# การศึกษาทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิคอนเพื่อใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก

# STUDY OF PRESSURE CAPACITIVE TRANSDUCER WITH POLYSILICON DIAPHRAGM ON THE SILICON SUBTRATE FOR SMALL MICROPHONE

ตุลย์ อาภาอุทัยพงษ์
TUN ARPAUTAIPONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2551

# การศึกษาทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิคอนเพื่อใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก

# STUDY OF PRESSURE CAPACITIVE TRANSDUCER WITH POLYSILICON DIAPHRAGM ON THE SILICON SUBTRATE FOR SMALL MICROPHONE



**ตุลย์ อาภาอุทัยพงษ์**

**TUN ARPAUTAIPONG**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-043-281

# STUDY OF PRESSURE CAPACITIVE TRANSDUCER WITH POLYSILICON DIAPHRAGM ON THE SILICON SUBTRATE FOR SMALL MICROPHONE

TUN ARPAUTAIPONG

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

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การศึกษาทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโคงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิคอนเพื่อใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก |
| **นักศึกษา** | นายตุลย์ อาภาอุทัยพงษ์ |
| **รหัสประจำตัว** | 48061303 |
| **ปริญญา** | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ |
| **พ.ศ.** | 2551 |
| **อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** | รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง |
| **อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม** | ดร.อัมพร โพธิ์ใย |

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การศึกษาทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิคอนเพื่อใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก โดยการออกแบบโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดนี้ รูปทรงของไดอะแฟรมเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยทำการเปลี่ยนค่าพื้นที่หน้าตัดเป็น 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ ในส่วนของความหนาทำการเปลี่ยนค่าความหนาต่างๆดังนี้ 0.5, 0.8 1.0, 1.5, และ 2.0 μm โดยได้ทำการศึกษาถึงผลของความดันที่มีต่อค่าความจุไฟฟ้า, Sensitivity และ ผลตอบสนองทางความถี่ ที่ค่าความหนาและพื้นที่ต่างๆโดยใช้ความดันในช่วง 2-20mPa อีกทั้งยังได้เสนอแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดนี้ โดยการเพิ่มอคูสติคโฮลแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดต่างๆ ดังนี้ 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ เพื่อเพิ่มค่า Sensitivity และ ช่วยทำให้ผลตอบสนองความถี่ได้ใกล้เคียงกับช่วงความถี่เสียงมากขึ้น หลังจากที่ได้ออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วได้ถูกนำไปทดสอบโดยโปรแกรม Coventorware เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการสร้างจริงต่อไป

| | |
|---|---|
| **Thesis Title** | Study of pressure capacitive transducer with polysilicon diaphragm on the silicon substrate for small microphone |
| **Student** | Mr. Tun Arpautaipong |
| **Student ID.** | 48061303 |
| **Degree** | Master Degree |
| **Program** | Microelectronic Engineering |
| **Year** | 2551 |
| **Thesis Advisor** | Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang |
| **Thesis Co-Advisor** | Dr. Amporn Poyai |

## ABSTRACT


The purpose of this research is to study the development of pressure transducer capacitive type by using polysilicon diaphragm on silicon substrate for mini-microphone application. In the experiment, the size and thickness of rectangular diaphragm are varied. In terms of diaphragm size, we vary the size of diaphragm as 100x100, 200x200, 300x300 and 400x400 $\mu m^2$. Concerning the thickness, we also vary diaphragm thickness as 0.5, 1.0, 1.5 ,and 2.0 $\mu$m. By varying these parameters, we are going to acquire the effect of pressure on the capacitance, sensitivity and frequency respond of transducer. Apart from that, we apply rectangular acoustic hole in the research and vary the size of this acoustic hole as 5x5, 10x10, 15x15 and 20x20 $\mu m^2$ for improving sensitivity and frequency response. In order to find the suitable condition, the Coventorware™ program is implemented.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆมากมาย ซึ่งผู้เขียนขอกล่าวขอบพระคุณ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ผู้ซึ่งได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้และให้แนวความคิดในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ใย หัวหน้าศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ซึ่งให้แนวความคิด คำแนะนำ ข้อปฏิบัติ ตลอดจนวิธีการแก้ไขปัญหาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกลักษณ์ เชาว์วิชารัตน์ และนายการุณ แซ่จอก นักวิจัยงานวิจัยกระบวนการผลิต ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ซึ่งให้แนวความคิดในการแก้ปัญหาต่างๆมาตลอด

