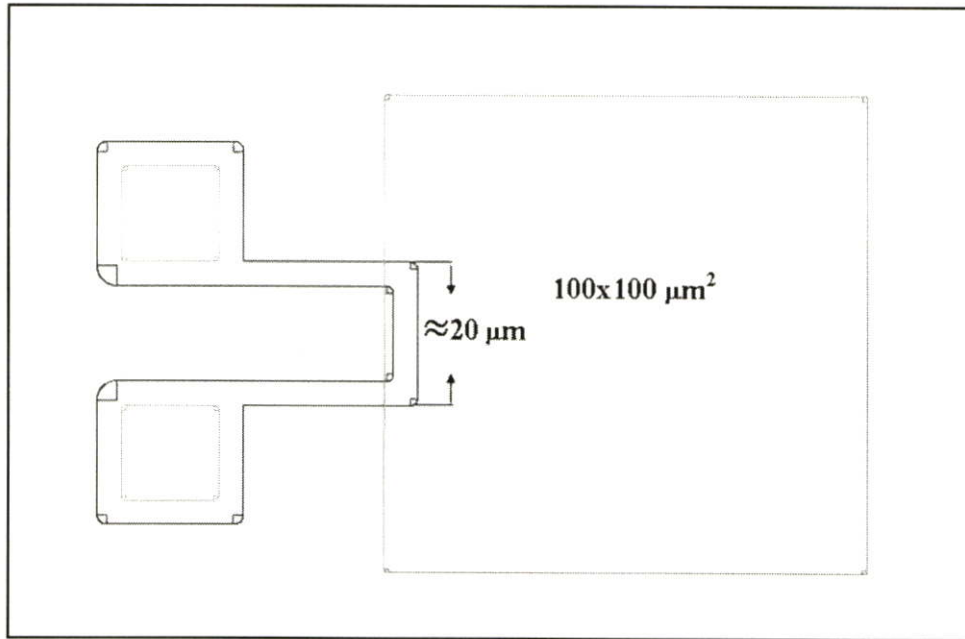
Dimension	Thickness	Position of parallel	Position of perpendicular
200×200 μm^2	0.5 μm	$\approx 75\text{-}125 \mu\text{m}$	$\approx 0\text{-}25 \mu\text{m}$
	0.8 μm		
	1 μm		
	1.5 μm		
	2 μm		
300×300 μm^2	0.5 μm	$\approx 130\text{-}170 \mu\text{m}$	$\approx 0\text{-}43 \mu\text{m}$
	0.8 μm		
	1 μm		
	1.5 μm		
	2 μm		
400×400 μm^2	0.5 μm	$\approx 150\text{-}250 \mu\text{m}$	$\approx 0\text{-}59 \mu\text{m}$
	0.8 μm		
	1 μm		
	1.5 μm		
	2 μm		

5.2 ผลการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม

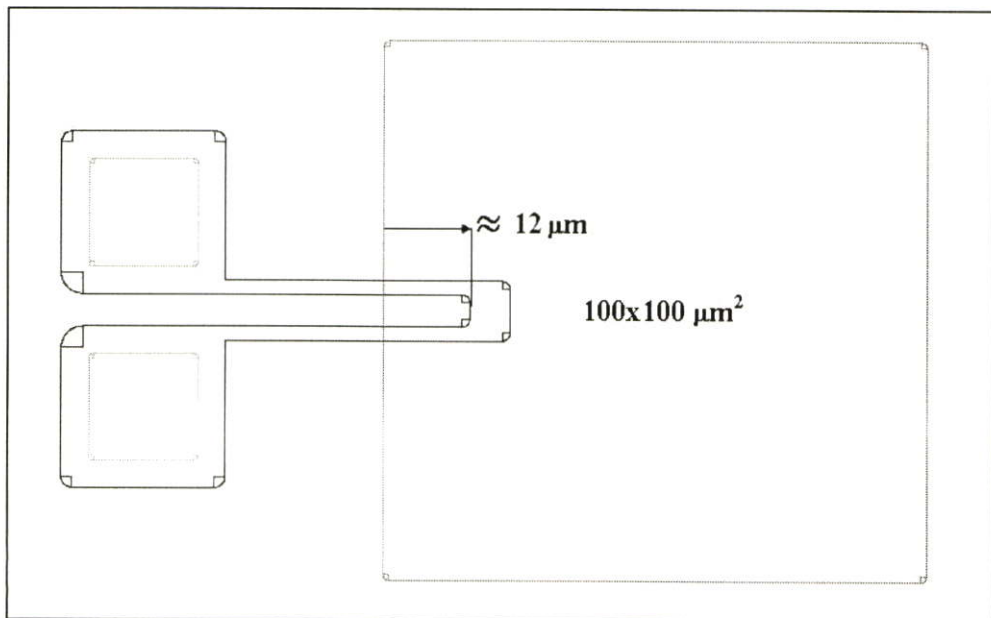
นำผลการหาดำแหน่งในการวางตัวด้านทานบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่ขนาดทั้ง 4 ค่าและความหนาทั้ง 5 ค่า ที่ลักษณะการวางทั้ง 2 แบบจากการทดลองข้างต้น มาออกแบบลักษณะการวางตัวโพลีซิสเตอร์ ทั้ง 4 ค่าและความหนาทั้ง 5 ค่า

5.2.1 การออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานที่โพลีซิลิคอนขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$

ผลการออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนานและแบบตั้งฉากบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่ขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ โดยที่มีความหนา 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ 2 μm แสดงดังรูปที่ 5.9 และ 5.10



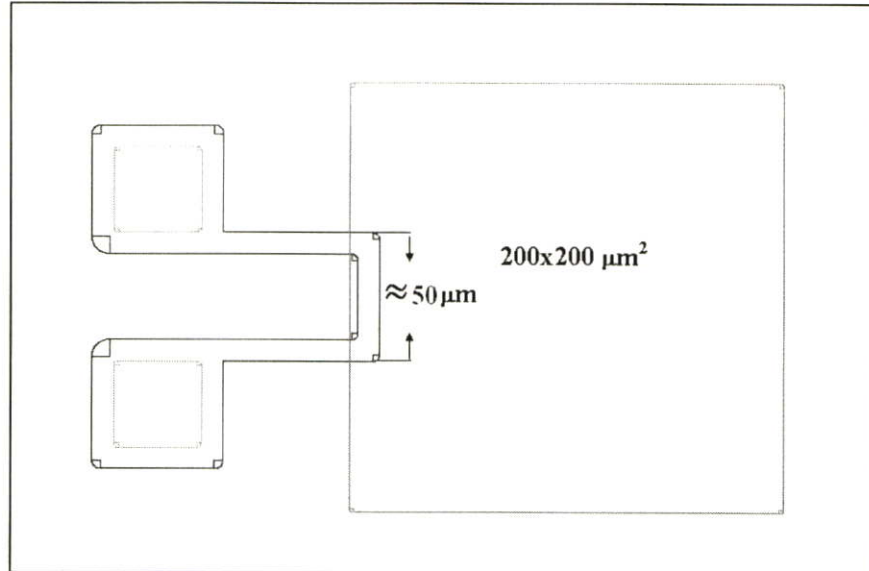
รูปที่ 5.9 ขนาดและลักษณะการวางโพลีรีซิสเตอร์แบบขนานที่ขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา



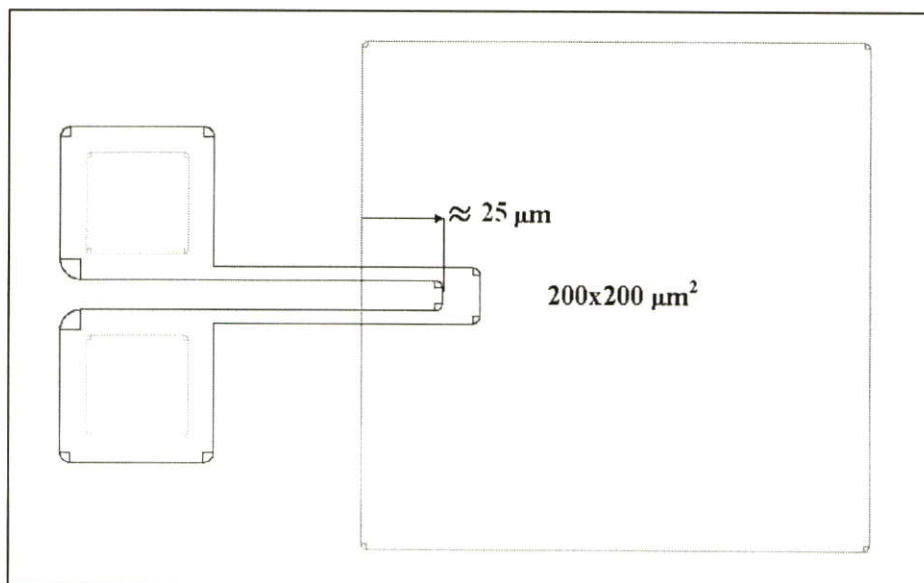
รูปที่ 5.10 ขนาดและลักษณะการวางโพลีรีซิสเตอร์แบบตั้งฉากที่ขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา

5.2.2 การออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานที่โพลีซิลิคอนขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$

ผลการออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนานและแบบตั้งฉากบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่ขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ โดยที่มึ้ความหนาทั้ง 5 ค่า แสดงดังรูปที่ 5.11 และ 5.12



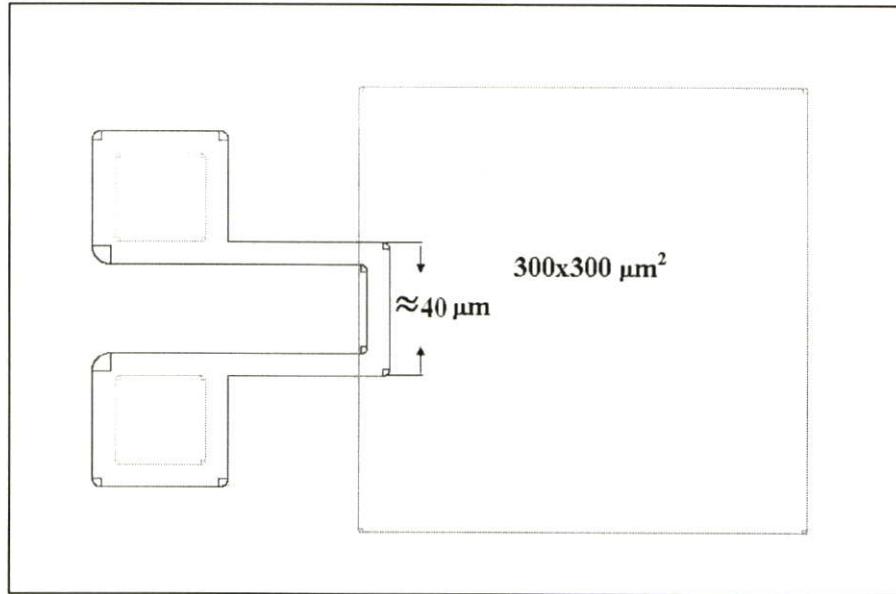
รูปที่ 5.11 ขนาดและลักษณะการวางโพลีซิลิเตอร์แบบขนานที่ขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ความหนาค่าต่าง



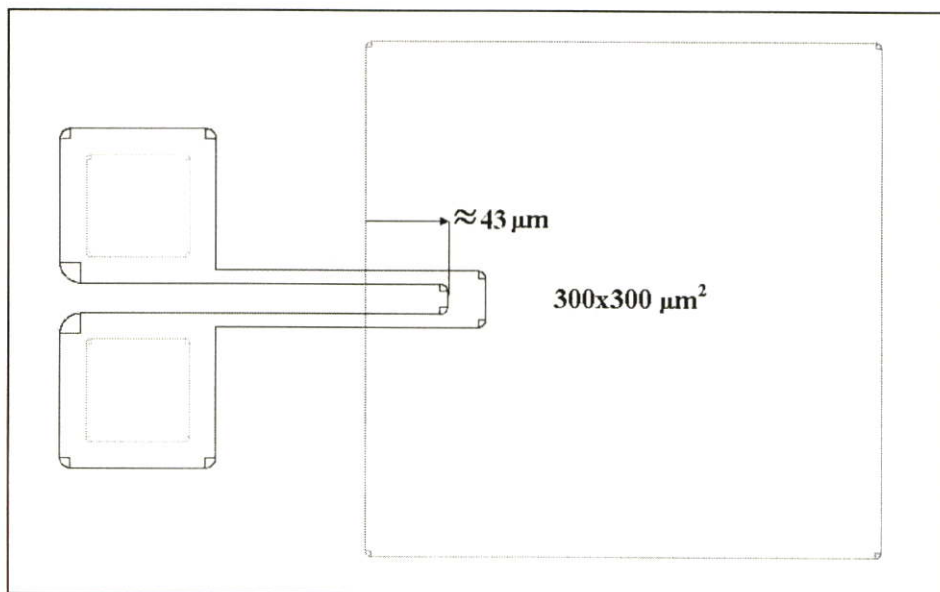
รูปที่ 5.12 ขนาดและลักษณะการวางโพลีซิลิเตอร์แบบตั้งฉากที่ขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา

5.2.3 การออกแบบลักษณะการวางตัวต้านทานที่โพลีซิลิคอนขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$

ผลการออกแบบลักษณะการวางตัวต้านทานแบบขนานและแบบตั้งฉากบนโพลีซิลิคอนไดอะเฟรมที่ขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ โดยที่มีความหนาทั้ง 5 ค่า แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.14



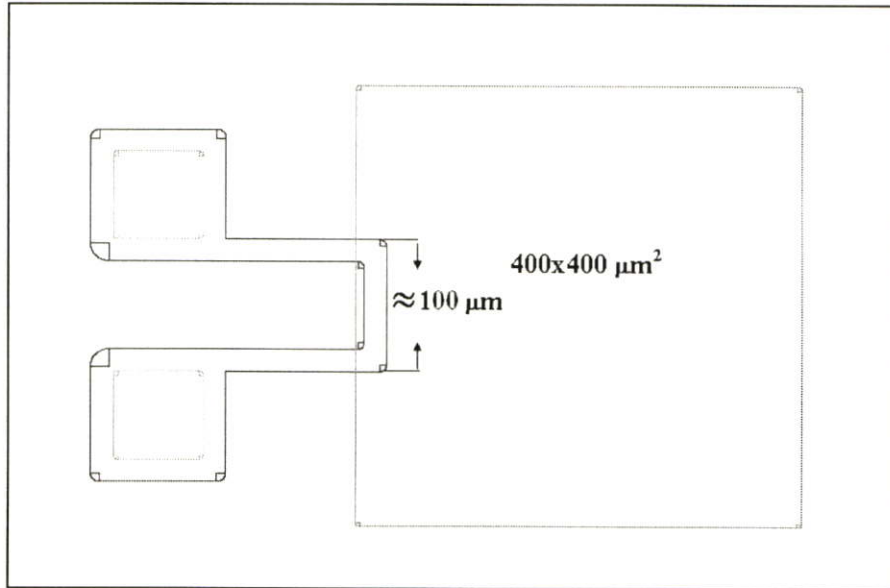
รูปที่ 5.13 ขนาดและลักษณะการวางโพลีซิลิคอนแบบขนานที่ขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา



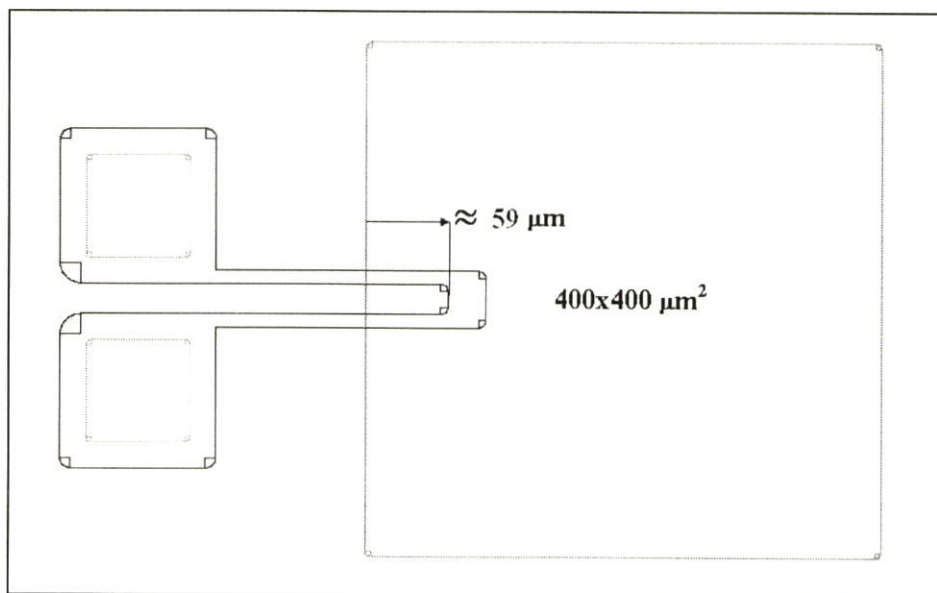
รูปที่ 5.14 ขนาดและลักษณะการวางโพลีซิลิคอนแบบตั้งฉากที่ขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา

5.2.4 การออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานที่โพลีซิลิคอนขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$

ผลการออกแบบลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนานและแบบตั้งฉากบนโพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมที่ขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ โดยที่มีความหนาทั้ง 5 ค่า แสดงดังรูปที่ 5.15 และ 5.16



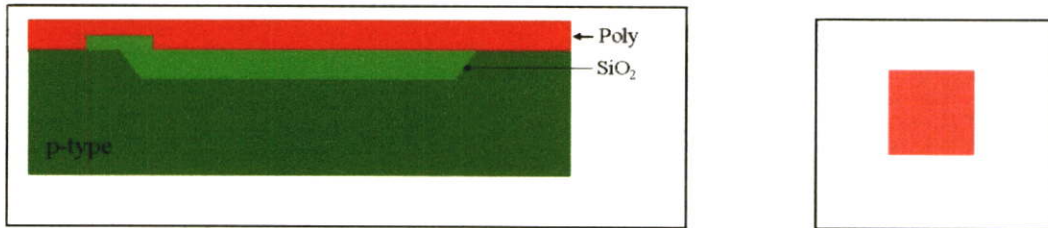
รูปที่ 5.15 ขนาดและลักษณะการวางโพลีซิลิไซด์เตอร์แบบขนานที่ขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา



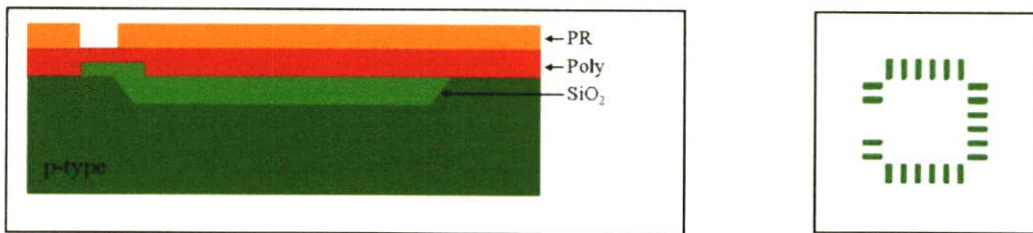
รูปที่ 5.16 ขนาดและลักษณะการวางโพลีซิลิไซด์เตอร์แบบตั้งฉากที่ขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ทุกความหนา

5.2.5 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม

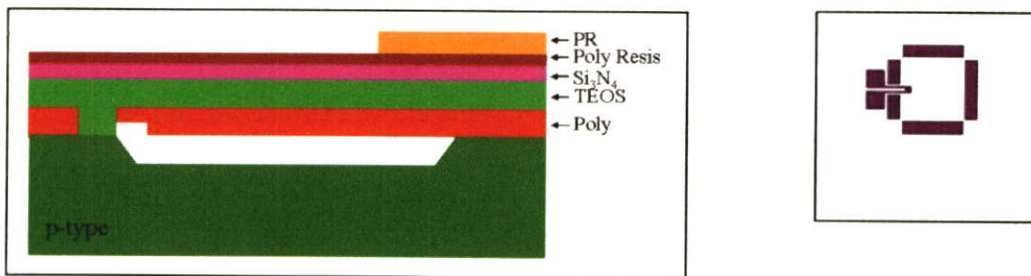
การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมตามโครงสร้างจริงดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งสามารถแสดงลำดับการออกแบบตามโครงสร้างจริงด้วย L-Edit ได้ดังในรูปที่ 5.17



(ก) สร้างชั้น โพลีซิลิคอนไดอะแฟรม

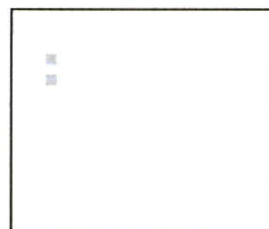
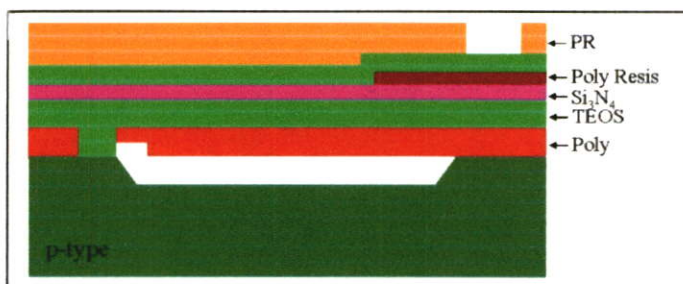


(ข) ซ่องกัก Cavity

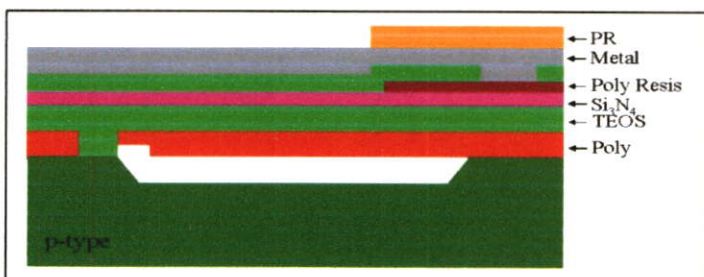


(ค) โพลีรีซิสเตอร์

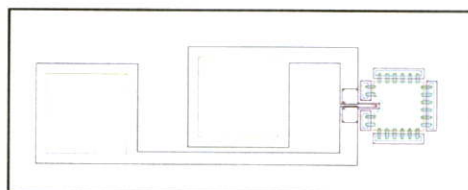
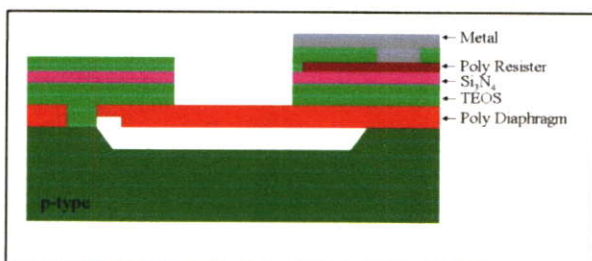
รูปที่ 5.17 ลำดับการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปด้วย L-Edit



(ง) เปิดช่อง R Contact



(จ) สร้างขั้วโลหะ



(ฉ) ภาพรวมการออกแบบของทรานสดิวเซอร์ความดัน 1 ตัว

รูปที่ 5.17 (ต่อ)

5.3 ผลการหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลียูรีเธนเป็นไดอะแฟรม

ลักษณะคุณสมบัติพื้นฐานของทรานสดิวเซอร์ความดัน ซึ่งมักจะถูกพิจารณาเป็นอันดับต้นๆ ก็คือ ค่าของความไวในการตอบสนองต่อความดัน การหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลียูรีเธนเป็นไดอะแฟรมของงานวิจัยนี้จะหาจากการคำนวณซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังสมการที่ 2.13 – 2.16 โดยที่ค่ายังโมดูลัสของโพลียูรีเธนจากงานวิจัยที่เอกสารอ้างอิง [15] จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 161 GPa, ค่าเกจแฟกเตอร์ของโพลียูรีเธนในแนวขนานที่ประมาณ 43 และค่าเกจแฟกเตอร์ของโพลียูรีเธนในแนวตั้งฉากที่ประมาณ -11

จากที่ได้กล่าวไว้ในขั้นตอนการทดลองในบทที่ 4 แล้วว่า ในขั้นตอนการทดลองนี้จะทำการทดลองหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดัน โครงสร้างเดิมของ TMEC ด้วยชุดเครื่องมือทดสอบความดันเทียบกันผลการทดลองด้วย coventorware™ ซึ่งผลการทดลองทั้งสองแบบแสดงดังในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ

เปียโซรีซิสทีปที่มีโพลียูรีเธนเป็นไดอะแฟรม โครงสร้างเดิมของ TMEC จากทั้งสองวิธี

	ชุดทดสอบความดัน	CoventerWare™
Sensitivity	$\approx 1 \times 10^{-4}/\text{Pa}$	$\approx 0.73 \times 10^{-4}/\text{Pa}$

จากการทดสอบเมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าค่าความไวในการตอบสนองที่หาจากการทดลองทั้ง 2 แบบนั้นได้ค่าความไวในการตอบสนองไม่เท่ากันแต่เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแล้วถือว่าอยู่ในภาวะยอมรับได้

ผลการหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ และที่ความหนาทั้ง 5 ค่า แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มี โพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรมที่ขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า

Dimension	Thickness	Sensitivity (parallel)	Sensitivity (perpendicular)
$100 \times 100 \mu\text{m}^2$	0.5 μm	$\approx 7.81 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 1.83 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	0.8 μm	$\approx 2.76 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 1.56 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	1 μm	$\approx 1.35 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 1.03 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	1.5 μm	$\approx 3.97 \times 10^{-7}/\text{Pa}$	$\approx 3.79 \times 10^{-7}/\text{Pa}$
	2 μm	$\approx 1.81 \times 10^{-7}/\text{Pa}$	$\approx 1.46 \times 10^{-7}/\text{Pa}$

ผลการหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่ ไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ และที่ความหนาทั้ง 5 ค่าแสดงผลดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มี โพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรมที่ขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า

Dimension	Thickness	Sensitivity (parallel)	Sensitivity (perpendicular)
$200 \times 200 \mu\text{m}^2$	0.5 μm	$\approx 3.62 \times 10^{-5}/\text{Pa}$	$\approx 8.16 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	0.8 μm	$\approx 4.41 \times 10^{-5}/\text{Pa}$	$\approx 6.79 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	1 μm	$\approx 8.54 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 5.18 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	1.5 μm	$\approx 2.28 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 1.67 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	2 μm	$\approx 1.05 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 7.47 \times 10^{-7}/\text{Pa}$

ผลการหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่ ไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ และที่ความหนาทั้ง 5 ค่าแสดงผลดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มี โพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรมที่ขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า

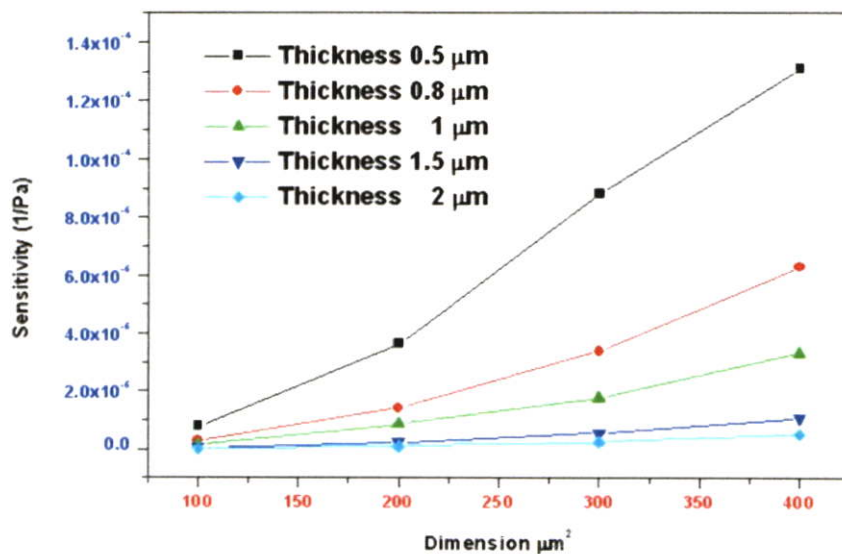
Dimension	Thickness	Sensitivity (parallel)	Sensitivity (perpendicular)
$300 \times 300 \mu\text{m}^2$	0.5 μm	$\approx 8.79 \times 10^{-5}/\text{Pa}$	$\approx 1.66 \times 10^{-5}/\text{Pa}$
	0.8 μm	$\approx 3.37 \times 10^{-5}/\text{Pa}$	$\approx 1.50 \times 10^{-5}/\text{Pa}$
	1 μm	$\approx 1.76 \times 10^{-5}/\text{Pa}$	$\approx 1.04 \times 10^{-5}/\text{Pa}$
	1.5 μm	$\approx 5.56 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 4.56 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	2 μm	$\approx 2.51 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 2.21 \times 10^{-6}/\text{Pa}$

ผลการหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่ไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ และที่ความหนาทั้ง 5 ค่าแสดงผลดังตารางที่ 5.6

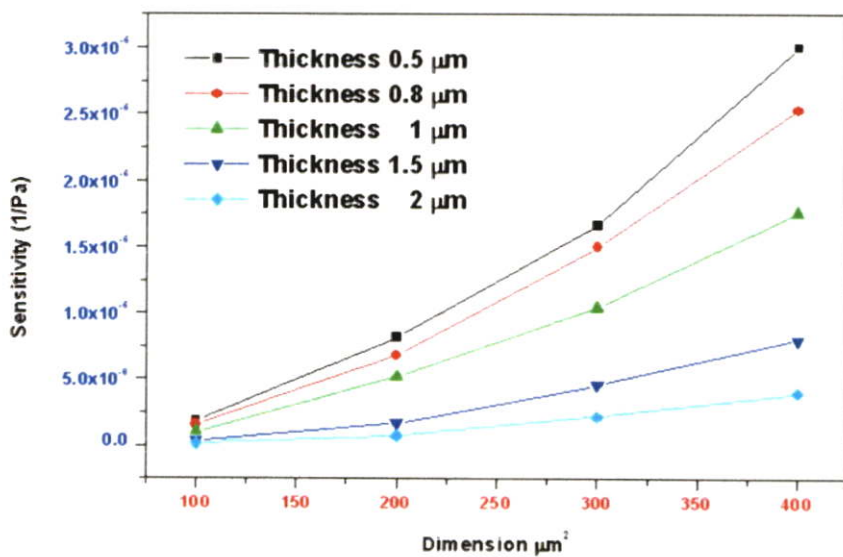
ตารางที่ 5.6 ผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มี โพลีซิลิกอนเป็นไดอะแฟรมที่ขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 5 ค่า

Dimension	Thickness	Sensitivity (parallel)	Sensitivity (perpendicular)
$400 \times 400 \mu\text{m}^2$	0.5 μm	$\approx 1.31 \times 10^{-4}/\text{Pa}$	$\approx 3.00 \times 10^{-5}/\text{Pa}$
	0.8 μm	$\approx 6.29 \times 10^{-5}/\text{Pa}$	$\approx 2.53 \times 10^{-5}/\text{Pa}$
	1 μm	$\approx 3.31 \times 10^{-5}/\text{Pa}$	$\approx 1.76 \times 10^{-5}/\text{Pa}$
	1.5 μm	$\approx 1.09 \times 10^{-5}/\text{Pa}$	$\approx 7.98 \times 10^{-6}/\text{Pa}$
	2 μm	$\approx 5.13 \times 10^{-6}/\text{Pa}$	$\approx 4.00 \times 10^{-6}/\text{Pa}$

จากผลค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่คำนวณได้นั้น สามารถพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตอบสนองเมื่อพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมเปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีความหนาคงที่ได้ดังในรูปที่ 5.18 จากรูปจะเห็นว่าค่าความไวในการตอบสนองจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมเพิ่มขึ้นทั้งการวางในแนวขนานและตั้งฉาก



(ก) ที่ลักษณะวงตัวด้านทานในแนวขนาน



(ข) ที่ลักษณะวงตัวด้านทานในแนวตั้งฉาก

รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตอบสนองกับขนาดของไดอะแฟรม

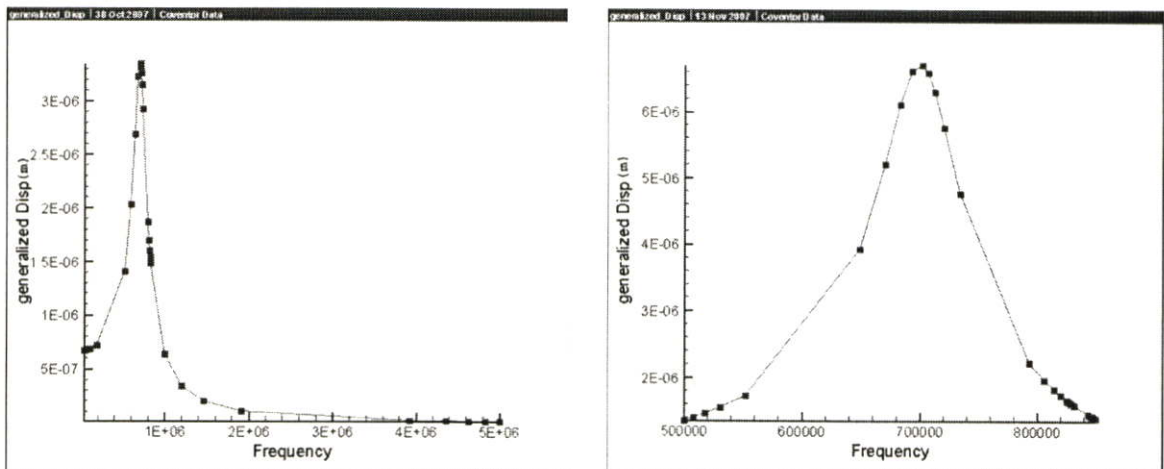
จากกราฟจะเห็นว่าที่เงื่อนไขของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่ $400 \times 400 \times 0.5 \mu\text{m}^3$ จะมีค่าความไวในการตอบสนองที่ดีที่สุด แต่ในกระบวนการสร้างจริงความหนาของโพลีซิลิคอนที่ $0.5 \mu\text{m}$ ยังไม่สามารถสร้างได้จึงพิจารณาที่เงื่อนไขรองลงมาคือ เงื่อนไขของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่ $400 \times 400 \times 0.8 \mu\text{m}^3$ ถึงแม้ว่าที่เงื่อนไขนี้จะมีค่าความไวในการตอบสนองรองมาจากที่ความหนา $0.5 \mu\text{m}$ แต่เมื่อพิจารณาถึงผลการผลิตแล้วนั้นยังถือว่ามียอัตรานัก ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างจะอยู่ที่เงื่อนไขของโพลีซิลิคอนที่ $400 \times 400 \times 1 \mu\text{m}^3$

5.4 ผลการหาผลตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม

ลักษณะคุณสมบัติพื้นฐานของไมโครโฟนที่ต้องพิจารณา คือ ผลการตอบสนองต่อความถี่ในงานวิจัยนี้เราต้องการจะประยุกต์ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปเพื่อใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็กจึงต้องมีการหาผลการหาผลตอบสนองต่อความถี่

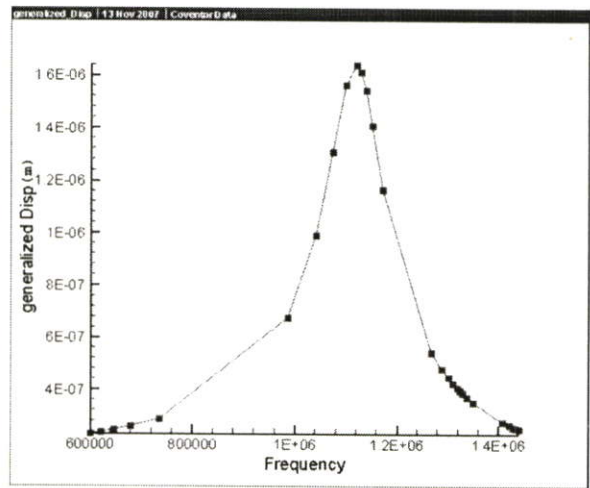
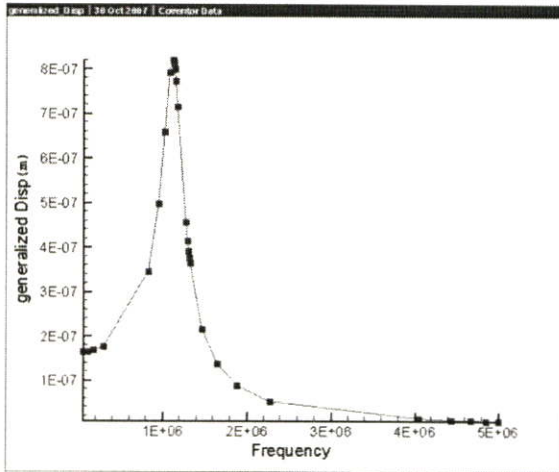
5.4.1 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$

ผลการตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมโดยมีขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 4 ค่าแสดงในรูปที่ 5.19

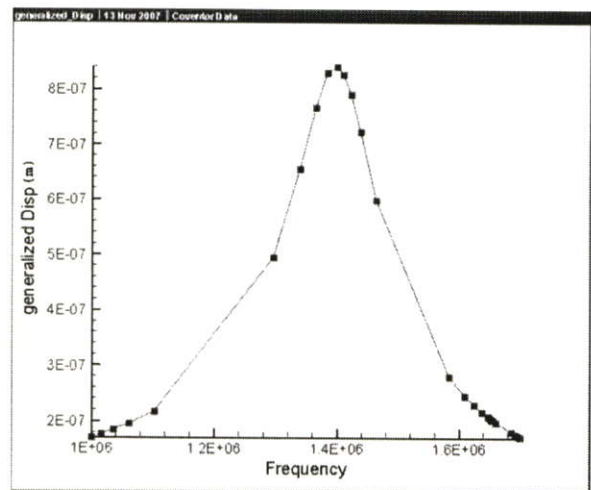
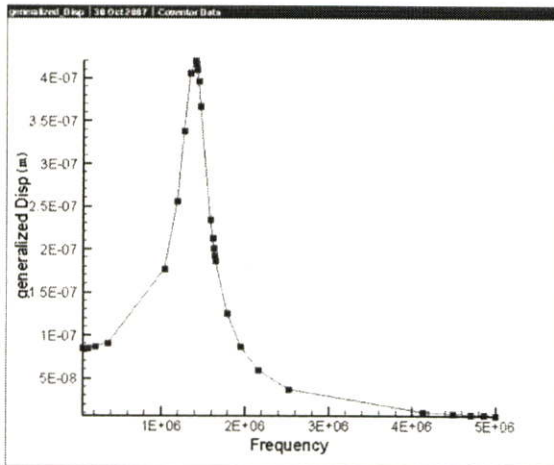


(ก) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา $0.5 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่ที่โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$

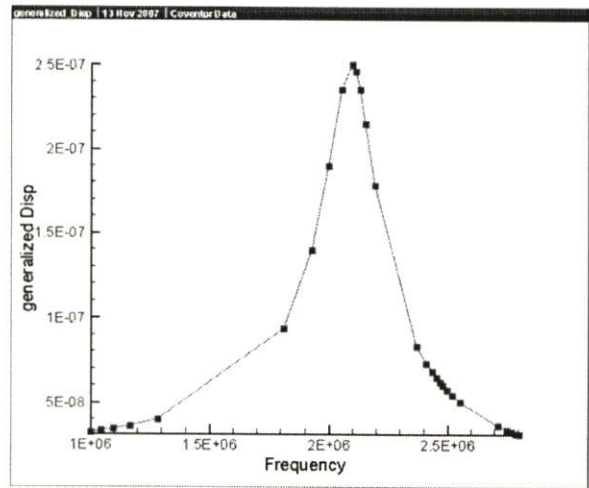
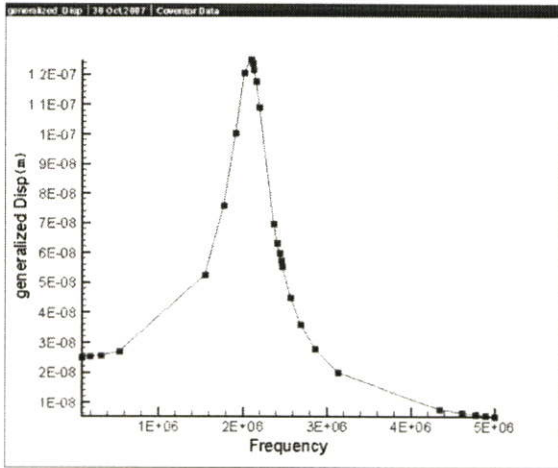
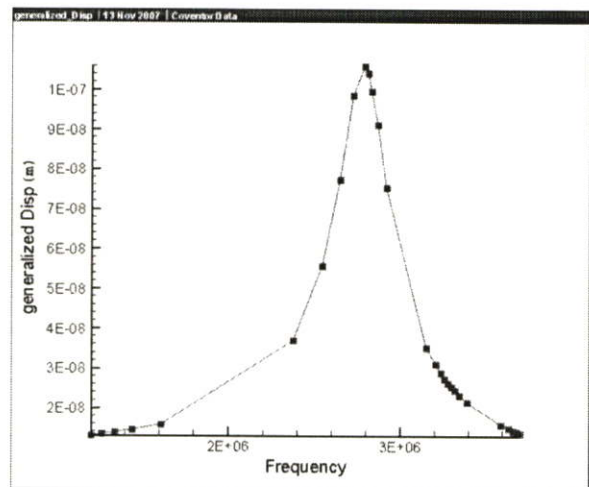
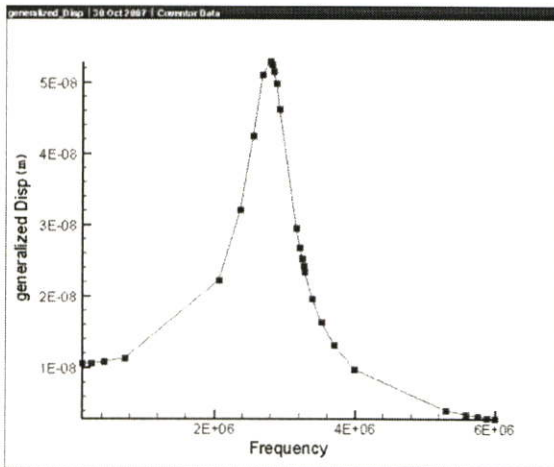


(ข) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.8 μm



(ค) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1 μm

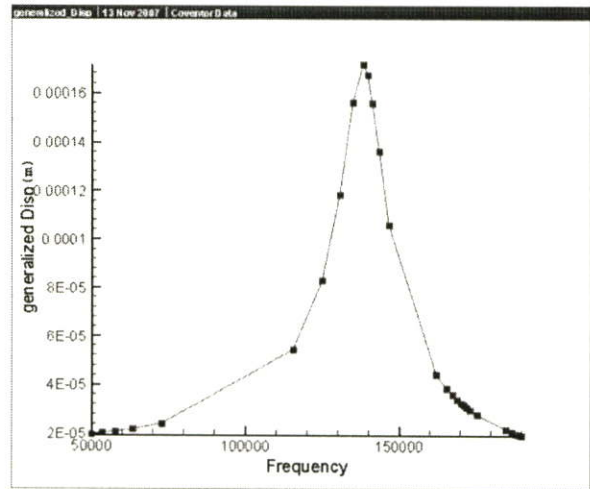
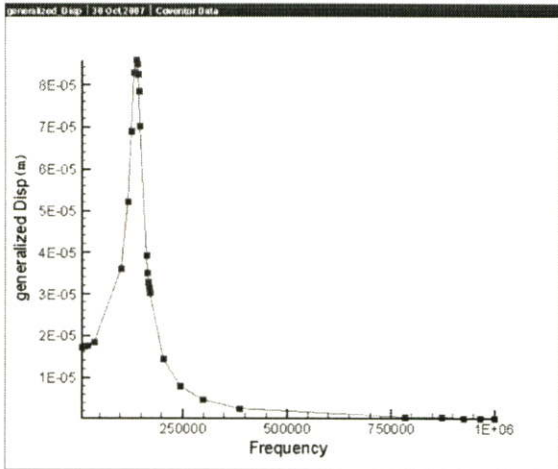
รูปที่ 5.19 (ต่อ)

(ง) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 μm (จ) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 2 μm

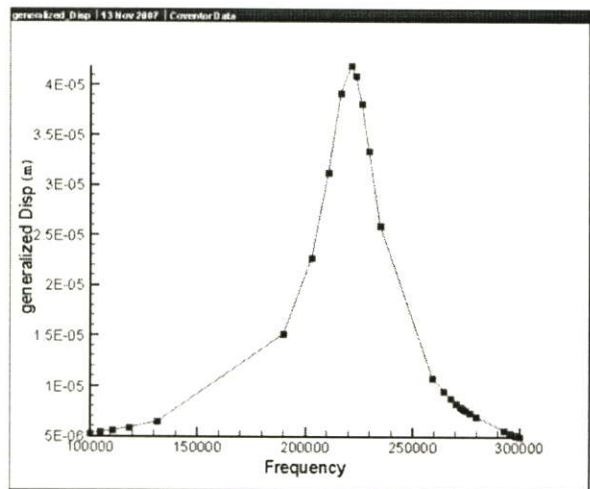
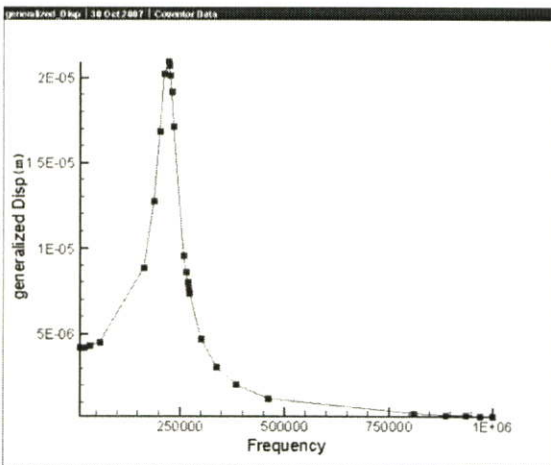
รูปที่ 5.19 (ต่อ)

5.4.2 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$

ผลการตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมโดยมีขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 4 ค่าแสดงในรูปที่ 5.20

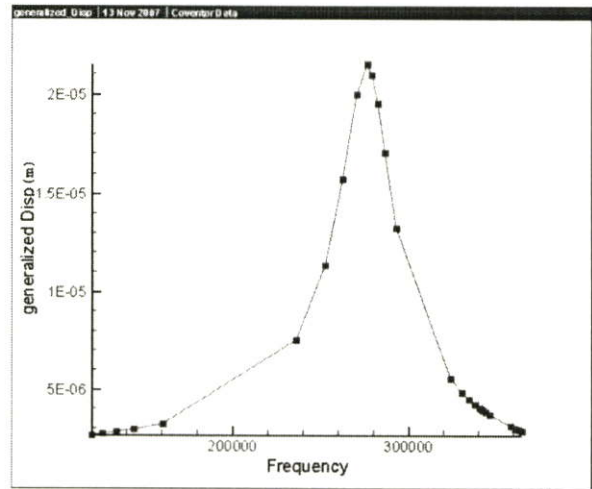
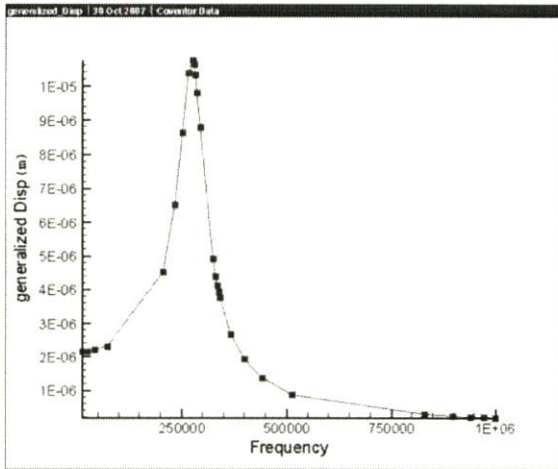
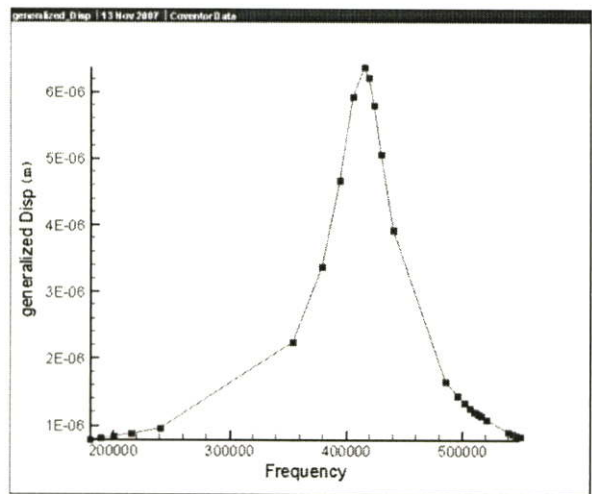
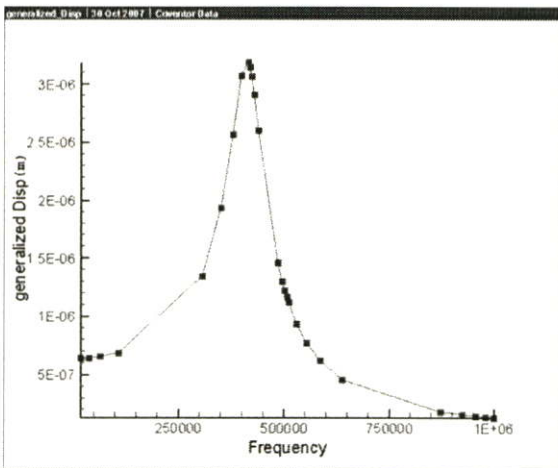


(ก) โพลีซิติคอนไดอะแฟรมหนา 0.5 μm

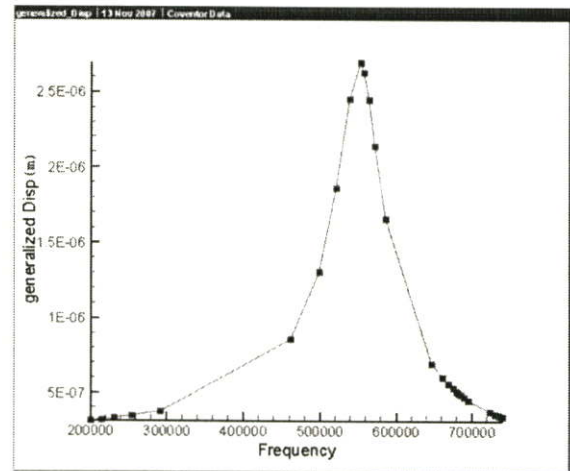
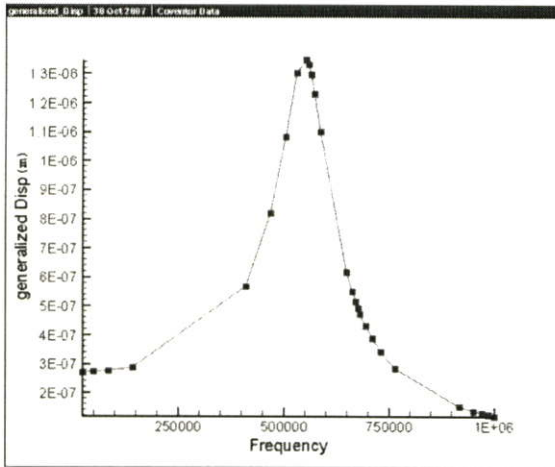


(ข) โพลีซิติคอนไดอะแฟรมหนา 0.8 μm

รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่ที่โพลีซิติคอนไดอะแฟรมขนาด $200 \times 200 \mu\text{m}^2$

(ก) โพลีซิติลคอนไดอะแฟรมหนา 1 μm (ข) โพลีซิติลคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 μm

รูปที่ 5.20 (ต่อ)

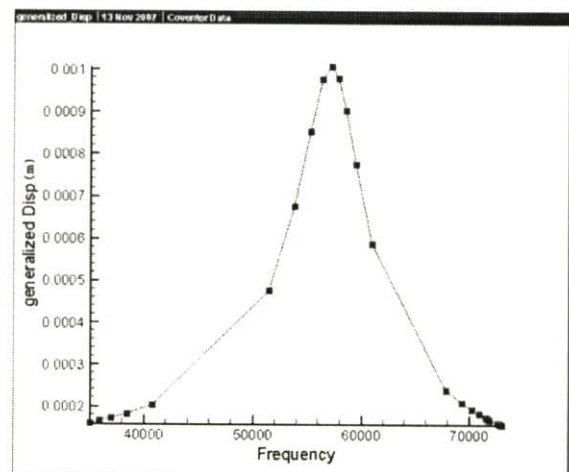
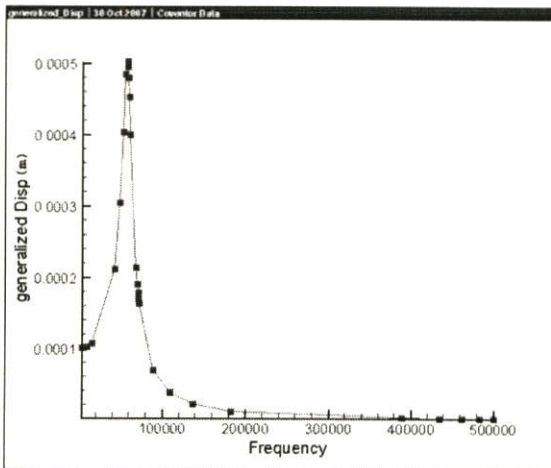


(จ) โพลีซิติลคอนไดอะแฟรมหนา $2 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.20 (ต่อ)

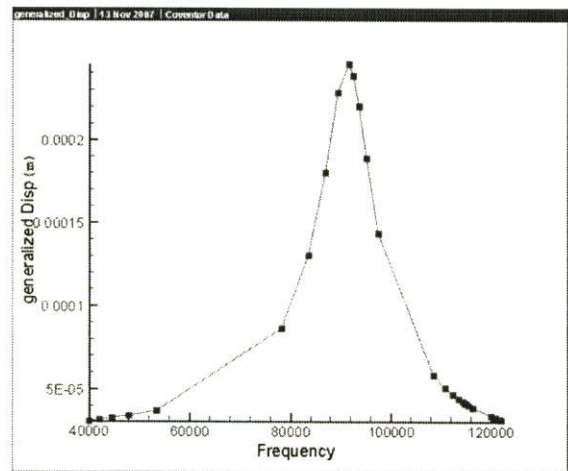
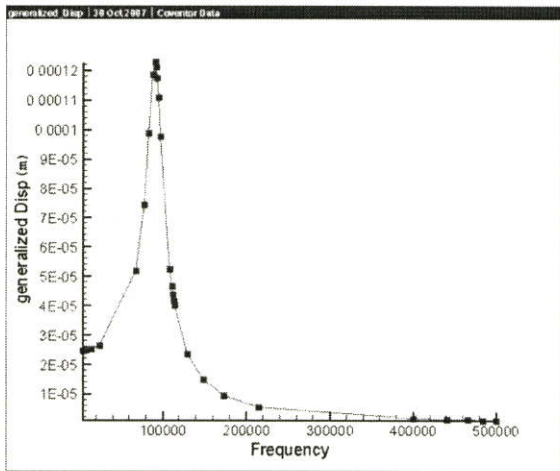
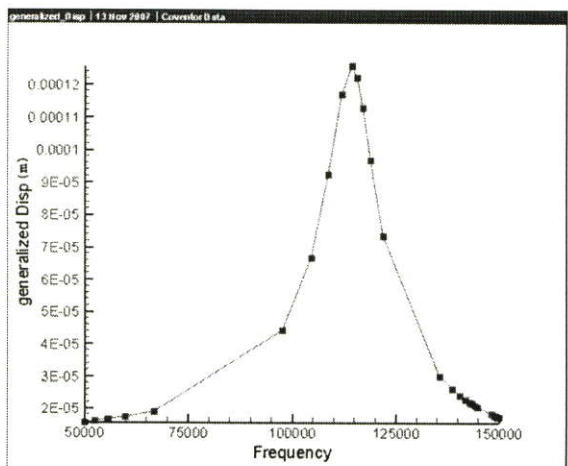
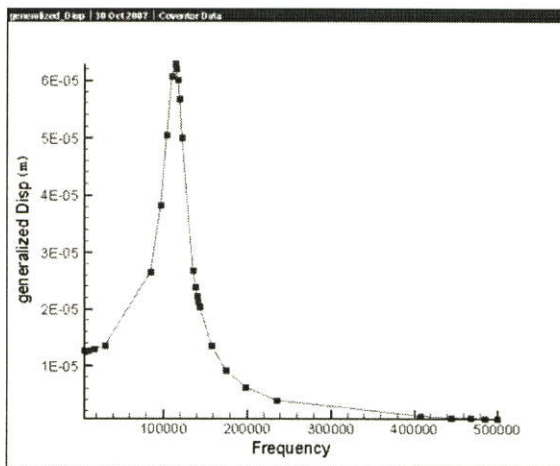
5.4.3 โพลีซิติลคอนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$

ผลการตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่มีโพลีซิติลคอนเป็นไดอะแฟรมโดยมีขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 4 ค่าแสดงในรูปที่ 5.21

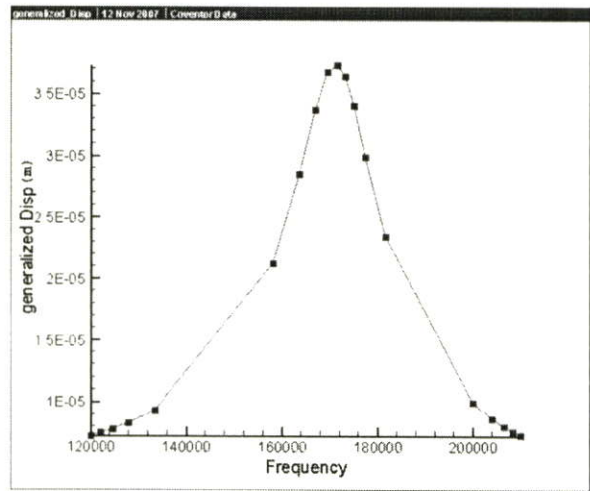
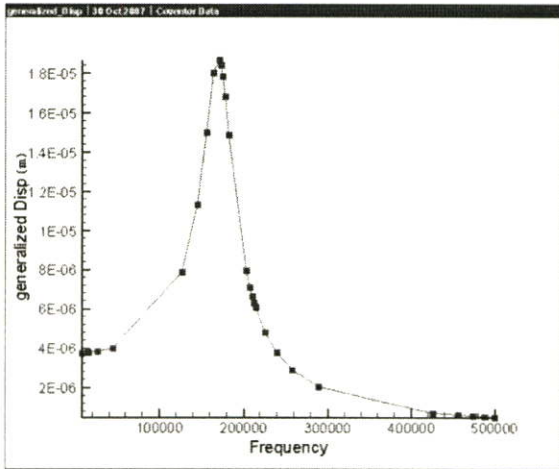
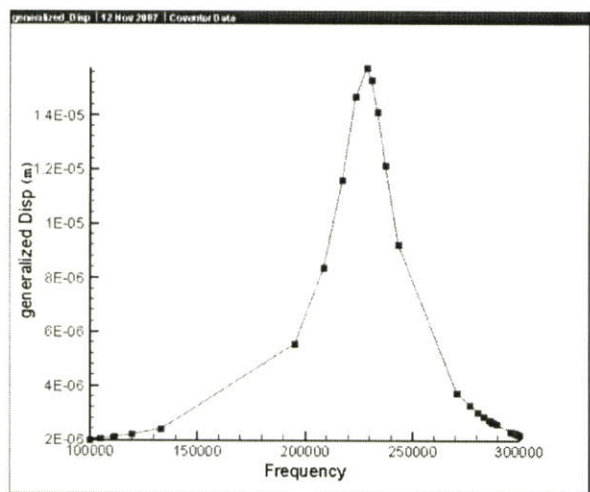
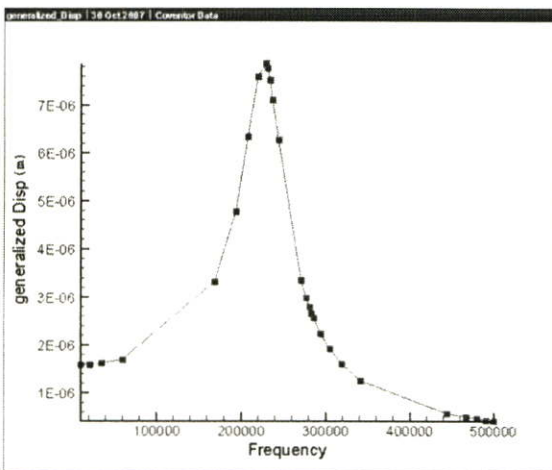


(ก) โพลีซิติลคอนไดอะแฟรมหนา $0.5 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่ที่โพลีซิติลคอนไดอะแฟรมขนาด $300 \times 300 \mu\text{m}^2$

(ข) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.8 μm (ค) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1 μm

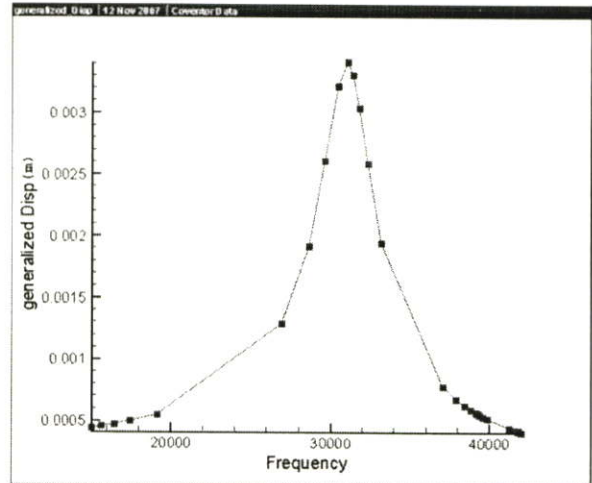
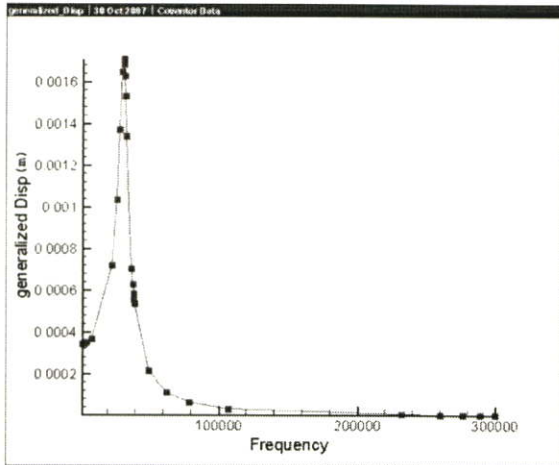
รูปที่ 5.21 (ต่อ)

(ง) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 μm (จ) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 2 μm

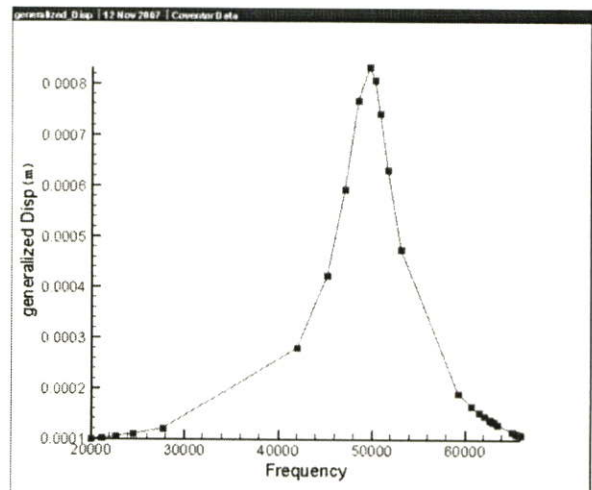
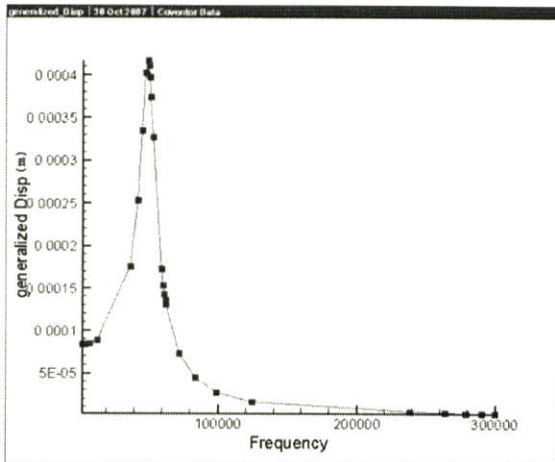
รูปที่ 5.21 (ต่อ)

5.4.4 โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$

ผลการตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมโดยมีขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ที่ความหนาทั้ง 4 ค่าแสดงในรูปที่ 5.22

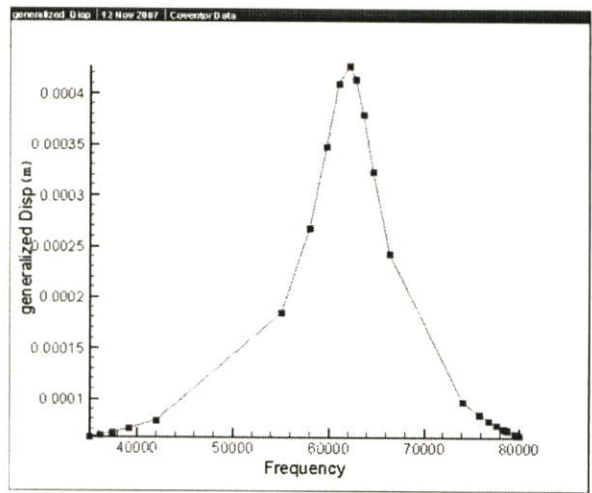
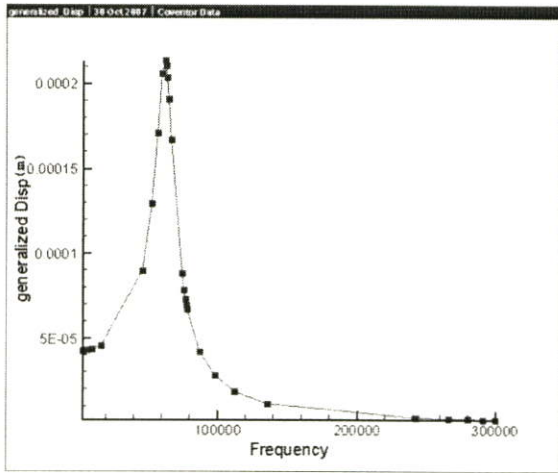


(ก) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา $0.5 \mu\text{m}$

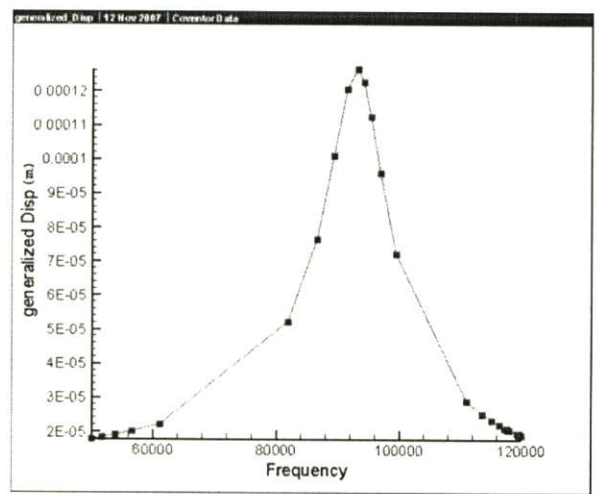
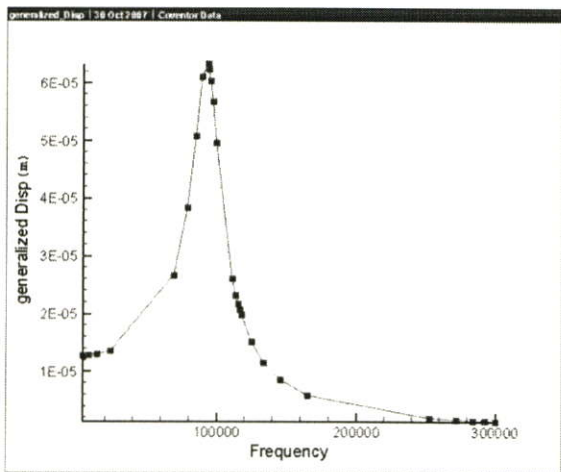


(ข) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา $0.8 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่ที่โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$

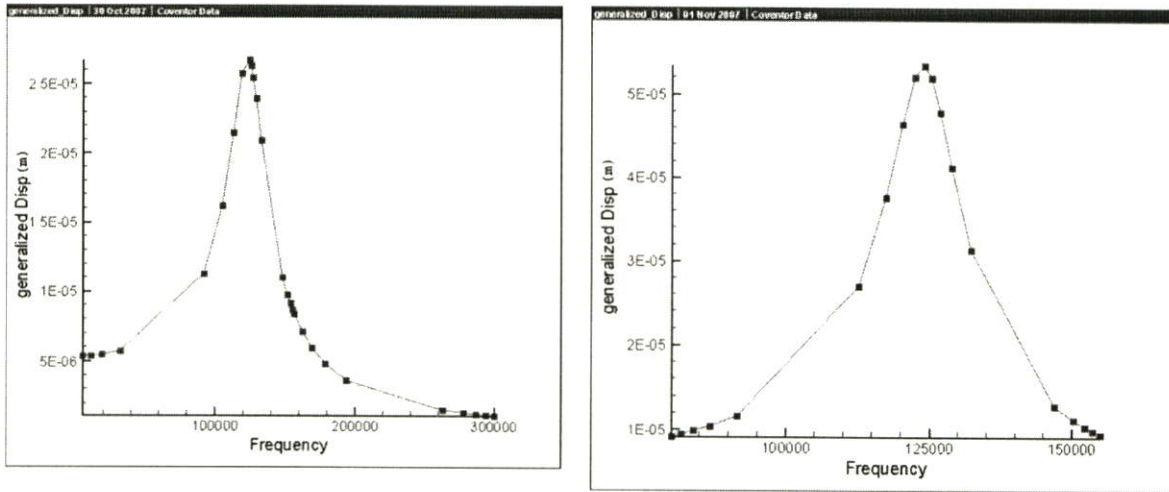


(ค) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1 μm



(ง) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1.5 μm

รูปที่ 5.22 (ต่อ)



(จ) โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 2 μm

รูปที่ 5.22 (ต่อ)

จากผลการหาค่าผลการตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟทุกเงื่อนไขสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 5.7 เพื่อแสดงให้เห็นช่วงความถี่ในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์แต่ละเงื่อนไขที่ชัดเจน

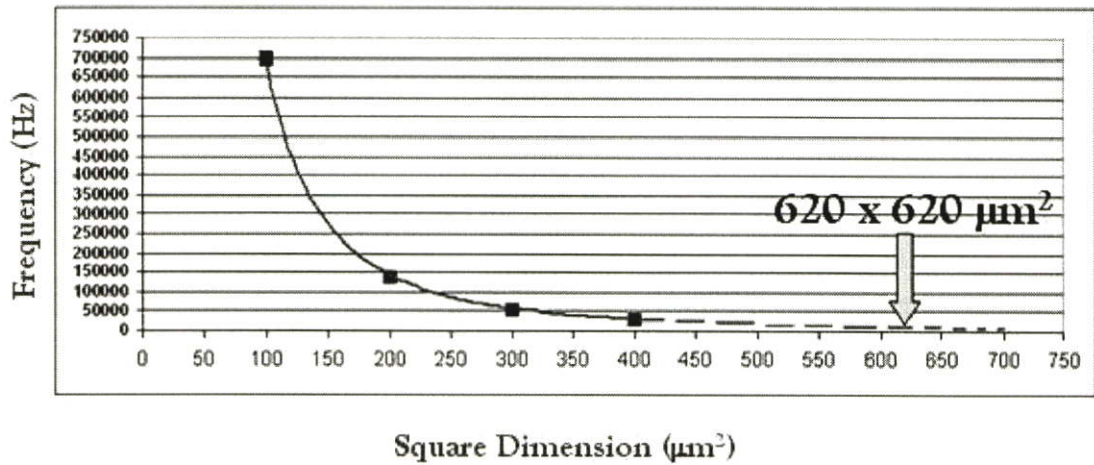
ตารางที่ 5.7 สรุปช่วงความถี่ในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟทุกเงื่อนไขการทดลอง

Dimension	Thickness	Frequency
$100 \times 100 \mu\text{m}^2$	0.5 μm	$\approx 0.7 \text{ MHz}$
	0.8 μm	$\approx 1 \text{ MHz}$
	1 μm	$\approx 1.4 \text{ MHz}$
	1.5 μm	$\approx 2.1 \text{ MHz}$
	2 μm	$\approx 2.79 \text{ MHz}$
$200 \times 200 \mu\text{m}^2$	0.5 μm	$\approx 0.14 \text{ MHz}$
	0.8 μm	$\approx 0.2 \text{ MHz}$
	1 μm	$\approx 0.27 \text{ MHz}$
	1.5 μm	$\approx 0.41 \text{ MHz}$
	2 μm	$\approx 0.55 \text{ MHz}$

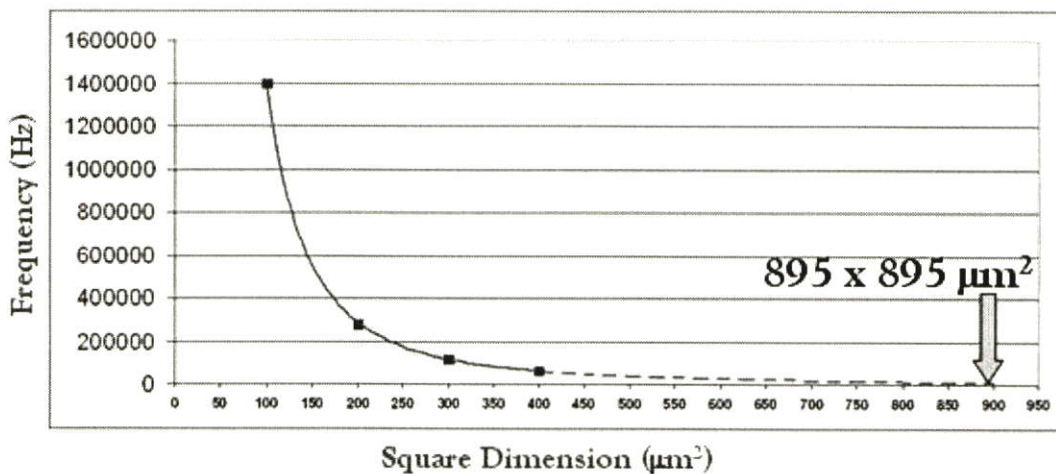
ตารางที่ 5.7(ต่อ)

Dimension	Thickness	Frequency
$300 \times 300 \mu\text{m}^2$	0.5 μm	$\approx 57 \text{ kHz}$
	0.8 μm	$\approx 91 \text{ kHz}$
	1 μm	$\approx 0.114 \text{ MHz}$
	1.5 μm	$\approx 0.172 \text{ MHz}$
	2 μm	$\approx 0.22 \text{ MHz}$
$400 \times 400 \mu\text{m}^2$	0.5 μm	$\approx 31 \text{ kHz}$
	0.8 μm	$\approx 49.7 \text{ kHz}$
	1 μm	$\approx 62.1 \text{ kHz}$
	1.5 μm	$\approx 93 \text{ kHz}$
	2 μm	$\approx 0.124 \text{ MHz}$

จากผลการทดลองหาค่าผลตอบสนองต่อความถี่จะพบว่าเมื่อขนาดของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมเพิ่มขึ้นที่ความหนาคงที่ค่าหนึ่ง ความถี่ที่ตอบสนองจะเพิ่มขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้นของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมแต่ยังไม่สามารถตอบสนองในช่วงความถี่เสียงได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาหาเงื่อนไขที่สามารถทำให้ทรานสดิวเซอร์สามารถตอบสนองในช่วงความถี่เสียง โดยที่เงื่อนไขที่ได้ทำการเลือกเพื่อหาแนวโน้มในการนำทรานสดิวเซอร์ไปประยุกต์ใช้เป็นไมโครโฟนนั้นคือ พิจารณาที่ความหนาที่สามารถสร้างได้ 2 ค่าคือ 0.5 และ 1 μm พบว่าที่ความหนา 0.5 μm จะต้องให้โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมมีพื้นที่ $620 \times 620 \mu\text{m}^2$ ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 5.23 (ก) และที่ความหนา 1 μm จะต้องให้โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมมีพื้นที่ $895 \times 895 \mu\text{m}^2$ แสดงดังในรูปที่ 5.23 (ข) จึงจะเหมาะสมต่อการตอบสนองความถี่เสียง



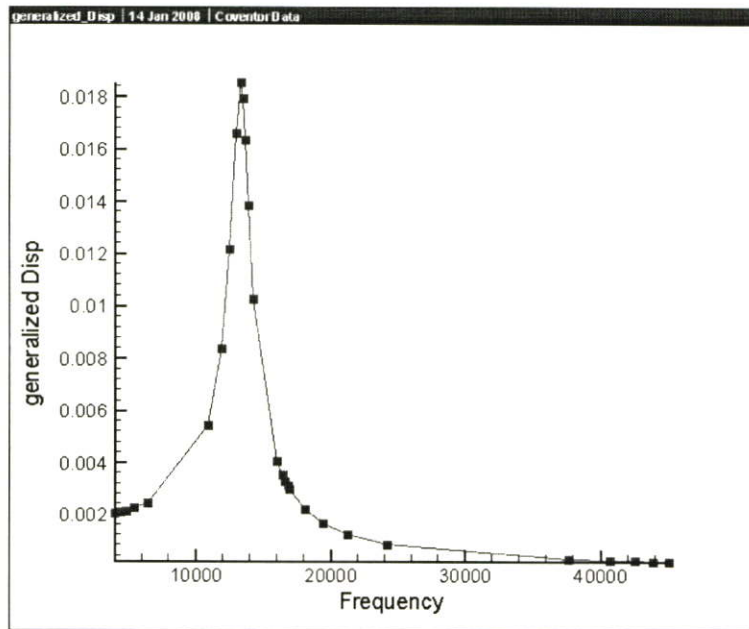
(ก) โพลีซิลิคอนไคอะเฟรมหนา 0.5 μm



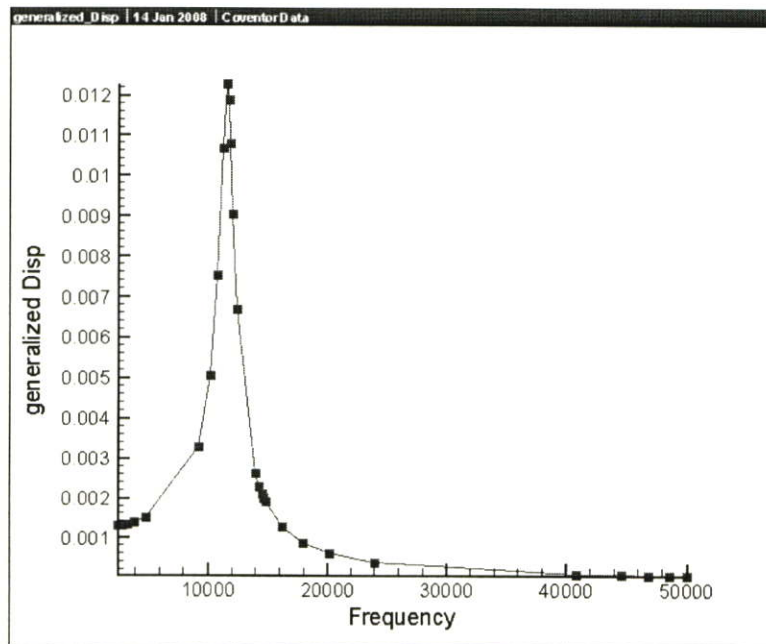
(ข) โพลีซิลิคอนไคอะเฟรมหนา 1 μm

รูปที่ 5.23 กราฟแนวโน้มพื้นที่ของโพลีซิลิคอนไคอะเฟรมที่สามารถตอบสนองต่อความถี่เสียง

หลังจากนั้นนำแนวโน้มที่ได้มาทดลองโดยใช้โปรแกรม CoventorWare™ เพื่อพิสูจน์ว่าพื้นที่ของไคอะเฟรมที่ความหนา 0.5 และ 1 μm ที่ได้นั้นสามารถตอบสนองความถี่ในช่วงเสียงได้จริง ซึ่งพบว่าแนวโน้มที่ได้เป็นจริงแสดงดังในรูปที่ 5.24 และ 5.25 ตามลำดับ โดยที่ความหนา 0.5 μm สามารถตอบสนองความถี่ที่ประมาณ 13 kHz และที่ความหนา 1 μm สามารถตอบสนองความถี่ที่ประมาณ 11 kHz



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่
ที่โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 0.5 μm



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement กับ ความถี่
ที่โพลีซิลิคอนไดอะแฟรมหนา 1 μm

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาการจำลองแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก โดยมีเงื่อนไขในการทดลองทั้งหมด 3 เงื่อนไข คือ ขนาดของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่กำหนดไว้มี 4 ค่าด้วยกัน ดังนี้ 100×100 , 200×200 , 300×300 และ $400 \times 400 \mu\text{m}^2$, ความหนาของโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมที่กำหนดไว้มี 5 ค่าดังนี้ 0.5, 0.8, 1, 1.5 และ $2 \mu\text{m}$ เงื่อนไขสุดท้าย ความดันซึ่งกำหนดไว้ที่ 2-20 mPa

จากเงื่อนไขทั้งหมดนี้มาทำการศึกษาได้นำมาวิเคราะห์หาช่วงตำแหน่งในการวางตัวด้านทาน ซึ่งลักษณะการวางตัวด้านทานนั้นมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการวางแบบขนานกับโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม และ ลักษณะการวางแบบตั้งฉากกับโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม โดยพิจารณาจากความเค้นที่เกิดขึ้นบนโพลีซิลิคอนไดอะแฟรม จากการทดลองหาช่วงตำแหน่งในการวางตัวด้านทานนี้ ทำให้ทราบความสัมพันธ์ที่ว่า เมื่อขนาดของไดอะแฟรมเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาคงที่ ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น, นำผลช่วงตำแหน่งการวางตัวด้านทานมาออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปโดยใช้โปรแกรม L-Edit และนำการออกแบบที่ได้มาหาค่าความไวในการตอบสนองและผลตอบสนองต่อความถี่ โดยใช้โปรแกรม CoventorWare™ พบว่าที่ไดอะแฟรม $400 \times 400 \times 0.5 \mu\text{m}^3$ จะมีค่าความไวในการตอบสนองและมีผลตอบสนองความถี่ที่ดีที่สุด ดังนี้คือ ความไวในการตอบสนองที่ลักษณะการวางตัวด้านทานแบบขนานจะอยู่ที่ประมาณ $1.31 \times 10^{-4}/\text{Pa}$, ที่ลักษณะการวางตัวด้านทานแบบตั้งฉากจะอยู่ที่ประมาณ $3 \times 10^{-5}/\text{Pa}$ และมีผลตอบสนองความถี่อยู่ในช่วงประมาณ 28kHz – 34kHz จะเห็นว่าการตอบสนองต่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปนี้ ยังไม่สามารถตอบสนองต่อความถี่ในช่วงความถี่เสียง แต่เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มจะพบว่าที่ความหนาของไดอะแฟรม $0.5 \mu\text{m}$ จะต้องมีพื้นที่ $620 \times 620 \mu\text{m}^2$ และที่ความหนา $1 \mu\text{m}$ จะต้องมีพื้นที่ $895 \times 895 \mu\text{m}^2$ จึงจะเหมาะสมต่อการตอบสนองความถี่เสียง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Micheal Quirk and Julian Serda. *Semiconductor Manufacturing Technology*: Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey .2001
- [2] Julian W. Gardner. *Microsensors, MEMS and Smart Devices*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2001
- [3] Wolf, S. and Tauber. *Silicon Processing For VLSI Vol. 1- Process Technology*. California: Lattice Press. 1986
- [4] Wolf, S. and Tauber. *Silicon Processing For VLSI Vol. 3: The Submicron MOSFET*. California: Lattice Press. 1995
- [5] W.G Pfann and P.N. Thurston. "Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Transverse and Shear Piezoresistance Effects." *J. Apply. Phys*, vol32, Oct 1996, pp.2008-2009.
- [6] S.M.Sze. *Semiconductor Sensor*. USA: John Willy& Sons, Inc. 1994.
- [7] Samuel K. Clark and Kensall D. Wise. "Pressure Sensitivity in Anisotropically Etched Thin-Diaphragm Pressure Sensors." *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, No.12, Dec 1979, pp.1887-1896
- [8] ชาญญะ ศักดิ์โสภณัฐ. "ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิคอนแบบเปียโซรีซิสทีฟบนไดอะแฟรมบาง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534
- [9] Duane Tandeske. *Pressure Sensor Selection And Application*. New York: Marcel Dekker Inc.1991
- [10] โรเบิร์ต เอฟ.ค็อฟลินและเฟรเดอริก เอฟ. คริสคอลล์. การใช้งานออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี. แปลโดยวิโรจน์ อัสวรงค์ และคณะ. กรุงเทพฯ: บริษัท เอช.เอ็น.กรุ๊ป จำกัด.2536
- [11] เจน สงสมพันธุ์. ระบบเสียงและการมิกซ์เสียง : สถาบันอิเล็กทรอนิกส์กรุงเทพ.2536
- [12] DESIGNER™ Reference Guide & Tutorials, MEMS & Microsystems Physical Design.
- [13] Liwei Lin, Huey-Chi Chu, and Yen-Wen Lu. " A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensor" *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.8, No.4, 1999, pp.514-522

[14] L-Edit™ Layout Editor Manual: Tanner Research Inc.

[15] K.N. Bhat “Silicon Micromachined Pressure Sensors” Journal of the Indian Institute of Science, Vol 87, No.1, Jan-Mar 2007.

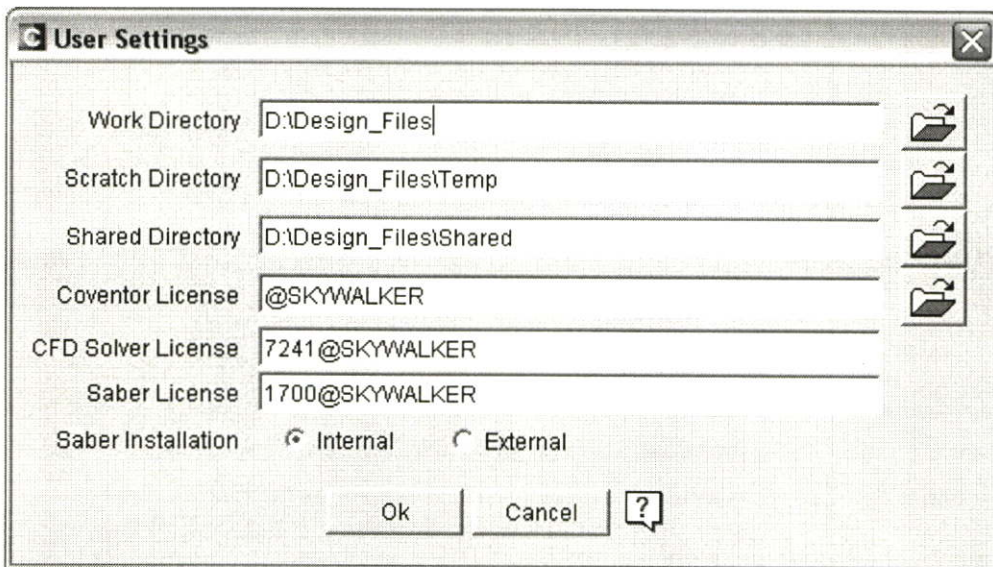
ภาคผนวก ก.

การตั้งค่าในโปรแกรม CoventorWare™

การตั้งค่าเริ่มต้น(Initialization)

โปรแกรมจะเริ่มต้นโดยการสร้างแหล่งข้อมูลของไฟล์ (Work directory) ให้โดยอัตโนมัติเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลต่างๆ ประกอบด้วย Temp directory และ Shred directory ซึ่ง Directory เหล่านี้ไม่จำเป็นต้องตั้งค่าอีกครั้ง โปรแกรมจะใช้ Directory นี้เป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังรูปที่ ก-1

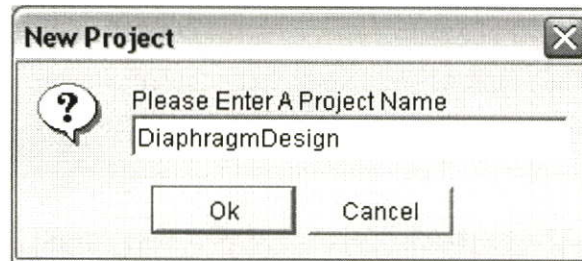
1. เปิดโปรแกรม CoventorWare ที่อยู่บนหน้าจอ(Desktop) หรือคลิกที่เมนู
Start > All Program > Coventor > CoventorWare2003 > CoventorWare2003
2. เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาแล้วจะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ ก-1
3. คลิกที่ปุ่ม OK



รูปที่ ก-1 การตั้งค่าต่างๆของ User Setting

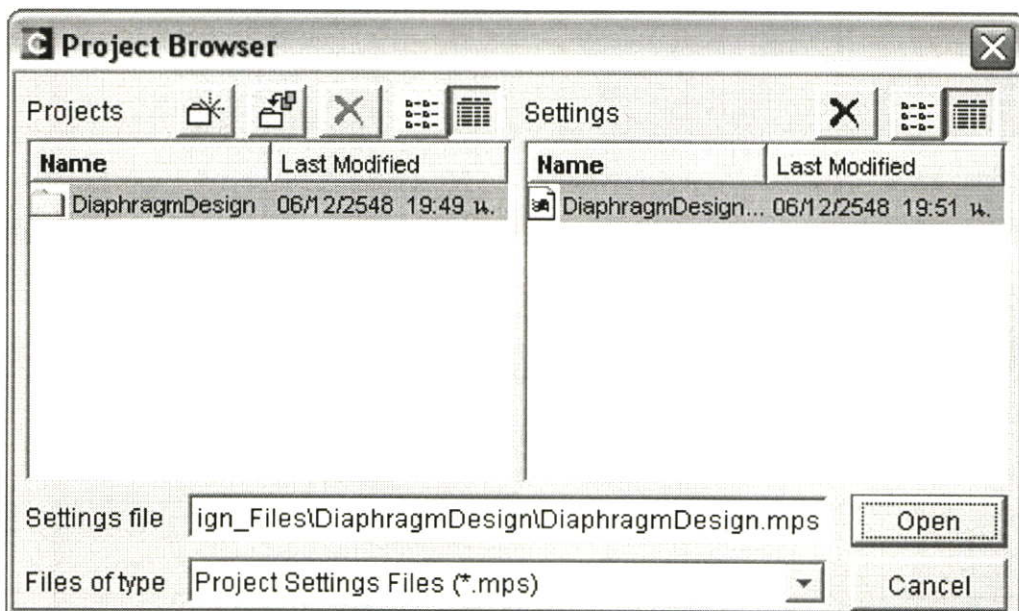
หลังจากที่ตั้งค่า User Setting แล้วจะแสดงหน้าต่าง Project Browser ดังรูปที่ ก-2 เพื่อสร้างโปรเจกต์ขึ้นมาใหม่ดังนี้

4. คลิกที่ไอคอน  เพื่อสร้างโปรเจกต์ใหม่จะขึ้นหน้าต่าง New Project
5. ใส่ชื่อ Diaphragm Design ในช่อง Please Enter A Project Name ดังรูปที่ ก-2





รูปที่ ก-2 New Project

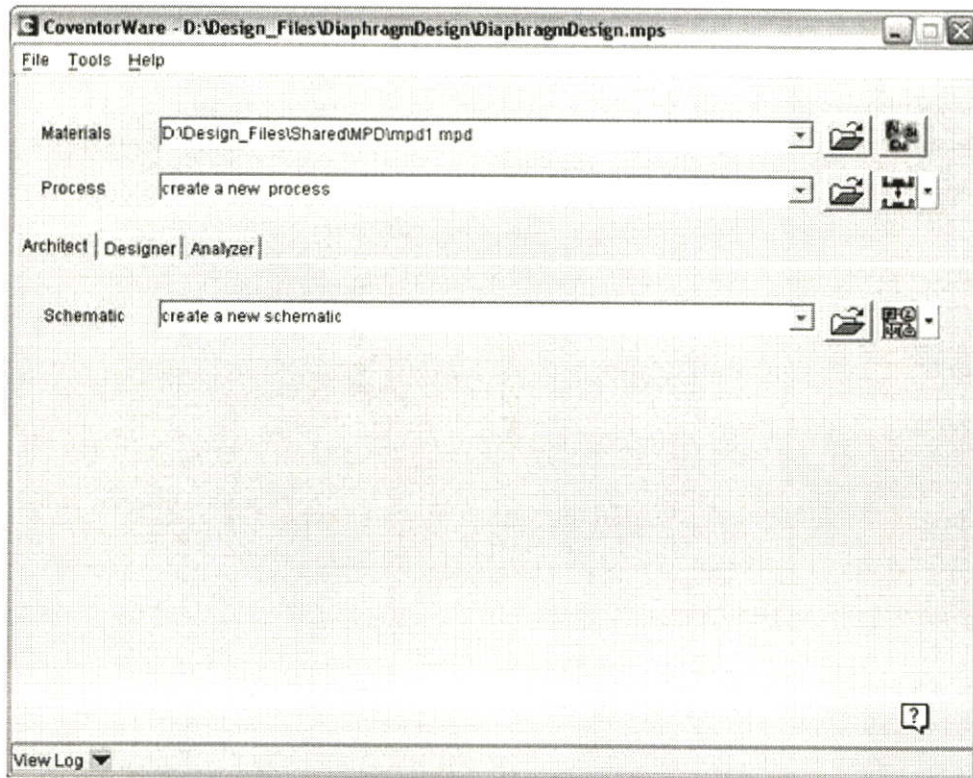
6. คลิกที่ปุ่ม  จะเป็นการสร้างโปรเจกต์เรียบร้อยแล้วดังรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 Project Browser

7. คลิกที่ปุ่ม  ได้ดังรูปที่ ก-4

Project Browser นั้นประกอบด้วยสองส่วนคือ Project เป็นส่วนที่แสดงชื่อของโปรเจกต์หรือไฟล์เดือรที่เก็บข้อมูลโปรเจกต์ ที่อยู่ใน Work Directory และ Setting เป็นส่วนที่แสดงไฟล์ของโปรเจกต์มีนามสกุลเป็น .mps ทางด้านซ้ายของหน้าต่าง โดย Project Browser นั้นสามารถที่จะนำเข้าโปรเจกต์จากโปรแกรม CoventorWare รุ่นก่อนได้ โดยคลิกที่ไอคอน Improve Project  และสามารถลบโปรเจกต์หรือไฟล์ต่างๆ ได้ด้วยการเลือกไฟล์ที่ต้องการลบแล้วคลิกที่ ไอคอน Delet 




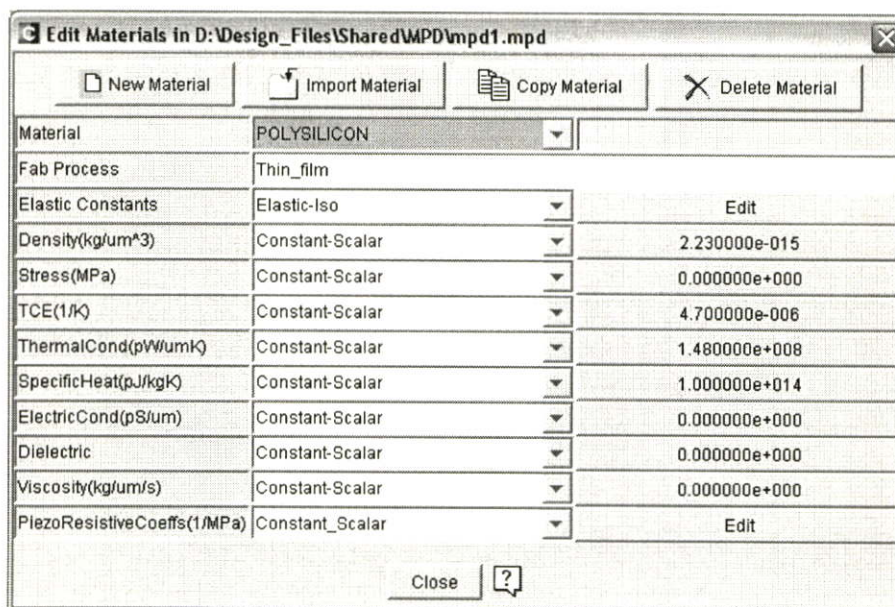
รูปที่ ก-4 Function Manager

CoventorWare™ Function Manager เป็นหน้าต่างโปรแกรมที่สำคัญเนื่องจากจะต้องใช้หน้าต่างนี้ในการทำงานต่างๆ เป็นส่วนใหญ่ซึ่งด้านบนจะประกอบด้วยช่อง Material เป็นส่วนที่กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ และช่อง Process เป็นส่วนที่กำหนดกระบวนการสร้างโมเดลซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป และด้านล่างจะมีแถบ 3 แถบซึ่งรายละเอียดดังนี้




1. Architect : เป็นส่วนที่ส่งงานไปให้ใช้
2. Designer : เป็นส่วนที่ใช้ในการออกแบบและสร้าง โมเดลสามมิติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หรือจำลองการทำงานของโมเดล
3. Analyzer : เป็นส่วนที่บรรจุโมดูลใช้ในการวิเคราะห์ต่างๆ ดังเช่น
 - 3.1 MemMech เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล
 - 3.2 MemElectro เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า
 - 3.3 CoSolveEm เพื่อใช้ในการวิเคราะห์

การตั้งค่าฐานข้อมูลคุณสมบัติวัสดุ(Material Properties Database Setup)

Material Properties Database เป็นฐานข้อมูลที่เก็บข้อมูลของคุณสมบัติวัสดุต่างๆที่ใช้ในการสร้างโมเดลซึ่งเปิดได้โดยการคลิกที่ไอคอน  ทางด้านบนของหน้าต่าง Function Manager การกำหนดคุณสมบัติวัสดุนั้นเป็นขั้นตอนแรกและเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการออกแบบหลังจากสร้างโปรเจกต์แล้วเพราะว่าข้อมูลที่อยู่ใน Material Properties Database นั้นจะใช้เป็นฐานข้อมูลของกระบวนการต่อจากนี้ถ้าหากกำหนดค่าผิดก็จะสามารถทำให้ผลการวิเคราะห์ออกมาผิดได้ด้วยเช่นกัน สามารถที่จะสร้างหรือแก้ไขวัสดุและคุณสมบัติต่างๆได้ ไฟล์ของ Material Properties Database นั้นจะมีนามสกุลเป็น .mpd(Material Properties Database) เมื่อสร้างโปรเจกต์โปรแกรมจะทำการสร้างไฟล์นี้ให้โดยอัตโนมัติ ดูจากหน้าต่างของ Function Manager นั้นจะมีแหล่งข้อมูลเป็น D:\Design_File\Shared\MPD\mpd1.mpd ซึ่งจะเป็นได้ว่าอยู่ในโฟลเดอร์ Shared ซึ่งเป็นโฟลเดอร์ที่ใช้ร่วมกันทั้ง Work Directory



รูปที่ ก-5 Edit Material ของ POLYSILICON

1. คลิกที่ไอคอน  เพื่อเปิดหน้าต่าง Edit Material ดังรูปที่ ก-4
2. คลิกที่ไอคอน  เลือก POLYSILICON ดังรูปที่ ก-4
3. ตรวจสอบค่าต่างของหน้าต่าง Edit Material กับตารางที่ ก-1 ว่าตรงกันหรือไม่
4. ถ้าค่าไม่ตรงกันให้แก้ไขโดยคลิกที่ปุ่ม  แล้วใส่ค่าต่างๆลงไป ที่ด้านบนของหน้าต่าง Edit Material นั้นจะเห็นปุ่ม 4 ปุ่มทำหน้าที่ดังนี้

	:	สร้างข้อมูลวัสดุขึ้นใหม่ในฐานข้อมูลเดิม
	:	นำเข้าข้อมูลวัสดุจากภายนอก
	:	คัดลอกข้อมูลวัสดุภายในฐานข้อมูลเดียวกัน
	:	ลบข้อมูลวัสดุออกจากฐานข้อมูล








5. คลิกที่ปุ่ม  เพื่อปิดหน้าต่าง Edit Material

ตารางที่ ก-1 Material Properties ที่ใช้ในโปรแกรม CoventorWare™

Property	Data Type	Sub prop	Aluminum(film)	Silicon	Unit
Elastic Constants	Elastic-Iso	E	7.70e+04	1.69e+05	Mpa
		Poisson	3.00e-01	3.00e-01	
Density	Constant-Scalar		2.30e-15	2.50e-15	Kg/um ³
Stress	Anlso	Sx	10	0	Mpa
		Sy	10	0	Mpa
		Sz	0	0	Mpa
TCE	Constant-Scalar		2.31e-05	2.5e-06	l/K
Thermal Cond	Constant-Scalar		2.40e+08	1.48e+08	pW/um*K
Specific Heat	Constant-Scalar		9.03e+14	7.12e+14	pJ/kg*K

สร้างกระบวนการสร้าง(Process Editor)

Process Editor เป็นขั้นตอนการจำลองกระบวนการสร้าง (Process) ในการสร้างโมเดลสามมิติ (3-D) ของอุปกรณ์ โดยมีวิธีการสร้างกระบวนการมีอยู่ด้วยกัน 2 กระบวนการคือ การปลูกชั้นฟิล์ม (Deposit) และ การกัด (Etch) เพื่อจำลองการสร้างให้เทียบเคียงได้กับกระบวนการสร้างจริงทางด้านบนของหน้าต่าง Process Editor นั้นจะมีเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการสร้างกระบวนการสร้างดังนี้

	Move Row Up	:	เลื่อน Step ที่เลือกไว้ขึ้นไปหนึ่ง Step
	Move Row Down	:	เลื่อน Step ที่เลือกไว้ลงมาหนึ่ง Step
	Add Deposit Step	:	สร้างกระบวนการปลูกชั้นฟิล์ม
	Add Etch Step	:	สร้างกระบวนการกัด
	Add Sacrificial Etch	:	สร้างกระบวนการกัดแบบ Sacrificial
	Enabling/Disabling	:	ใช้หรือไม่ใช้แถวที่เลือก
	Delete Row	:	ลบแถวที่เลือก

พารามิเตอร์ของ Process Editor ส่วนที่สามารถปรับแก้ได้มีดังนี้

1. ความหนาของวัสดุ (ในระหว่างการปลูกชั้นฟิล์ม)
2. ชนิดของการปลูกชั้นฟิล์ม (stacked, conformal, planer)
3. ขนาดของมุมที่กัด (เป็นขนาดความลาดของมุมที่ใช้ในกระบวนการกัด)

4. A mask perimeter offset

5. ลักษณะทางไฟฟ้าของมาร์ค (แบบบวกรหรือลบพิจารณาว่าเป็นพื้นที่สว่างหรือมืดที่ถูกกัด)

Step	Action	Type	Layer Name	Material	Thickne...	Color	Mask Name/ Polarity	Depth	Offset	Sidewall Angle	Comment
0	Base		Substrate	SILICON	4.0	blue	GND				
1	Etch	Front, Partial				green	Cavity -	1.4	0.0	-45.0	
2	Deposit	Planar	Sacrificial	OXIDE	0.0	cyan					
3	Deposit	Stacked	Nitride	SIN	0.2	yellow					
4	Etch	Front, By Depth				cyan	Cavity -	0.2	0.0	0.0	
5	Sacrifi...			OXIDE							
6	Deposit	Stacked	Polysilic...	POLYSILICON	1.5	red					

รูปที่ ก-6 Process Editor ของการสร้าง Diaphragm

โดยมีวิธีการสร้างขั้นตอนแต่ละขั้นตอนตามลำดับดังนี้

1. ที่หน้าต่าง Function Editor คลิกที่ เลือก create a new process
2. คลิกที่ไอคอน เพื่อเปิดหน้าต่าง Process Editor
3. สร้างกระบวนการกัด Step 1 โดยคลิกที่ไอคอน Etch
4. สร้างกระบวนการปลูกชั้นฟิล์ม Step 2 โดยคลิกที่ไอคอน Deposit
5. สร้างกระบวนการปลูกชั้นฟิล์ม Step 3 โดยคลิกที่ไอคอน Deposit
6. สร้างกระบวนการกัด Step 4 โดยคลิกที่ไอคอน Etch
7. สร้างกระบวนการกัดแบบ Sacrificial Step 5 โดยคลิกที่ไอคอน Sacrificial Etch
8. สร้างกระบวนการปลูกชั้นฟิล์ม Step 6 โดยคลิกที่ไอคอน Deposit
9. ตั้งค่าต่างๆ ดังรูปที่ 6ก
10. บันทึกกระบวนการที่สร้างขึ้น โดยคลิกที่ File > Save ตั้งชื่อเป็น Diaphragm.proc
11. ปิดหน้าต่าง Process Editor โดยคลิกที่ File > Exit

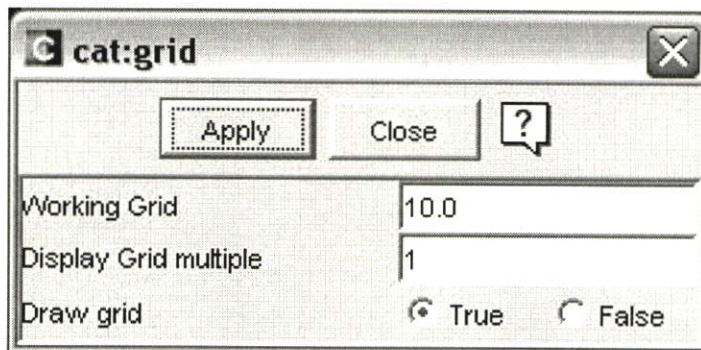
จากรูปจะเห็นได้ว่า Substrate เป็นฐานรองของโมเดลซึ่งเป็นสารซิลิคอนภายใน Substrate นั้นจะมีช่อง Cavity เป็นช่องที่เกิดจากกระบวนการกัดด้วยมาร์ค Cavity มีความลึก 1.4 um แล้วมีชั้น

Nitride ชั้นทับอีกชั้น โดยมีช่อง Cavity ขนาดเดียวกับช่อง Cavity ของ Substrate สูดท้ายด้านบนเป็นชั้นของ Diaphragm ซึ่งเป็นสาร Polysilicon ชั้นนี้จะได้รับความดันแล้วเกิดการโค้งงอเกิดขึ้น

เปิดดูและแก้ไขเลย์เอาต์ (Layout Viewing and Editing)

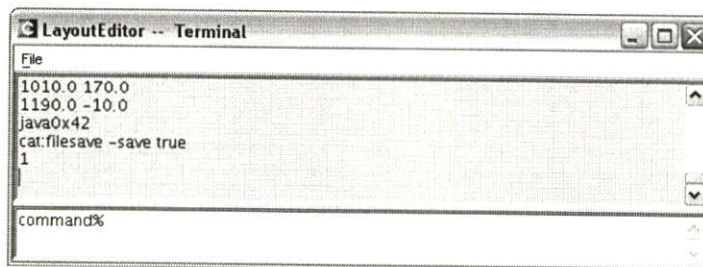
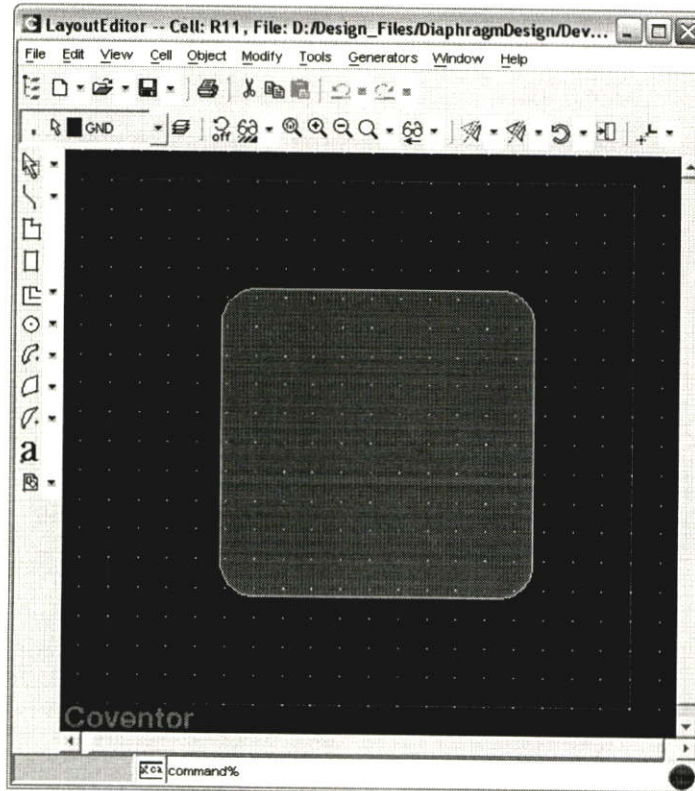
หลังจากที่กำหนดคุณสมบัติวัสดุ(Material properties) และสร้างกระบวนการสร้าง(Process) เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปก็เป็นการสร้างเลย์เอาต์สองมิติ(2D Layout) โดยใช้ Layout Editor เป็นเครื่องมือในการสร้าง(Create) ,นำเข้าไฟล์(Import) ,ดูภาพ(View) และแก้ไข(Edit)ข้อมูลต่างๆได้ โดยสามารถนำเข้าไฟล์ประเภท CIF และ GDSII จากโปรแกรมอื่นได้ โดยโปรแกรมจะแปลงไฟล์ประเภทดังกล่าวให้เป็นไฟล์ที่เข้ากันได้กับโปรแกรม CoventorWare โดยสามารถเปิด Layout Editor ได้จากเลือกแท็บ Designer ของหน้าต่าง Function Manager โดยเลือกไฟล์ที่มีนามสกุล .cat ซึ่งไฟล์ Cat นี้จะเก็บข้อมูลของ 2D layout ที่สร้างขึ้นหรือแก้ไขโดย Layot Editor ข้อมูลของเลย์เอาต์สามารถนำไปสร้างมาส์กสำหรับอุปกรณ์ และใช้เป็นแหล่งข้อมูลของการสร้างภาพสามมิติสำหรับการ Meshing และ Solving ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

1. คลิกที่แท็บ Designer คลิกที่ไอคอน  เลือกไฟล์ Diaphragm.cat
2. เปิด layout Editor โดยคลิกที่ไอคอน Layout edit  จะได้ดังรูปที่ ก-8
3. ตั้งค่าช่องว่างของตารางโดยคลิกที่ Tool > Option > Grid ใส่ค่าต่างๆ ดังรูปที่ ก-7

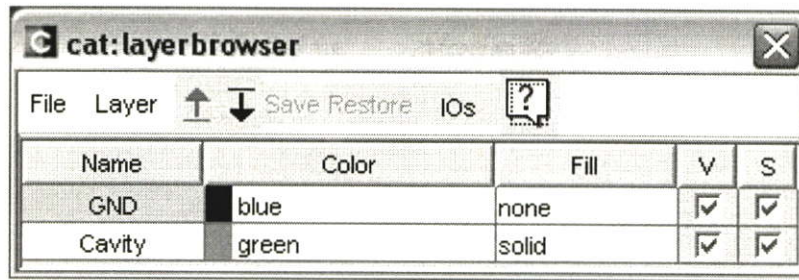


รูปที่ ก-7 การตั้งค่าของตาราง

4. คลิกที่ปุ่ม **Apply** เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่พื้นหลังของ Layout Editor
5. ปิดหน้าต่างโดยคลิกที่ปุ่ม **Close**
6. สามารถวัดอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยใช้ไม้บรรทัด Tool > Ruler แล้วคลิกลากที่ตำแหน่งแรกถึงตำแหน่งสุดท้ายที่จะวัดก็จะขึ้นระยะมีหน่วยเป็น um
7. คลิกที่ปุ่ม Refresh screen เพื่อลบไม้บรรทัดที่วัดจากขั้นตอนที่ 6
8. คลิกที่ไอคอน Layer Browser จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-8



รูปที่ ก-8 Layout Editor ของ Diaphragm



รูปที่ ก-9 Layer Browser

จากรูปด้านบนเป็นส่วนต่างๆใน Layer Browser ที่แสดงลักษณะต่างๆดังต่อไปนี้

- Name – แสดงชื่อของชั้นมาร์ค (Mask layer)
- Color – แสดงและควบคุมสีของเลเยอร์
- Fill – แสดงและควบคุม รูปแบบของเลเยอร์ (Solid,Dots,Hatched,เป็นต้น)
- V – ควบคุมให้เลเยอร์นั้นสามารถมองเห็นได้หรือไม่
- S – ควบคุมให้เลเยอร์นั้นสามารถเลือกได้หรือไม่(สำหรับการแก้ไข)

สามารถซ่อนและแสดงเลเยอร์ได้โดยเช็คที่ช่อง V และสามารถให้เลเยอร์นั้นสามารถเลือกได้หรือไม่โดยเช็คที่ช่อง S โดยสามารถเปลี่ยนสีได้หรือเปลี่ยนชนิดของ Fill ได้

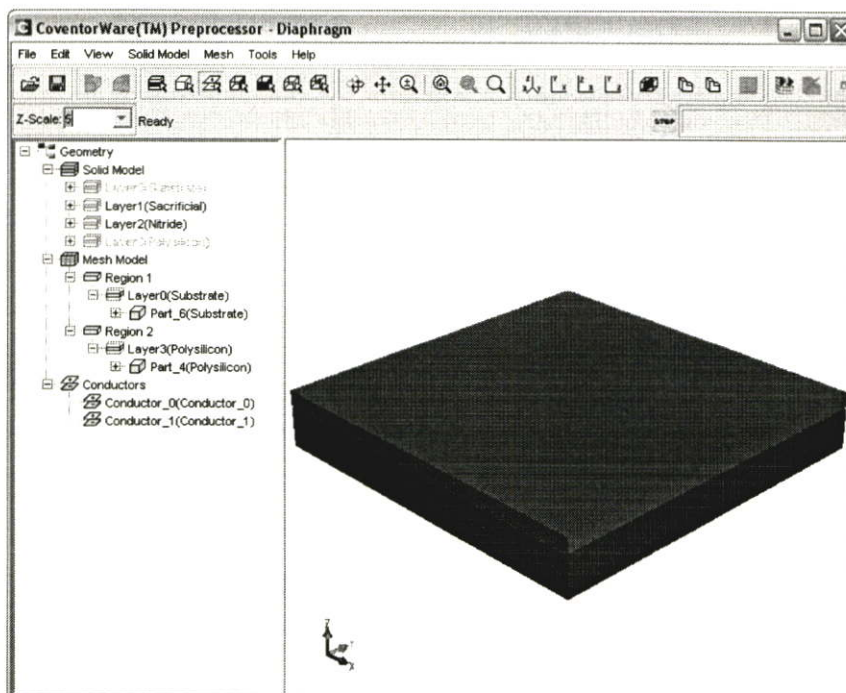
9. เลือกที่ File > Close เพื่อปิดหน้าต่าง
10. ที่หน้าต่าง Layout Editor บันทึกได้โดยเลือกที่ File > Save
11. เลือกที่ File > Exit

สร้าง Solid Model (Building the Solid Model)

จากไฟล์โปรเซสและ เลย์เอาท์ที่สร้างเรียบร้อยแล้วเป็นข้อมูลในการสร้างโมเดลสามมิติ โดยสร้าง Solid Model ได้จากแท็บ Designer คลิกที่ช่อง Model\Mesh เลือก create new model แล้วคลิกที่ไอคอน Start Preprocessor ซึ่งเป็นการเริ่มกระบวนการสร้างโมเดลสามมิติ เมื่อโปรแกรมสร้างเรียบร้อยแล้วหน้าต่าง Preprocessor จะเปิดโดยอัตโนมัติ

1. คลิกที่ไอคอน เลือก Create new model
2. คลิกที่ไอคอน Preprocessor เพื่อสร้าง Solid Model
3. จะขึ้นหน้าต่างให้ใส่ชื่อว่า Diaphragm
4. รอจนกระทั่งโปรแกรมสร้างโมเดลเสร็จ หน้าต่าง Preprocessor จะเปิดโดยอัตโนมัติ

5. คลิกที่ไอคอน  ของ Z-Scale เลือกเป็น 5 เพื่อปรับขนาดแนวแกน Z



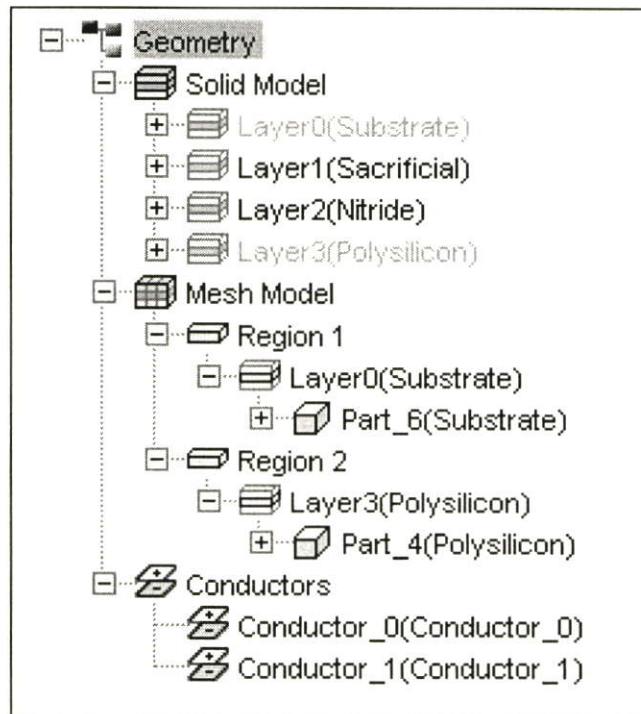
รูปที่ ก-10 Preprocessor Rendering ของ Diaphragm

จากรูปที่ ก-10 จะเห็นได้ว่า Layer1 (Sacrificial) จะถูกซ่อนอัตโนมัติเนื่องจากขั้นตอนกระบวนการสร้าง (Process) นั้น Step 5 ใช้วิธีการกัดแบบ Sacrificial ส่วนนี้จะหายไปจากโมเดล

Naming Entities

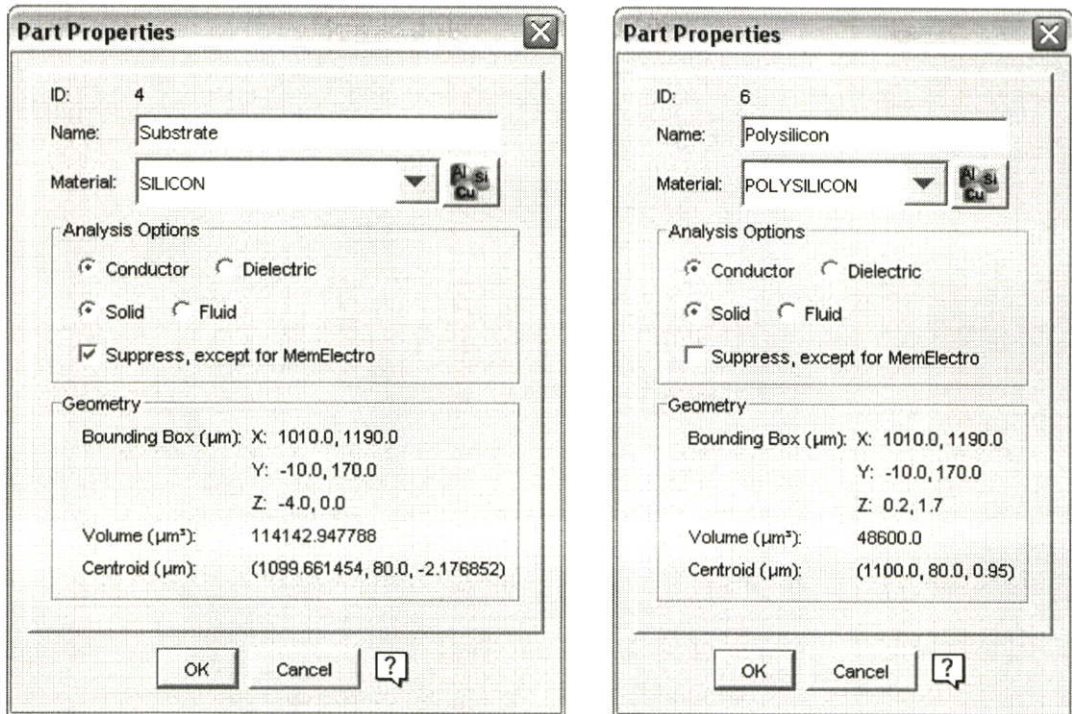
ขั้นตอนต่อไปในการออกแบบคือเพิ่มเลเยอร์ที่ต้องการลงไป Mesh Model และสมมุติคุณสมบัติทางไฟฟ้าพร้อมทั้งตั้งชื่อให้กับวัสดุ การตั้งชื่อนั้นจะต้องตั้งก่อนที่จะมีการ Mesh เพราะชื่อที่ถูกตั้งนั้นจะถูกบรรจุไว้ใน Solid Model เพื่อใช้ในการ Simulation ถ้าต้องการเปลี่ยนชื่อหลังจากเปลี่ยนชื่อแล้วจะต้อง Mesh ใหม่อีกครั้งเพื่อเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าที่อยู่ใน Solid Model

1. ที่ส่วน Geometry คลิกที่ชั้น Substrate ค้างไว้แล้วเลือกชั้น Polysilicon
2. คลิกขวาเลือก Add to Mesh Model จะได้ดังรูปที่ ก-11






รูปที่ ก-11 Mesh Model

3. คลิกขวาที่ Layer0 (Substrate) เลือก Properties เปลี่ยนชื่อ Name เป็น Substrate
ตั้งค่า Analysis Option ดังนี้
 - Conductor
 - Solid
 - Suppress, except for MemElectro
4. คลิกขวาที่ Layer1 (Nitride) เลือก Properties เปลี่ยนชื่อ Name เป็น Polysilicon
ตั้งค่า Analysis Option ดังนี้
 - Conductor
 - Solid
5. ตั้งค่าต่างๆ ดังรูปที่ ก-12



รูปที่ ก-12 Properties ของ Substrate

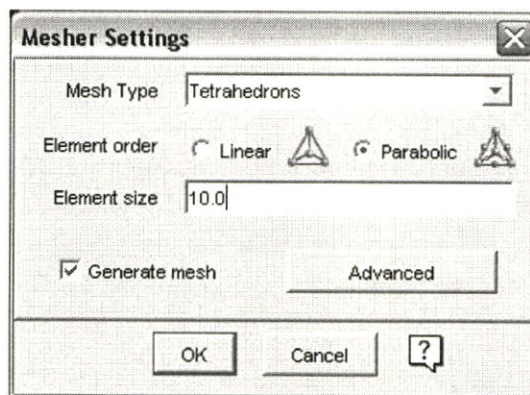
6. คลิกที่ไอคอน Face Selection Mode  เพื่อเลือกพื้นผิว
7. คลิกขวาที่ด้านบนของชั้น Diaphragm เลือก Set Name ตั้งชื่อเป็น Top
8. คลิกขวาที่ด้านบนของชั้น Diaphragm เลือก Hide Selection เพื่อซ่อนพื้นผิวชื่อ Top
9. คลิกขวาที่ด้านล่างของชั้น Diaphragm เลือก Set Name ตั้งชื่อเป็น Bottom
10. คลิกที่ไอคอน Layer Selection Mode  เพื่อเลือกชั้น Layer
11. คลิกขวาที่ชั้น Diaphragm เลือก Hide Selection เพื่อซ่อนชั้น Diaphragm
12. คลิกที่ไอคอน Face Selection Mode  คลิกขวาที่ขอบของ Substrate ตั้งชื่อเป็น Anchor
13. คลิกที่ Conductor_0 คลิกขวาเลือก Set Name ตั้งชื่อเป็น Diaphragm
14. คลิกที่ Conductor_1 คลิกขวาเลือก Set Name ตั้งชื่อเป็น Substrate

ที่หน้าต่าง Parts Properties จะมีไอคอน Material Editors เพื่อที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้หรือเปลี่ยนแปลงวัสดุก็ได้จากหน้าต่างนี้ ค่าที่เปลี่ยนแปลงจะไม่ได้ถูกเขียนลงในไฟล์ mpd แต่จะเขียนลงไปในฐานะข้อมูลของโปรเจกต์ที่เราทำงานอยู่เท่านั้น ซึ่งจะไม่เกี่ยวข้องกับโปรเจกต์อื่น

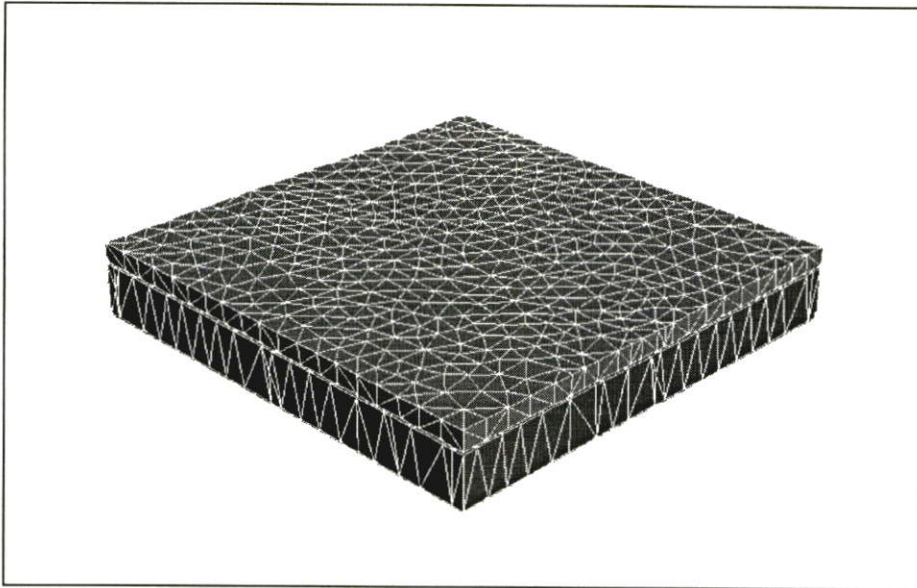
การสร้างตาข่าย (Meshing)

ขั้นตอนต่อไปของการออกแบบคือกระบวนการสร้างตาข่ายหรือ Meshing ซึ่งโครงสร้างของ Mesh Model ที่อยู่ในหน้าต่าง Geometry จะสามารถสร้างก้อนของ Finite Element ได้เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการ Solve ของ Finite element analysis ซึ่งสามารถเลือกชนิดของการ Mesh ได้หลายวิธีข้อมูลต่างๆที่เกิดจากการสร้าง Mesh นั้นจะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูลของโปรแกรมเพื่อใช้ในการ Solver Simulation ในตัวอย่างจะสร้าง Mesh ของ Diaphragm และ Substrate มีขั้นตอนดังนี้

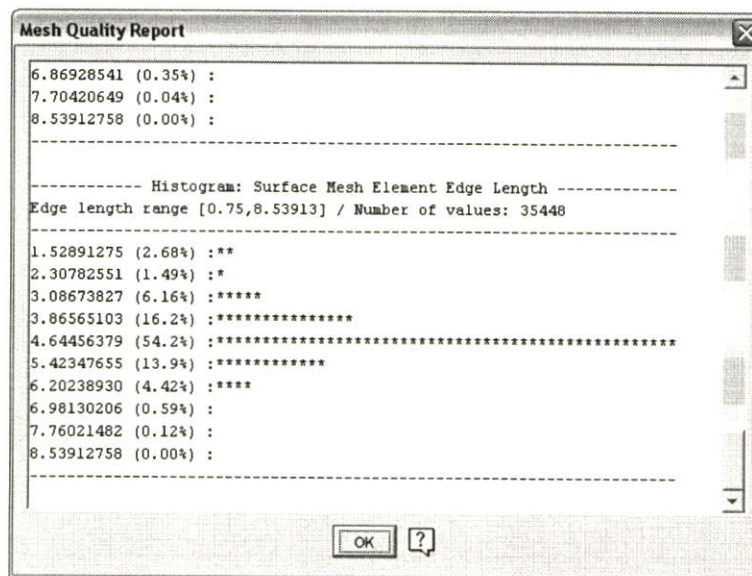
1. ที่หน้าต่าง Geometry คลิกเลือก Region1
2. คลิกขวาแล้วเลือก Mesher Setting จะปรากฏหน้าต่าง Mesher Setting ดังรูปที่ ก-13
3. ที่หน้าต่าง Mesher Setting เลือก Mesh Type เป็น Tetrahedrons
4. เลือก Element order เป็น Parabolic
5. ใส่ค่า Element size เป็น 10.0
6. คลิกที่ปุ่ม OK เพื่อปิดหน้าต่าง Mesher Setting
7. คลิกที่ไอคอน Generate Mesh เพื่อสร้าง Mesh รอสักครู่
8. จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-14
9. ทางด้านบนหน้าต่าง Preprocessor คลิกเลือก Mesh > Mesh Quality
10. จะปรากฏหน้าต่าง Mesh Quality Report เลื่อนดูรายละเอียดของการ Mesh
11. คลิกที่ปุ่ม OK เพื่อปิดหน้าจอ Mesh Quality Report
12. คลิกเลือก File > Save เพื่อบันทึกข้อมูล Mesh
13. คลิกเลือก File > Exit เพื่อออกจาก Preprocessor



รูปที่ ก-13 การตั้งค่า Mesher Setting



รูปที่ ก-14 โมเดลที่เกิดขึ้นหลังจากการ Mesh เสร็จแล้ว

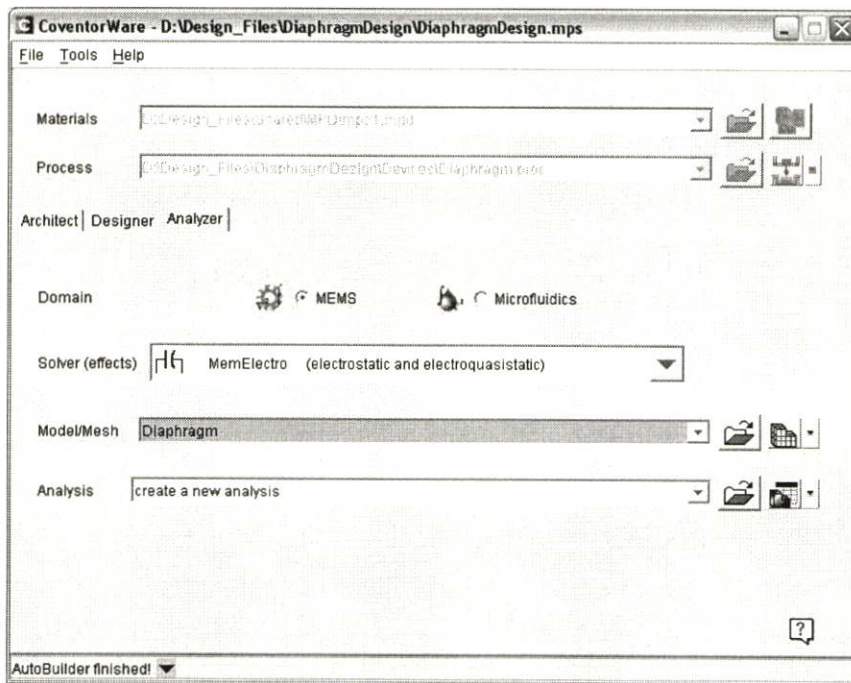


รูปที่ ก-15 Mesh Quality Report

การใช้เครื่องมือ MemElectro

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาทาง Electrostatic โดยใช้วิธีการคำนวณหาประจุ (charge) และความจุ (Capacitance) ที่เชื่อมอยู่ระหว่าง Diaphragm และ Substrate ซึ่งเป็นส่วนประกอบของโมเดลที่สร้างขึ้น MemElectro ใช้วิธีการ Boundary Element Method (BEM) เพื่อใช้ในการคำนวณหาประจุที่อยู่บนพื้นผิวแต่ละส่วนและแสดงให้เห็นถึง Final solution กับการคำนวณหาการกระจายของประจุของส่วนต่างๆในโมเดล มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกแถบเครื่องมือการวิเคราะห์โดยการคลิกที่แถบ Analyzer อยู่ด้านล่างของช่อง Process บนหน้าต่าง Function Manager
2. กำหนดการวิเคราะห์เชิงกลโดยคลิกเลือก MEMS จากช่อง Domain
3. คลิกเลือก MemElectro จากช่อง Solver(effects)
4. คลิกเลือก Diaphragm จากช่อง Model/Mesh
5. ในช่อง Analysis คลิกเลือก Create a new analysis
6. คลิกที่ไอคอน Solver Setup จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-17

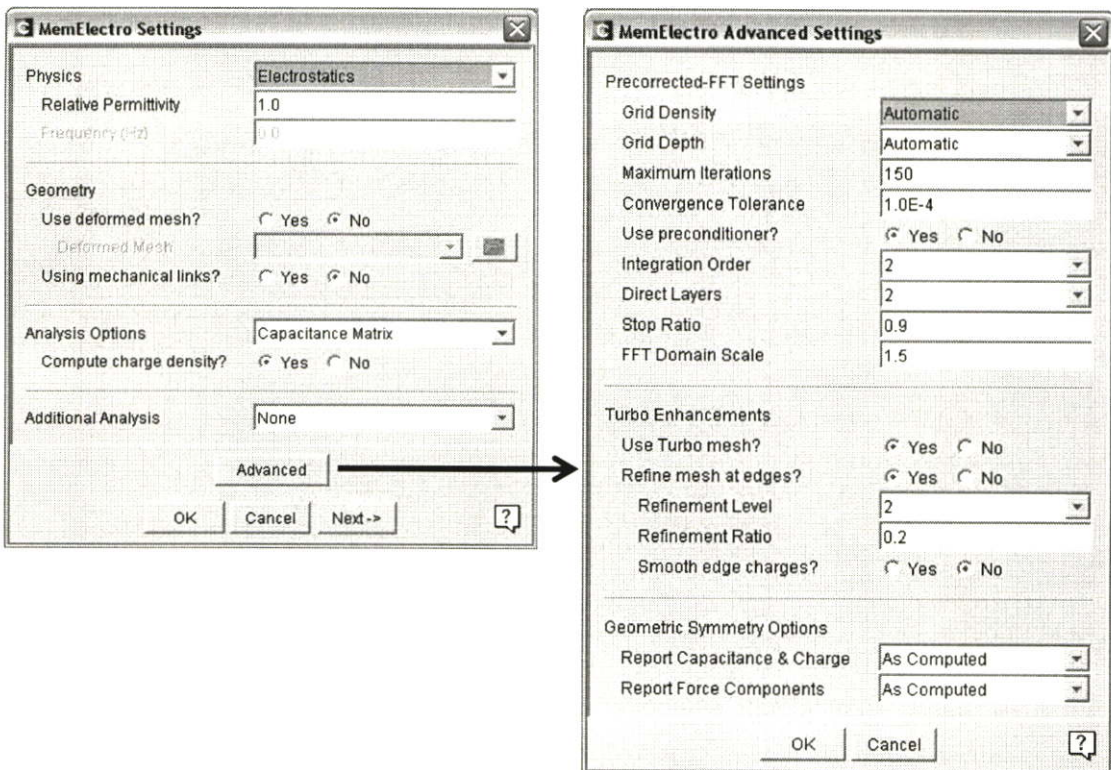


รูปที่ ก-16 การเลือกค่าของการคำนวณแบบ MemElectro

การตั้งค่า MemElectro Setting Windows

ที่หน้าต่าง Setting Windows เป็นการตั้งค่าเพื่อใช้ในการรัน Electrostatic Solver หน้าต่างนี้จะมีค่าเริ่มต้นไว้ให้แล้วหลังจากการคลิกไอคอน Solver Setup ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมของปัญหาที่เราสนใจ อีกทั้งยังสามารถตั้งค่าในโหมด Advance ได้ในหน้าต่าง Advanced Setting สำหรับปัญหาที่ซับซ้อน โดยมีวิธีการดังนี้

1. ในหน้าต่าง MemElectro Setting เป็นค่าตั้งต้นของโปรแกรม
2. คลิกที่ปุ่ม Advance จะปรากฏหน้าต่าง Advanced Setting
3. คลิกที่ปุ่ม OK ปิดหน้าต่าง
4. คลิกที่ปุ่ม Next >



รูปที่ ก-17 การตั้งค่าของ MemElectro Setting และ MemElectro Advanced Setting

การตั้งค่า MemElectro BCs

ที่หน้าต่าง MemElectro BCs เป็นการตั้งค่าของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของการ Solver ด้วยโมดูล MemElectro ซึ่งสามารถตั้งค่าหลักได้ 3 ส่วนดังนี้

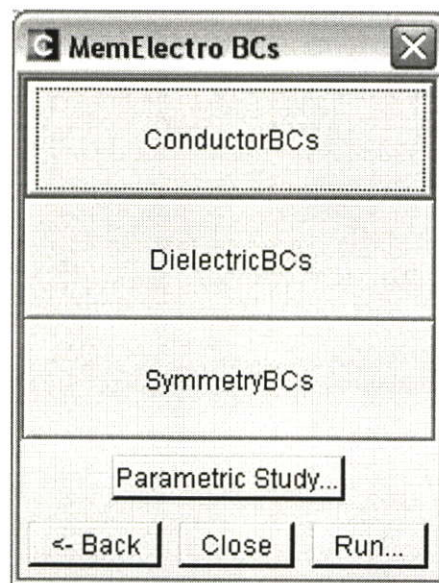
ConductorBCs

DielectricBCs

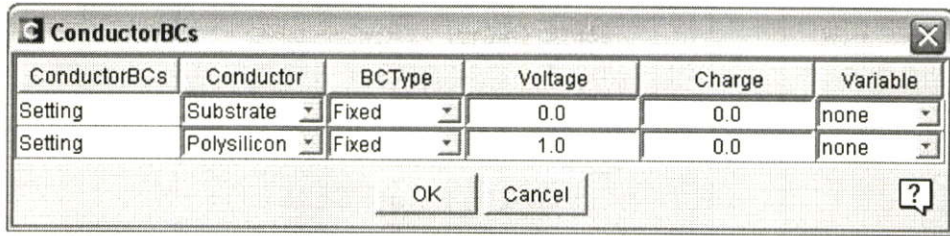
SymmetryBCs

อีกทั้งยังสามารถตั้งค่า Parametric Study เพื่อใช้ในการศึกษา Parametric บางตัวได้อีกด้วยซึ่งจะกล่าวในบทต่อไปโดยมีวิธีการดังนี้

1. บนหน้าต่าง MemElectro BCs
2. คลิกที่ปุ่ม ConductorBCs จะปรากฏหน้าต่าง ConductorBCs ดังรูปที่ 19ก
3. แก้ไขค่าของ Voltage ของ Diaphragm เป็น 1.0 และของ Substrate เป็น 0.0
4. คลิกที่ปุ่ม OK ปิดหน้าต่าง ConductorBCs
5. ที่หน้าต่าง MemElectro BCs คลิกที่ปุ่ม Run
6. จะปรากฏหน้าต่าง Save Analysis As ใส่ชื่อเป็น Electro_run1
7. คลิกปุ่ม OK จะปรากฏหน้าต่าง Conform
8. กดปุ่ม Yes เพื่อยืนยันการบันทึก แล้วรอดักครู



รูปที่ ก-18 หน้าต่าง MemElectro BCs



รูปที่ ก-19 การตั้งค่า ConductorBCs

การดูผลของ Electrostatic solution

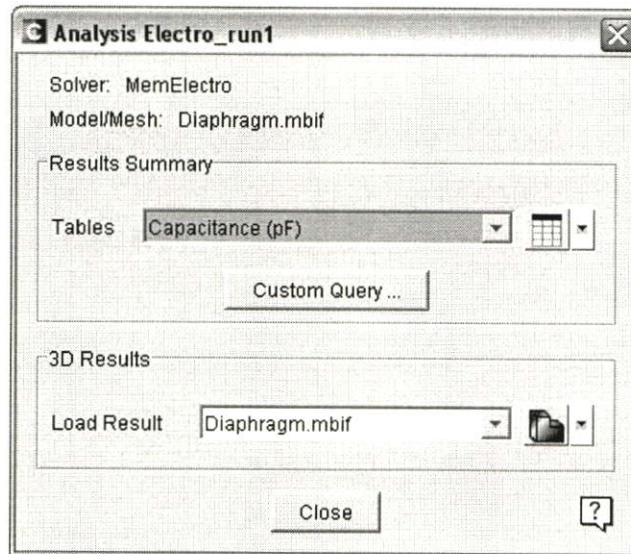
หลังจากกดปุ่ม Run แล้วรอสักครู่แล้วจะปรากฏหน้าต่าง Analysis Result ดังรูปที่ ก-20 ซึ่งเป็นหน้าต่างที่แสดงผลของการวิเคราะห์ Diaphragm โดยจะแสดงผลเป็น 2 ส่วนคือ

Result Summary : เป็นการดูผลที่เป็นตารางเมื่อคลิกที่ M จะมีค่าให้เลือกคือ

Capacitance

ElectroBCs

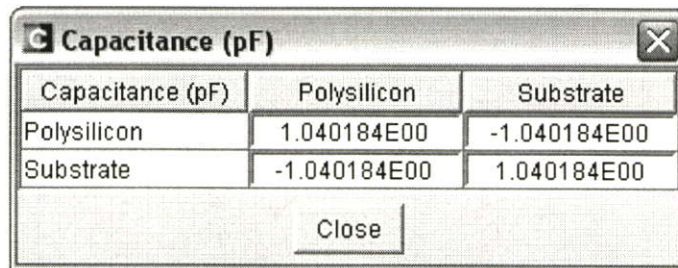
3D Result : เป็นการดูผลที่เป็นภาพสามมิติ



รูปที่ ก-20 Analysis Results ของ Electro_run1

การดูผลแบบตาราง มีวิธีการดังนี้

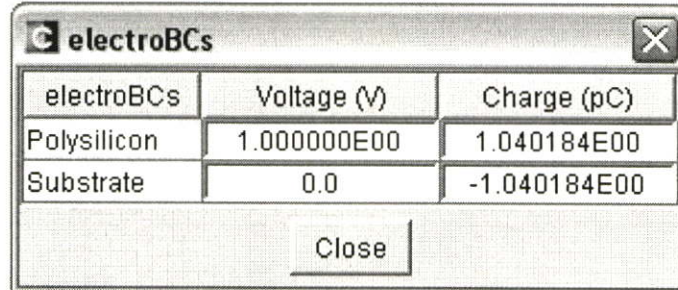
1. ที่หน้าต่าง Analysis Result ที่ช่อง Table ของ Results Summary
2. เลือก Capacitance(pF)
3. คลิกที่ไอคอน View Table ปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-21
4. กดปุ่ม Close เพื่อปิดหน้าต่าง
5. เลือก ElectroBCs
6. คลิกที่ไอคอน View Table ปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-22
7. กดปุ่ม Close เพื่อปิดหน้าต่าง



Capacitance (pF)	Polysilicon	Substrate
Polysilicon	1.040184E00	-1.040184E00
Substrate	-1.040184E00	1.040184E00

Close

รูปที่ ก-21 หน้าต่างผลของการคำนวณ Capacitance(pF)



electroBCs	Voltage (V)	Charge (pC)
Polysilicon	1.000000E00	1.040184E00
Substrate	0.0	-1.040184E00

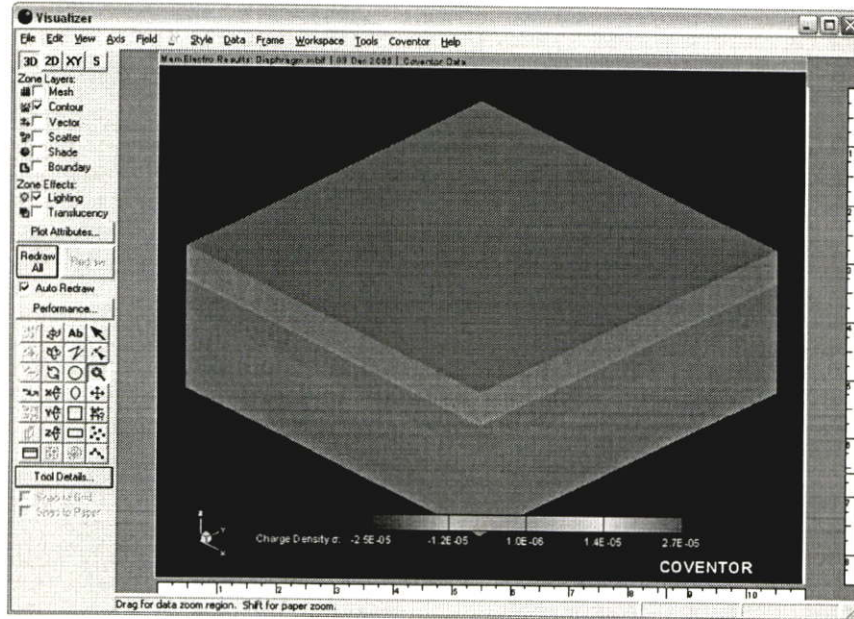
Close

รูปที่ ก-22 หน้าต่างผลของการคำนวณ ElectroBCs

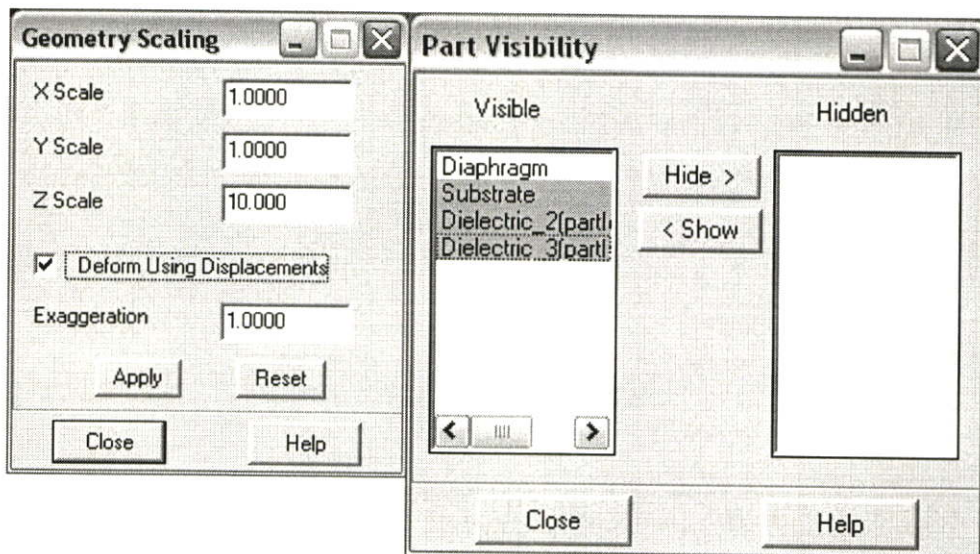
การดูผลแบบสามมิติ มีวิธีการดังนี้

1. คลิกที่ไอคอน View 3D Result จะปรากฏหน้าต่าง Visualizer
2. คลิกเลือกที่ Coventor > Geometry Scaling จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 24ก
3. เปลี่ยนค่าในช่อง Z Scale เป็น 10
4. เช็คถูกที่ช่อง Deform Using Displacements

5. คลิกที่ปุ่ม Apply ดูการเปลี่ยนแปลงที่รูปภาพ
6. คลิกที่ปุ่ม Close ปิดหน้าต่าง ได้ดังรูปที่ ก-23

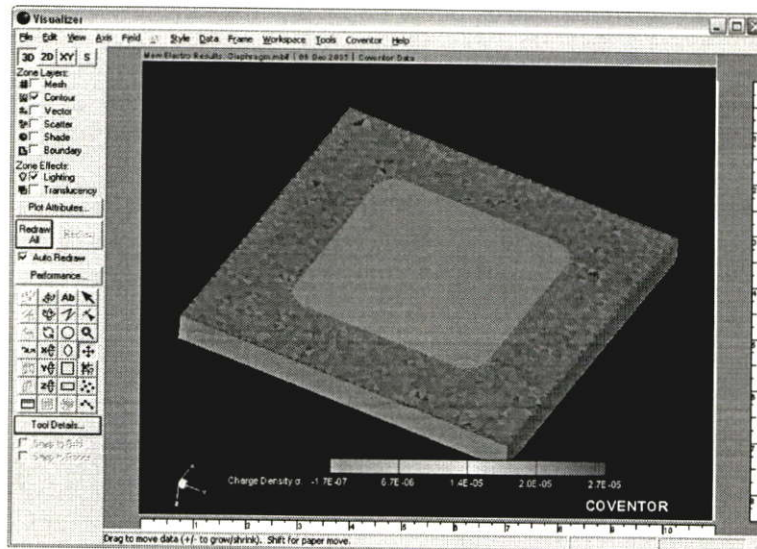


รูปที่ ก-23 การดูผลแบบ โมเดลสมมิติ Visualizes Windows



รูปที่ ก-24 การตั้งค่า Geometry Scaling

7. คลิกเลือกที่ Coventor > Part Visibility จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-24
8. คลิกที่ Substrate ในช่อง Visible กดปุ่ม Ctrl บนคีย์บอร์ดค้างไว้ แล้วคลิกที่ Dielectric_3 เพื่อเลือกตั้งแต่ Substrate จนถึง Dielectric_3
9. คลิกที่ปุ่ม Hide > เพื่อซ่อนชั้นที่เลือกไว้
10. คลิกที่ไอคอน Rollerball rotation แล้วหมุนคู่มือด้านล่างของ Diaphragm ดังรูปที่ ก-25
11. คลิกที่ปุ่ม Close ปิดหน้าต่าง
12. ที่เมนู Visualizer คลิกเลือกที่ File > Exit เพื่อปิดหน้าต่าง



รูปที่ ก-25 การคู่มือด้านล่างของ Diaphragm

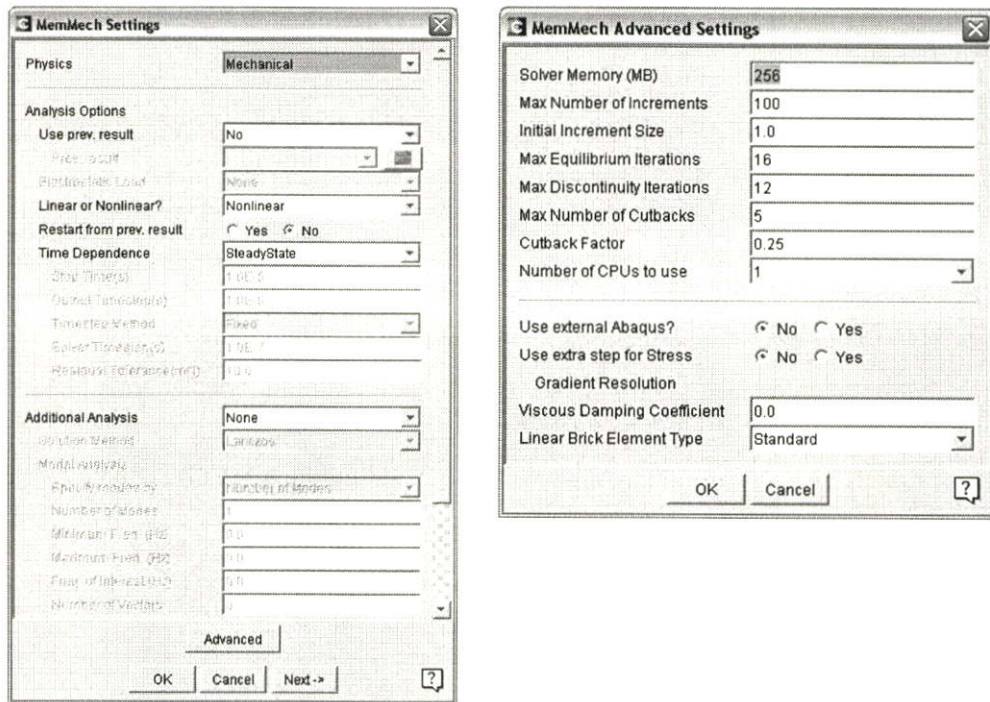
จากรูปจะเห็นได้ว่าด้านล่างของ Diaphragm นั้นจะมีสีเป็นสีส้มปนสีแดง ซึ่งเป็นสีที่แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นประจุ (Charge Density) ที่บริเวณต่างๆ

การใช้เครื่องมือ MemMech

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาเชิงกล(Mechanical) โดยจะใช้วิธี Finite element method ในการคำนวณหาค่า Mechanical stress และ Displacement ที่ตำแหน่ง each node และ each brick เพื่อสร้างโมเดล สำหรับการแก้ปัญหาอย่างง่ายและรวดเร็ว โดยมีวิธีการดังนี้

1. คลิกเลือก MemMech จากช่อง Solver(effects)
2. คลิกเลือก Diaphragm จากช่อง Model/Mesh

3. ในช่อง Analysis คลิกเลือก Create a new analysis
4. คลิกที่ไอคอน Solver Setup จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-26



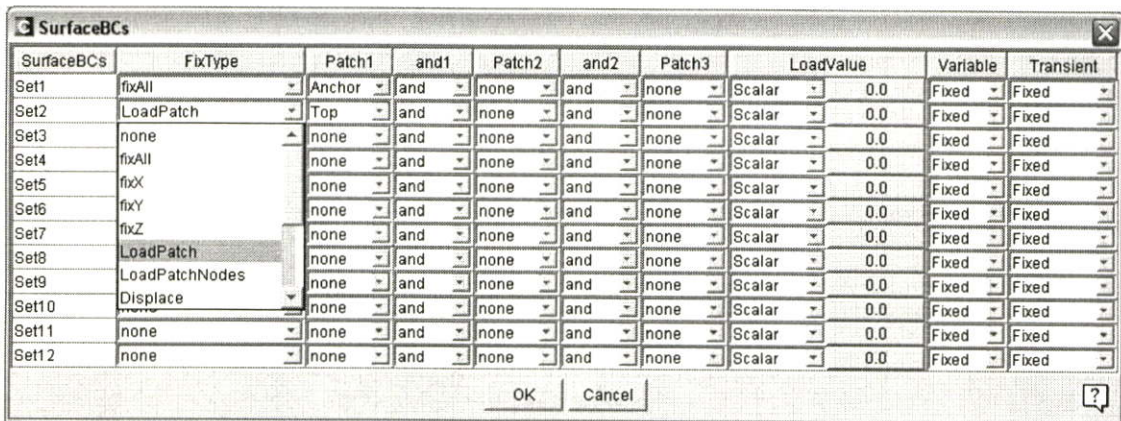
รูปที่ ก-26 MemMech Setting

การตั้งค่า MemMech BCs Windows

เป็นการตั้งค่าของส่วนเงื่อนไขขอบเขตของพื้นผิว (Surface boundary condition) โดยกำหนดเงื่อนไขของ Fix type และ LoadValue ให้เป็นชื่อของพื้นผิวที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีวิธีการกำหนดดังนี้

1. แก้ไขรายละเอียดของ Set 1 เป็นดังนี้
 - Fix Type เลือกเป็น FixAll
 - Patch1 เลือกเป็น Anchor
2. แก้ไขรายละเอียดของ Set 2 เป็นดังนี้
 - FixType เลือกเป็น LoadPatch
 - Patch เลือกเป็น Top
 - LoadValue ตั้งค่าเป็น 0.45

3. คลิกที่ปุ่ม OK เพื่อปิดหน้าต่าง
4. ที่หน้าต่าง MemMech BCs คลิกที่ปุ่ม Run
5. จะปรากฏหน้าต่าง Save Analysis As ใส่ชื่อเป็น Mech_run1
6. คลิกปุ่ม OK จะปรากฏหน้าต่าง Conform
7. กดปุ่ม Yes เพื่อยืนยันการบันทึก แล้วรอสักครู่



รูปที่ ก-27 การตั้งค่า SurfaceBCs Windows

การดูผลของ Mechanical Results

หลังจากกดปุ่ม Run แล้วรอสักครู่แล้วจะปรากฏหน้าต่าง Analysis Result ดังรูปที่ ก-28 ซึ่งเป็นหน้าต่างที่แสดงผลของการวิเคราะห์ Diaphragm โดยจะแสดงผลเป็น 2 ส่วนคือ

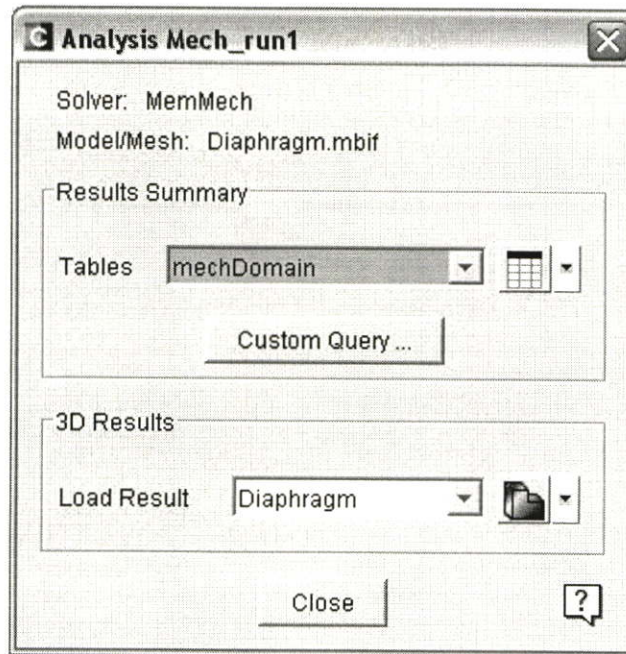
Result Summary : เป็นการดูผลที่เป็นตารางเมื่อคลิกที่ M จะมีค่าให้เลือกคือ

conForces : แสดง contact force และ area (Contact condition)

mechDomain : แสดง Mechanical Results

rxnForce : แสดง Reaction force Result

3D Result : เป็นการดูผลที่เป็นภาพสามมิติ



รูปที่ ก-28 Analysis Results ของ Mech_run1

1. คลิกเลือก mechDomain จากช่อง Tables
2. คลิกที่ไอคอน View Table จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-29
3. คลิกเลือก rxnForce จากช่อง Tables
4. คลิกที่ไอคอน View Table จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-30
5. คลิกเลือก Diaphragm จากช่อง Load Result
6. คลิกที่ไอคอน View 3D result จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ก-31

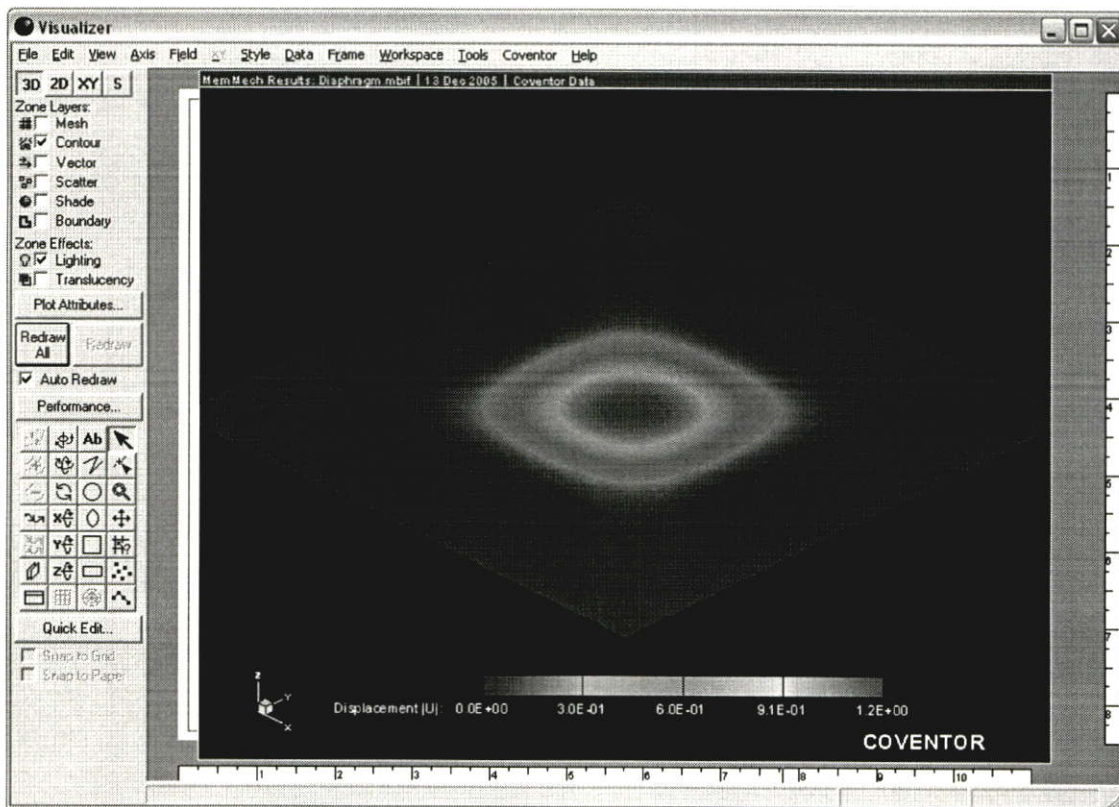
mechDomain	Maximum	Minimum
Node Displacement	1.208181E00	0.0
Node X Displacement	2.746109E-02	-2.742814E-02
Node Y Displacement	2.775061E-02	-2.775137E-02
Node Z Displacement	8.753114E-04	-1.208181E00

รูปที่ ก-29 หน้าต่างผลของการคำนวณ mechDomain

rxnForces	Fx	Fy	Fz
Anchor	3.130676E-06	-7.805042E-06	1.458000E04

Close

รูปที่ ก-30 หน้าต่างผลของการคำนวณ rxnForce



รูปที่ ก-31 การดูผลแบบโมเดลสมมติ Visualizer Windows

ภาคผนวก ข.

ความดันเสียง และ ระดับความดันเสียง

ตารางที่ ข1 ความดันเสียงและระดับความดันเสียงค่าต่างๆ

Source of sound	Sound pressure	Sound pressure level
	pascal	dB SPL
Theoretical limit for undistorted sound at 1 atmosphere environmental pressure	101,325 Pa	194 dB
Krakatoa explosion at 100 miles (160 km) in air	20,000 Pa	180 dB
Simple open-ended thermoacoustic device	12,000 Pa	176 dB
M1 Garand being fired at 1 m	5,000 Pa	168 dB
Jet engine at 30 m	630 Pa	150 dB
Rifle being fired at 1 m	200 Pa	140 dB
Threshold of pain	100 Pa	130 dB
Hearing damage (due to short-term exposure)	20 Pa	approx. 120 dB
Jet at 100 m	6 – 200 Pa	110 – 140 dB
Jack hammer at 1 m	2 Pa	approx. 100 dB
Hearing damage (due to long-term exposure)	6×10^{-1} Pa	approx. 85 dB
Major road at 10 m	$2 \times 10^{-1} - 6 \times 10^{-1}$ Pa	80 – 90 dB
Passenger car at 10 m	$2 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-1}$ Pa	60 – 80 dB
TV (set at home level) at 1 m	2×10^{-2} Pa	approx. 60 dB
Normal talking at 1 m	$2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$ Pa	40 – 60 dB
Very calm room	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$ Pa	20 – 30 dB
Leaves rustling, calm breathing	6×10^{-5} Pa	10 dB
Auditory threshold at 2 kHz	2×10^{-5} Pa	0 dB

ภาคผนวก ค.

หน่วยต่างๆ ของ CoventorWare™

Quantity	Symbol	S.I. units (kg/m/s/A/K)		CoventorWare units (kg/μm/s/pA/K)	
Acceleration	a	m / s ²		μm / s ²	μm / s ²
Angular acceleration		rad/s		degrees/sec	
Angular input	°	radians		degrees	
Angular velocity		rad/s ²		degrees/sec ²	
Capacitance	C	F	A ² · s ⁴ / (kg · m ²)	pF	pA ² · s ⁴ / (kg · μm ²)
Charge	Q	C	A · s	pC	pA · s
Conductivity (Electrical)	σ	S / m		pS / μm	pA ² · s ³ / (kg · μm ³)
Conductivity (Thermal)	k	W / mK	(kg · m) / (K · s ³)	pW / μm · K	(kg · μm) / (K · s ³)
Current (Electrical)	I	A		pA	pA
Density	ρ	kg / m ³		kg / μm ³	kg / μm ³
Flow	Φ	m ³ / s		μm ³ / s	μm ³ / s
Force	F	N	(kg · m) / s ²	μN	(kg · μm) / s ²
Frequency	f	Hz	1 / s	Hz	1 / s
Heat Flux	q	W / m ²	kg / s ³	pW / μm ²	kg / s ³
Length	l	m		μm	μm
Mass	m	kg		kg	kg
Moment of Inertia	I	kg · m ²		kg · μm ²	kg · μm ²
Piezoresistive Coefficients	π ₁₁ , π ₁₂ , π ₄₄			MPa ⁻¹	
Poisson's Ratio	ν				
Power	P	W	(kg · m ²) / s ³	pW	(kg · μm ²) / s ³
Pressure	p	Pa	kg / (m · s ²)	MPa	kg / (μm · s) ²
Specific Heat	C _p	J / kgK	m ² / (K · s ²)	pJ / kgK	μm ² / (K · s ²)
Stress	σ _{ij}	Pa	kg/(m · s ²)	MPa	kg/(μm · s ²)
Thermal Coefficient of Expansion	TCE	1 / K		1 / K	1 / K
Velocity	v	m / s		μm / s	μm / s
Viscosity (Dynamic)	μ	Pa · s		MpA · s	kg / (μm · s)
Voltage (Electrical)	V	W / A	(kg · m ²) / (A · s ³)	V	(kg · μm ²) / (pA · s ³)
Young's Modulus	E	Pa	kg/(m · s ²)	MPa	kg / (μm · s ²)

ภาคผนวก ง.
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



ISSN 1905-6702

Laos Journal on Applied Science

Vol.1 No.1 November 2006

SPECIAL ISSUE



Co-Sponsored by : ICTP

1st International Conference On Applied Science (ICAS 2006)
5-7 November 2006
Vientiane, Laos

Organizers : Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Faculty of Science, National University of Laos

THE SIMULATION OF PIEZORESISTIVE SILICON MICROPHONE AT LOW SOUND PRESSURE TO OPTIMISE POSITIONS OF THE STRAIN GAUGES

N. Thamrongwattanachai^{*}, T. Arpautaipong^{*}, E. Chaowicharat^{**}, K. Saejok^{**}, A. Poyai^{**}, W. Titiroongruang^{*}

^{*}Electronic Research Center, Department of Electronics, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Road, Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand

^{**}Thai Microelectronics Center (TMEC),
National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC),
51/4 Moo 1, Wangtakien District, Amphur Mueang, Chachoengsao 24000, Thailand

ABSTRACT

To study and design the piezoresistive microphone, CoventorWare™ software package was used to simulate the response of diaphragm from the thickness of 0.1 μm to 0.5 μm , with surface dimension of 500*500, 1000*1000, 1500*1500, 2000*2000, 2500*2500 and 3000*3000 μm^2 . The sound pressure, used in the simulation, started from 20 μPa to 60 μPa (0 to 10 dB). The result will be used to determine the optimal position of strain gauges. From the simulated model, it can be seen that diaphragm experienced the highest stress at the edge, hence this is the most appropriate place for the resistor. The most appropriate dimensions are 3000*3000 μm^2 on each side with a thickness of 0.1 μm . With these dimensions, the calculated stress is the highest from all the different conditions used in the simulation. There will be two types of orientation used in placing the resistors: perpendicular and parallel to direction of the strain. The position for parallel placement is $\epsilon_{x,y} = x,0$ where x is in the range of 1250 – 1750 μm . The position for perpendicular placement is $\epsilon_{x,y} = 1500,y$ where y is in the range of 30 – 140 μm .

1. INTRODUCTION

There are several detection mechanisms used for microphone, e.g. piezo microphone, capacitive microphones, dynamic microphones, and carbon microphone [1]. A microphone relies on the same principle as sensor, i.e. converting physical signals to electrical signals [2], as shown in figure 1. A microphone can be used in many systems, for example, telephone handset, tape recorder and computer.



Figure 1. Block diagram of microphone system

^{*} Corresponding author. Tel: 66(0)2 321 4276, Fax:66(0)27390643,
E-mail:dindangs@hotmail.com

Hearing aids is one such application for microphones. It is a device to assist patients with partial hearing loss. The early commercial device focused on recovering the ability to communicate with fellow human beings, such as telephone or face to face conversation. Therefore, the sound pressure range is quite high, and achievable using normal microphone. As time progress, users tend to require more sophistication from the hearing aids, for example, achieving quality high enough for music appreciation or the ability to hear very low sound pressure. For these reasons, it is beneficial to study the microphone working at low sound pressure. CoventorWare™ software package [3] was used for simulation and study various microphone structures under different pressure conditions. The result will be incorporated into the design and fabrication phase of the project.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Small deflection theory

In order to determine the optimal design of the sensing resistors including position, orientation and length, conventional theories of solid mechanics have been investigated. Since linear response is desired, these pressure sensors are designed to be operated in the small deflection region. Two types of diaphragms are considered including both circular and square shapes [4]. This paper used square shape.

2.2. Stress and piezoresistive coefficient of resistor

The strain gauges for the piezoresistive pressure sensor are normally arranged as shown in figure 2. There are two resistor arranged so that the current will flow perpendicular to the strain field (R_1 and R_3). In contrast, the other two resistor will have current flowing in parallel to the strain field (R_2 and R_4). The change of resistance both in parallel and perpendicular to the strain field will be related to the stress and piezoresistive coefficient [5-6] as shown in equation 1.

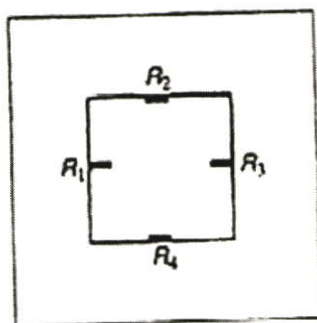


Figure 2. Strain gauges positioning

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right] = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (1)$$

where, $\left[\frac{\Delta R}{R} \right]$ is a ratio between the change in resistance and the original resistance

π_l is the longitudinal piezoresistive coefficient,

π_t is the traversal piezoresistive coefficient,

σ_l is the longitudinal stress,

σ_t is the traversal stress.

2.3. Sensitivity

One of the most important parameters of a sensor is sensitivity. A good sensor should have high sensitivity and also high stability. Sensitivity with respect to pressure [5] can be calculated from the following equation,

$$S = \frac{\left[\frac{\Delta R}{R} \right]}{P} = \frac{\pi_1 \sigma_t + \pi_2 \sigma_l}{P} \quad (2)$$

where, S is the sensitivity with respect to pressure,
P is the pressure.

2.4. Simulation.

Before a simulation can occur, there need to be a solid model of the device. This can be achieved through the features of the software package. Firstly, a process flow need to be established. This flow resembles very closely to the actual fabrication steps with some detail removed to simplify the final 3D model. Since only the diaphragm is of interest, the actual flow will only have a few steps as shown in figure 3. During this time, material, film coverage characteristics, mask layer name, etch profile and film thickness are also specified. The materials for substrate and diaphragm are single crystal silicon and polysilicon respectively. The diaphragm thickness was specified starting from 0.1 μm to 0.5 μm .

Step	Action	Type	Layer Name	Material	Thickness	Coverage
1	Spin Coat Resist	Resist	Resist	Resist	0.5	100%
2	Spin Coat Mask	Mask	Mask	Mask	0.5	100%
3	Spin Coat Layer	Layer	Layer	Polysilicon	0.1	100%
4	Spin Coat Layer	Layer	Layer	Polysilicon	0.1	100%
5	Spin Coat Layer	Layer	Layer	Polysilicon	0.1	100%
6	Spin Coat Layer	Layer	Layer	Polysilicon	0.1	100%

Figure 3. Process flow and material selection for diaphragm fabrication

After specifying the process flow, the layout of the device need to be designed. This is the physical dimension of both substrate and the diaphragm as shown in figure 4. The layout can be drawn using the software own tools or importing from other tools using standard formats. There are six sets of diaphragm dimension: 500*500 μm^2 , 1000*1000 μm^2 , 1500*1500 μm^2 , 2000*2000 μm^2 , 2500*2500 μm^2 and 3000*3000 μm^2 .

After designing the layout, the software need to build a solid model of the device using the parameters specified previously. The 3D model will then be meshed with different element sizes and shapes. There is a need to experiment with element size in order to lessen the simulation time without losing the accuracy. The resulting meshed model is shown in figure 5.

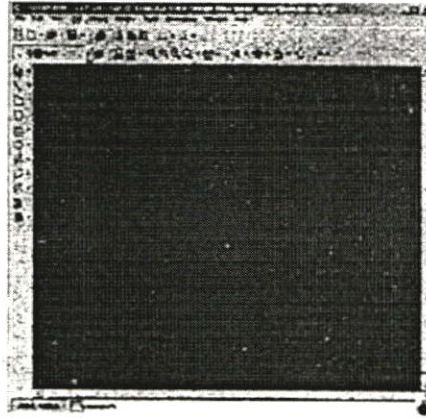


Figure 4. 2D layout showing substrate and diaphragm

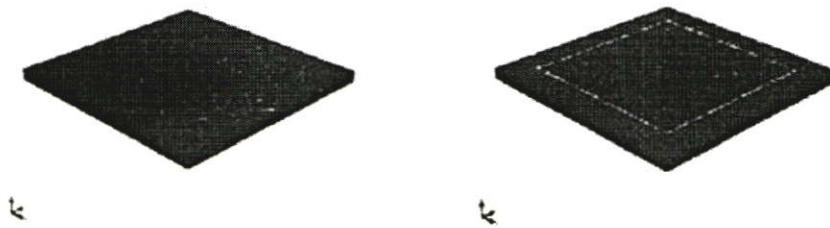


Figure 5. 3D solid modeling of substrate and diaphragm before and after meshing

To start simulation, pressure load need to be applied to the diaphragm. For this work, the pressure starting from $20 \mu\text{Pa}$ to $60 \mu\text{Pa}$ was used. This corresponds to the sound pressure at the lowest limit that human ear can respond. The graphical representation of stress in figure 6 shows that the area with highest stress is at the edge of the diaphragm.

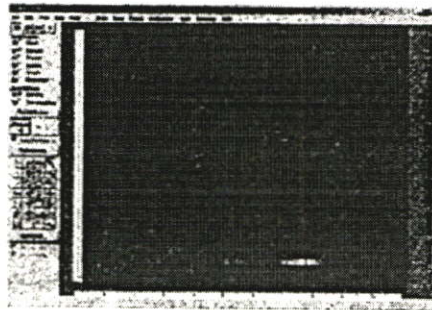
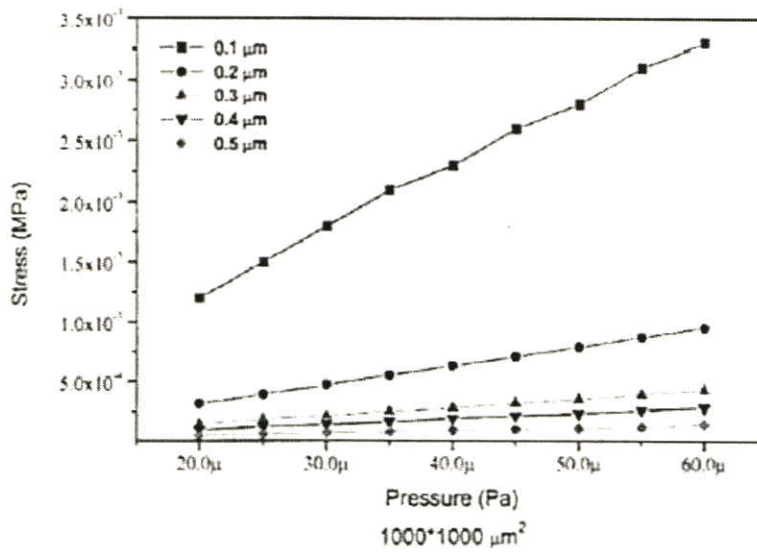
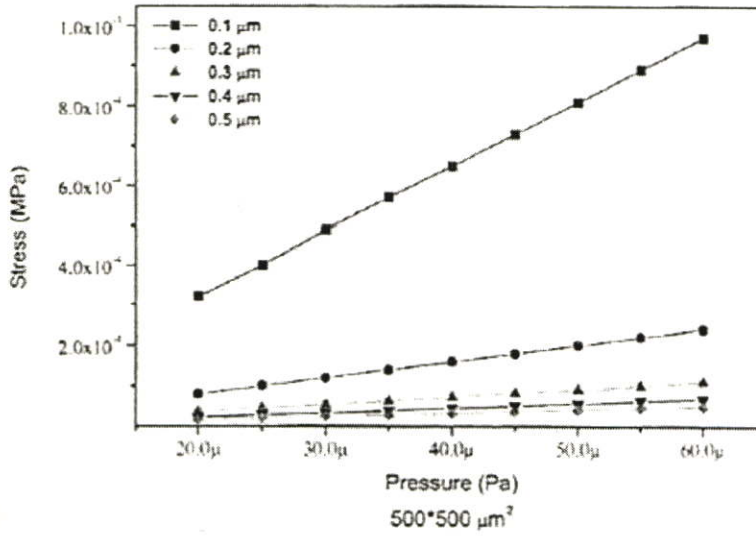
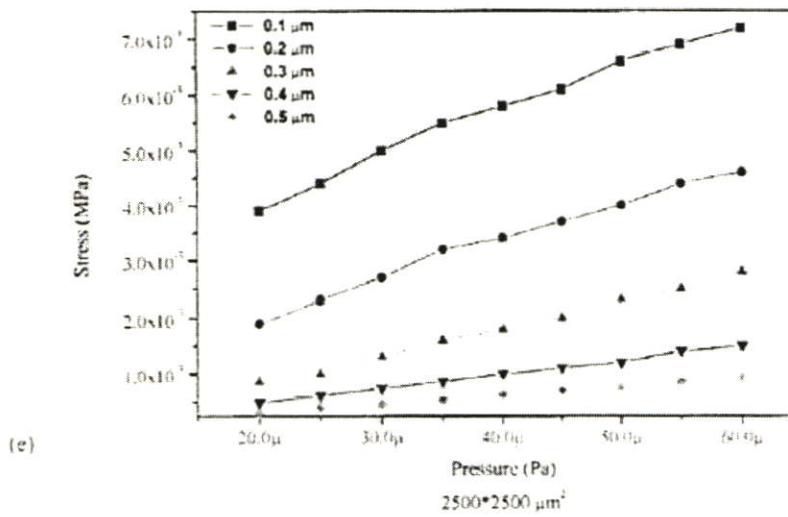
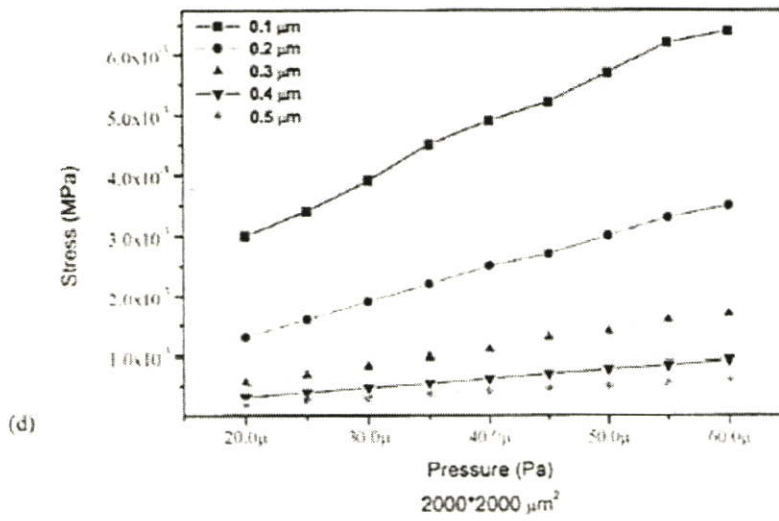
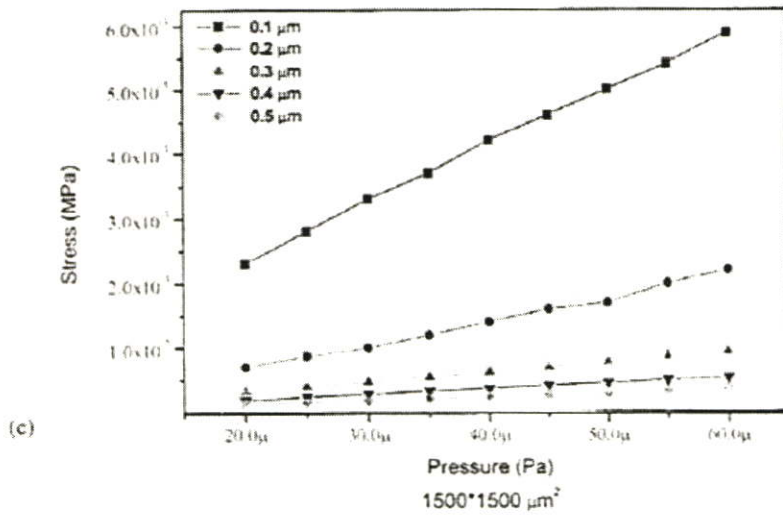


Figure 6. The resulting graphic showing stress distribution over the diaphragm

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The simulation results, after varying pressure, diaphragm dimensions and thickness, are shown on the figure 7(a)-7(f).





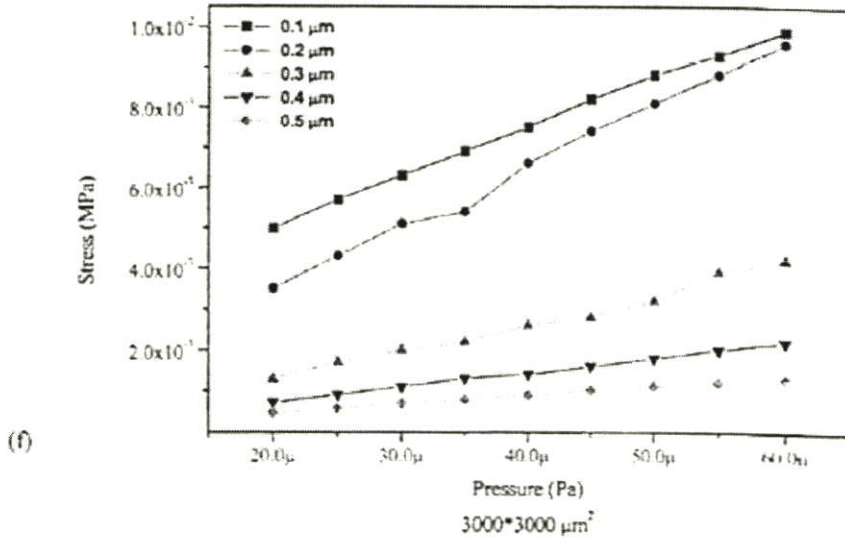


Figure 7. Applied pressure versus maximum stress for different diaphragm dimensions (a) 500*500 μm², (b) 1000*1000 μm², (c) 1500*1500 μm², (d) 2000*2000 μm², (e) 2500*2500 μm², (f) 3000*3000 μm²

From figure 7, after applying various pressure to the diaphragm, it can be seen that the highest response occurred at 3000*3000 μm² diaphragm (figure 7(f)). Furthermore, for the same dimension, the diaphragm with 0.1 μm thickness has the most change in term of stress. This means that if the displacement of the diaphragm is large, then the related stress will also be large. Since the stress is also related to the change of resistance, these relationship can be used to design the microphone with appropriate sensitivity.

The first equation shows that high stress will cause large change to $\frac{\Delta R}{R}$ and hence good sensitivity (equation 2). For this reason, the dimension of the diaphragm was chosen to be 3000 × 3000 × 0.1 μm³. The simulated stress is in the range from 5 × 10⁻³ to 9.9 × 10⁻³ Mpa. We used this set of dimension to find an appropriate location for the strain gauges. There are two types of resistor placement. One is the resistor in perpendicular (R_p) to the edge, and the other type is the resistor in parallel (R_t) to the edge (figure 2).

In order to examine the strain field in more detail, the 3000 × 3000 μm² diaphragm was meshed as square grid with 10 × 10 μm² grid size. This will help locating the area with the maximum strain (and hence stress) as shown in figure 8.

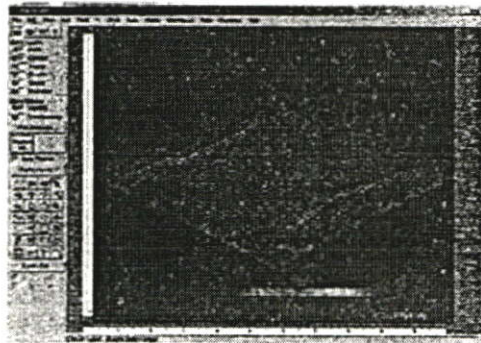


Figure 8. Show strain field in one direction

The simulation showed that the area with maximum stress is located near the edge of the diaphragm. In order to find the exact location for resistors placement, a plot of strain against the position along the edge is used. Figure 9 shows that even with different applied pressure, the curves have similar shape. The area with maximum stress is in the middle area along the edge.

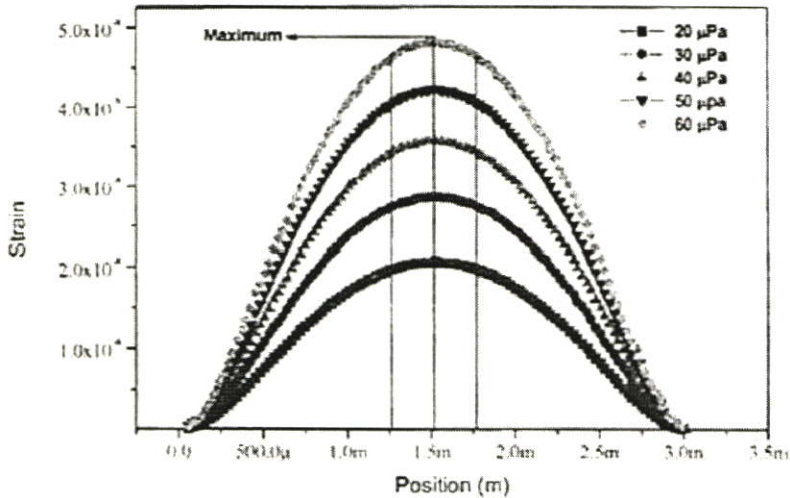


Figure 9. Show strain relative to the position on diaphragm along the edge

From figure 9, the most appropriate area for R_i is $\varepsilon_{x,y} = x,0$ where x is between 1250 and 1750 μm . The highest stress point is at $x = 1500 \mu\text{m}$. Using this as a starting point, the position for R_p can be found using the plot from figure 10. This plot shows that the appropriate range is $\varepsilon_{x,y} = 1500, y$ where y is between 30 and 140 μm .

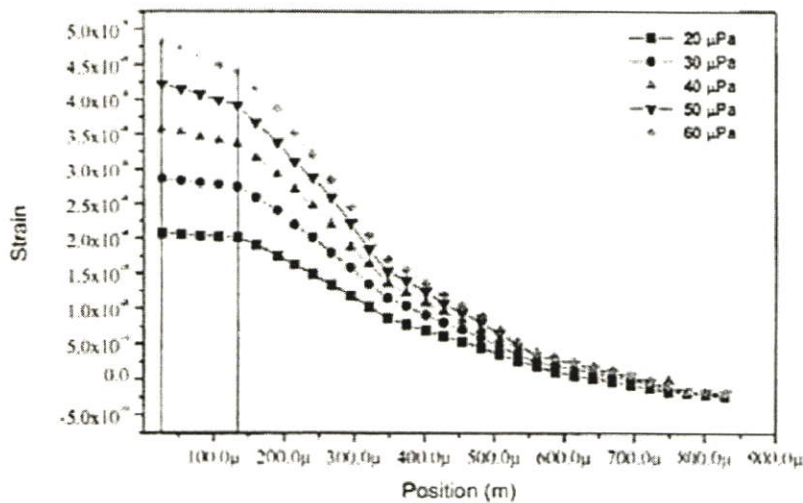


Figure 10. Show strain relative to position on the diaphragm moving toward the center

4. CONCLUSIONS

From the model, we can confirm the relationship between stress and resistance change, and hence the sensitivity. Furthermore, the location of highest strain can determine the position of perpendicular resistors and parallel resistors. The position for parallel placement is $\varepsilon_{x,x} = x,0$ where x is in the range of 1250 – 1750 μm . The position for perpendicular placement is $\varepsilon_{x,y} = 1500,y$ where y is in the range of 30 – 140 μm .

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank technical staffs of TMEC for special advice, ERC for special helps and MEMS for Coventorware™ simulation software.

REFERENCES

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>
- [2] P. Hauptmann, *Sensors: principles and applications*, Carl Hanser Verlag, Munich,1993, pp. 5, 11.
- [3] DESIGNER™ Reference Guide & Tutorials, MEMS & Microsystems Physical Design.
- [4] Lin,L., Yun, W., 1998 Design, optimization and fabrication of surface micromachined pressure sensors, *Mechatronics*, 8, pp. 505-519.
- [5] Yang, L. J., Lai, C. C., Dai, C. L. and Chang, P. Z. 2005 A Piezoresistive Micro Pressure Sensor Fabricated by Commercial DPDM CMOS Process, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, Vol. 8, No 1, pp. 67-73.
- [6] Guckel, H. 1991 Surface micromachined pressure transducers, *Sensors and Actuators A*, vol. 28 133-146.



Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

30th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่น่าสนใจในการประชุม เล่ม 2

- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (LS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

Volume II



โดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
 ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แคว ธีสอร์ท กาญจนบุรี
 25 - 26 ตุลาคม 2550



การทดสอบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซีฟที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม เพื่อหาค่าความไวในการตอบสนองและค่าฮิสเทอรีซิส

The Result of Sensitivity and Hysteresis of Piezoresistive Pressure Transducer Based on Polycrystalline Silicon

นภาพร ช่างวิเศษชัย วิศุทธิ์ สุทธิรุ่งเรือง อัมพร โพธิ์โอ กานูณ แซ่จอก และ เอกสิทธิ์ แซ่วิชาวัฒน์
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10520
ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ S1/4 หมู่ 1 ถนนสุวินทวงศ์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000
โทร 08-1440-5526 E-mail: dindangs@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้จะกล่าวถึงการทดสอบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซีฟที่มีโพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม ซึ่งไดอะแฟรมมีพื้นที่หน้าตัด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ และมีความหนาที่ $1.5 \mu\text{m}$ เพื่อหาค่าความไวในการตอบสนอง (sensitivity) และค่าฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ของทรานสดิวเซอร์ความดัน โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันตั้งแต่ 0-50 kPa ซึ่งเราจะทำการทดลองกับทรานสดิวเซอร์ทั้งหมด 5 ตัวด้วยกันและทรานสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัวนี้มีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงสร้างแบบเดียวกันทั้งหมด จากผลการทดลองทำให้เห็นว่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์โดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 0.2 mV/kPa และฮิสเทอรีซิสโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 1%

คำสำคัญ: โพลีซิลิคอน, ไดอะแฟรม, ความไวในการตอบสนอง, ฮิสเทอรีซิส, ทรานสดิวเซอร์, เพียโซรีซีฟ

Abstract

This paper presents the result of sensitivity and hysteresis of piezoresistive pressure transducer based on polycrystalline silicon at pressure between 0 to 50 kPa. The polysilicon diaphragm thickness is $1.5 \mu\text{m}$ and surface area $100 \times 100 \mu\text{m}^2$. Which piezoresistive pressure transducer having the same structure, the average sensitivity of piezoresistive transducer is 0.2 mV/kPa and average hysteresis is 1%.

Keywords: polysilicon, diaphragm, sensitivity, hysteresis, transducer, piezoresistive

1. คำนำ

ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซีฟที่ได้นำมาใช้กันอย่างหลากหลาย เช่น ใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น โดยที่มีการพัฒนาขนาดของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซีฟที่ไม่มีขนาดเล็กลงเรื่อยมาตามวัตถุประสงค์การนำไปประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันมีความต้องการนำทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซีฟไปใช้งานในบริเวณที่มีขนาดเล็กลงมีจำนวนเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังมีความต้องการที่จะนำทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซีฟที่มีไปประยุกต์ใช้งานเป็นไมโครโพรเซสเซอร์อีกด้วย การสร้างควมดันทานเพียโซรีซีฟที่ปราศจากโพลีซิลิคอนแทนซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Single Crystal Silicon) เพราะว่ามีความสะดวกในการสร้างเพียงใช้เทคนิค LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งใช้เวลาในการผลิตสั้นลงและมีต้นทุนที่ต่ำกว่า

2. หลักการทำงานและโครงสร้าง

2.1 หลักการทำงาน

หลักการทำงานพื้นฐานของทรานสดิวเซอร์คือ จะเปลี่ยนสัญญาณทางฟิสิกส์ (Physical) ไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical) แสดงดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการทำงานของทรานสดิวเซอร์

เมื่อมีความดันจ่ายให้กับตัวทรานสดิวเซอร์แบบเพียโซรีซีฟที่ไดอะแฟรมที่อยู่ภายในจะมีการเปลี่ยนแปลงของขึ้นลงตามระดับความดันที่ป้อนให้ จึงทำให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่วางอยู่บนไดอะแฟรมเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานนี้จะมีสัมพันธ์กับความดัน (Strain) [1] ดังสมการที่ 1

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right] = \pi \sigma \quad (1)$$

โดยที่ $\left[\frac{\Delta R}{R} \right]$ คืออัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความ

ต้านทาน, π คือสัมประสิทธิ์ปียโซโซริซีฟทิฟและ σ คือความเค้น
ทรานสเวิร์สเซอร์ทุกชนิดถึงมากที่สุดถึงค่านี้ถึงคือ ความไวในการ
ตอบสนอง ซึ่งทรานสเวิร์สเซอร์ที่ดีควรมีความไวในการตอบสนองที่ดี
และคงที่ เราสามารถคำนวณหาค่าความไวในการตอบสนองได้จาก [2]
สมการที่ 2

$$S = \frac{\left[\frac{\Delta R}{R} \right]}{P} = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta P} \quad (2)$$

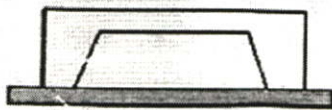
เมื่อ S คือความไวในการตอบสนอง, P คือความดัน, ΔV คือ
การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาท์พุทของวงจรวีทโคเนคทีฟ, ΔP คือการ
เปลี่ยนแปลงความดันและ V_0 คือแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ และเราสามารถ
หาค่าความหาค่าฮิสเตอร์ิซิสได้จากสมการที่ 3

$$h = \left| \frac{\text{Point 1} - \text{Point 2}}{\text{max} - \text{min}} \right| \times 100\% \quad (3)$$

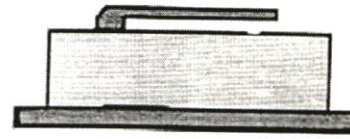
โดยที่ h คือฮิสเตอร์ิซิส, point1 คือค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่
วัดได้ในช่วงฟอร์เวิร์ด, point2 คือค่าแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายที่วัดได้ในช่วง
รีเวิร์ด, max คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้และ min คือค่าแรงดันไฟฟ้า
ต่ำสุดที่วัดได้

2.2 โครงสร้าง

เทคนิคการสร้างจะอยู่ด้วยกัน 2 เทคนิคคือ เทคนิคการกัด
จากด้านหลัง (bulk micromachining) และ เทคนิคการกัดจากด้านหน้า
(surface micromachining) [3,5] แสดงดังในรูปที่ 2 ก และ ข ตามลำดับ
เทคนิค bulk micromachining จะเป็นการสร้างแผ่นฟิล์มโดยอาศัยการกัด
เปิดช่องว่าง (cavity) ด้านหลังแผ่นฐานรอง (substrate) ซึ่งจะใช้เทคนิค
การกัดแบบเปียก (wet etching) เทคนิค Surface micromachining จะเป็นการ
สร้างแผ่นฟิล์มโดยอาศัยการกัดเปิดช่องที่ด้านหน้าแผ่นฐานรอง โดย
จะสามารถใช้เทคนิคการกัดได้ทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง (dry etching)
ซึ่งอาศัยการเปิดช่องแล้วทำการกัด โดยที่วิธีนี้สามารถใช้ได้กับฐานรองที่
เป็นแก้วหรือพลาสติกก็ได้ด้วย โนจงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการกัดจาก
ด้านหน้า



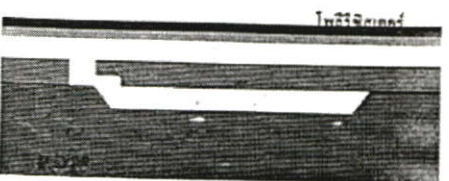
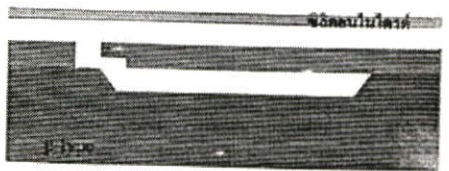
(a)

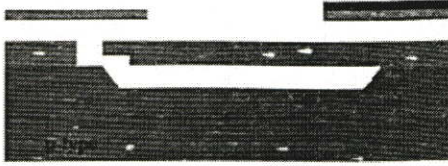


(b)

รูปที่ 2 (a) bulk micromachining (b) surface micromachining

โครงสร้างทรานสเวิร์สเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย จะเริ่มด้วยการ
สร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน (4) ที่จะเป็นโคเยแฟรมบนฐานรองซิลิคอน
โดยที่ฟิล์มโพลีซิลิคอนจะมีความหนาอยู่ที่ 1.5 μm ซึ่งระหว่าง
รอยต่อโพลีซิลิคอนกับฐานรองซิลิคอนมีช่องว่างหนา 1.4 μm และมี
ซิลิคอนไดออกไซด์หนา 7500 อังสตรอมและ ซิลิคอนไนไตรด์หนา
700 อังสตรอม ทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้นฟิล์ม โพลีซิลิ
คอนกับที่ด้านบน โพลีซิลิคอนโคเยแฟรม ชั้นโพลีซิลิไซด์ที่
สร้างมีความหนา 4000 อังสตรอม ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานปียโซโซริ
ซีฟทิฟ โดยลำดับการสร้างจะแสดงในรูปที่ 3





รูปที่ 3 ลำดับการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทิฟ

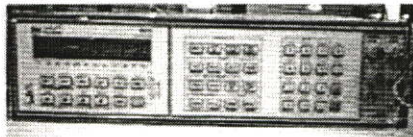
3. การทดลองและผลการทดลอง

3.1 การทดลอง

นำทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทิฟที่ได้จากกระบวนการมาใส่ลงในถังความดันที่เราให้ออกแบบขึ้นมา แสดงดังในรูปที่ 4 ซึ่งถังความดันนี้จะถูกต่อเข้ากับมัลติมิเตอร์ที่มี GPIB port แสดงดังในรูปที่ 5 เพื่อที่จะสามารถต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ช่วยในการประมวลผลการทดลองในครั้งนี้ และเราได้เขียนโปรแกรมที่จะช่วยในการประมวลผลและเก็บผลการทดลองของเราโดยใช้โปรแกรม Labview โดยที่จะมีการเปลี่ยนความดันตั้งแต่ 0-50 kPa และทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทิฟที่ใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 5 ตัว แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 ถังความดันที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5 มัลติมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6 ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทิฟที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ผลการทดลอง

นำผลแรงดันไฟฟ้าจากการวัดทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเพียโซรีซิสทิฟทั้ง 5 ตัว มาเขียนตาราง ซึ่งตารางที่ 1 จะแสดงในช่วง

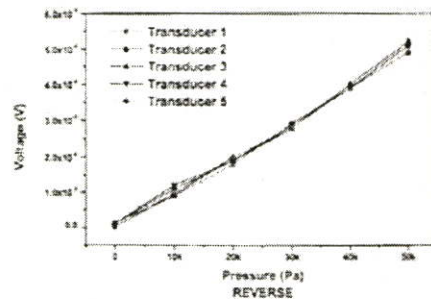
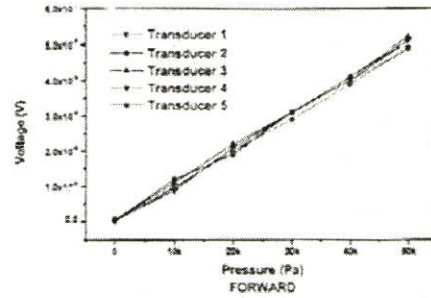
ฟอร์เวิร์ด ส่วนตารางที่ 2 จะแสดงในช่วงรีเวิร์ด และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดันที่เปลี่ยนแปลงของทรานสดิวเซอร์ทั้ง 5 ทั้งแบบ ฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ด ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ในช่วง ฟอร์เวิร์ด

Pressure	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5
0	5E-5	4E-5	5E-5	4E-5	0
10 kPa	1E-3	0.0012	0.0011	8.8E-4	9.6E-4
20 kPa	0.002	0.0019	0.0022	0.0021	0.002
30 kPa	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0029
40 kPa	0.004	0.0041	0.0041	0.004	0.0039
50 kPa	0.0049	0.0051	0.0052	0.0051	0.0049

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ในช่วงรีเวิร์ด

Pressure	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5
50 kPa	0.0049	0.0051	0.0052	0.0051	0.0049
40 kPa	0.0039	0.0039	0.004	0.0039	0.0039
30 kPa	0.0029	0.0028	0.0028	0.0029	0.0028
20 kPa	0.0018	0.0019	0.002	0.0019	0.002
10 kPa	9E-4	0.0011	9.1E-4	0.0012	9.9E-4
0	2E-5	1E-4	1.3E-4	1.1E-4	2E-5



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดัน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของทรานสดิวเซอร์ความดันแต่ละตัวนี้สามารถหาค่าฮิสเทอรีซิสได้ดังนี้ ค่าฮิสเทอรีซิสของทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.61%, ทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 1.19%, ทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 3 มีค่าเท่ากับ 1.55%, ทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 4 มีค่าเท่ากับ 1.38% และ ทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 5 มีค่าเท่ากับ 0.41% ดังนั้นเมื่อนำค่าฮิสเทอรีซิสทั้ง 5 ค่ามาหาค่าเฉลี่ยก็จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1.028%

จากผลการทดลองสามารถที่จะหาค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์แต่ละตัวได้ด้วยการแทนค่าต่างๆลงสมการที่ 2 ซึ่งค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 1 คือ 0.1972 mV/kPa, ทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 2 คือ 0.20042 mV/kPa, ทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 3 คือ 0.20382 mV/kPa, ทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 4 คือ 0.20372 mV/kPa และ ทรานสดิวเซอร์ตัวที่ 5 คือ 0.19664 mV/kPa นำค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัวมาหาค่าความไวเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 0.200364 mV/kPa ค่าความไวในการตอบสนองและค่าฮิสเทอรีซิสของทรานสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัวนี้จะเป็นการศึกษาทางสถิติเท่านั้น

4 สรุป

ค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์เฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 0.2 mV/kPa และ ค่าฮิสเทอรีซิสของทรานสดิวเซอร์เฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 1.028% จะเห็นว่าค่าความไวในการตอบสนองของทรานสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัวจะมีค่าใกล้เคียงกันแต่ค่าฮิสเทอรีซิสนั้นจะค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด นั่นอาจจะเป็นเพราะว่าการปรับเปลี่ยนความดันในแต่ละครั้งไม่เหมือนกันนั่นเอง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang, L. J., Lai, C. C., Dai, C. L. and Chang, P. Z. 2005 A Piezoresistive Micro Pressure Sensor Fabricated by Commercial DPDM CMOS Process, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 8, No 1, pp. 67-73.
- [2] H. Guckel, Surface micromachined pressure transducer, Sensors and Actuators A, 28 (1991) 133-146.
- [3] W.P. Eaton, Surface Micromachined Pressure Sensor, Ph.D. Dissertation, The University of New Mexico (May 1997).
- [4] P.J. French and A.G.R. Evans, "Piezoresistance in Polysilicon and its Application to Strain Gauges", Solid-State Electronics, 32 (1), pp. 1-10 (1989).
- [5] J. Bryzek, K. Petersen, J. R. Mallon, L. Christel, and F. Pourahmadi, Silicon Sensor and Microstructures, Lucas Novasensor (1990).



รศ.ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง ปรียญญาโท วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปรียญญาโท เอก Electronics Engineering/Tokai University, Japan. ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



อัมพร โพธิ์โย ได้รับวทศ. สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2534 ได้รับ วทศ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2537 ได้รับ Master of Engineering (พ.ศ.2541) และ Ph.D.(พ.ศ.2545) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก Katholieke University Leuven (KU Leuven) ประเทศเบลเยียม ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



การุณ แซ่จอก ได้รับ วทศ. สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี พ.ศ. 2539 ได้รับ วทศ. สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2550 ทำงานในตำแหน่งวิศวกร ณ บ.ชัยไมครอน จำกัด ปี พ.ศ. 2540 หลังจากนั้นทำงานในตำแหน่งวิศวกร ณ ไฮโปร อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ปี พ.ศ. 2543 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



เอกลักษณ์ เชาว์วิชาวัฒน์ เกิดที่จังหวัดฉะเชิงเทรา พ.ศ. 2517 ได้รับทุนการศึกษาจากกระทรวงวิทยาศาสตร์ให้ไปศึกษา ณ ประเทศออสเตรเลีย จบการศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยนิวเซาท์เวลส์ ปัจจุบันทำงานอยู่ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ดูแลการผลิต MEMS และ เครื่องมือวัด



นภาพร ชำรุงวัฒนชัย ได้รับ วทศ. สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม ปี พ.ศ. 2547 ปัจจุบันศึกษาอยู่ในระดับปริญญาโทสาขา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นางสาวนภาพร ชำรงวัฒนชัย

วัน เดือน ปีเกิด

วันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2524

สถานที่เกิด

จังหวัดกรุงเทพมหานคร

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ระบบควบคุม)

สถานที่สำเร็จการศึกษา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2547