ขอขอบคุณ คุณจริยา นามเสนาะ, ดร.วิสิฏฐ์ วงศ์สุทธิธรรม และพี่น้องห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่เป็นอย่างยิ่ง ที่คอยให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด และญาติพี่น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

ตุลย์ อาภาอุทัยพงษ์

# สารบัญ

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

# สารบัญตาราง

# สารบัญรูป

# สารบัญรูป (ต่อ)

# สารบัญรูป (ต่อ)

# สารบัญรูป (ต่อ)

# สารบัญรูป (ต่อ)

# สารบัญรูป (ต่อ)

# สารบัญรูป (ต่อ)

# สารบัญรูป (ต่อ)

# ศัพท์เทคนิค

| | |
|---|---|
| ไบไดเร็คชั่นนอล | Bidirectional |
| โคเวนเตอร์แวร์ | CoventorWare™ |
| ไดอะแฟรม | Diaphragm |
| ขนาด | Dimension |
| ทิศทางการตอบสนอง | Directionality |
| ผลตอบสนองต่อความถี่ | Frequency response |
| ไมโครโฟน | Microphone |
| โอมนิไดเร็คชั่นนอล | Omni-directional |
| คาร์ปาซีฟทีป | Capacitive |
| โพลีซิลิคอน | Polysilicon |
| ความดัน | Pressure |
| ความไวในการตอบสนอง | Sensitivity |
| ความเค้น | Stress |
| ความหนา | Thickness |
| ทรานสดิวเซอร์ | Transducer |
| ยูนิไดเร็คชั่นนอล | Unidirectional |

# สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ความหมาย |
|---|---|
| $\pi_l$ | สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปตามยาว |
| $\pi_t$ | สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปตามขวาง |
| $\sigma_l$ | ความเค้นตามยาว (Longitudinal Stress) |
| $\sigma_t$ | ความเค้นตามขวาง (Transverse Stress) |
| $\langle \pi_l \rangle$ | ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปตามยาว |
| $\langle \pi_t \rangle$ | ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปตามขวาง |
| $\langle Y \rangle$ | ยังโมดูลัส |
| $GF_l$ | เกจเฟคเตอร์ตามยาว |
| $GF_t$ | เกจแฟคเตอร์ตามขวาง |
| S | ความไวในการตอบสนอง |

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันทรานสดิวเซอร์ (Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทในชีวิตประจำวัน ซึ่งทรานสดิวเซอร์ก็คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณรูปหนึ่งเป็นสัญญาณที่มนุษย์สามารถตรวจวัดได้ เช่น เครื่องตรวจจับก๊าซพิษในโรงงาน กล้องอินฟาเรดสำหรับการมองในที่มืด ไมโครโฟนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เป็นต้น ทรานสดิวเซอร์ในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น ทรานสดิวเซอร์ความร้อน แสง แม่เหล็ก หรือทรานสดิวเซอร์ทางกล เป็นต้น โดยทรานสดิวเซอร์แต่ละชนิดจะอาศัยเทคนิคการตรวจวัดที่แตกต่างกันไป ในส่วนของทรานสดิวเซอร์ทางกล การตรวจวัดทางกลและเทคนิคที่ใช้มีอยู่มากมายหลายชนิดแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 1.1

**ตารางที่ 1.1** เทคนิคการตรวจวัดเซนเซอร์ทางกล

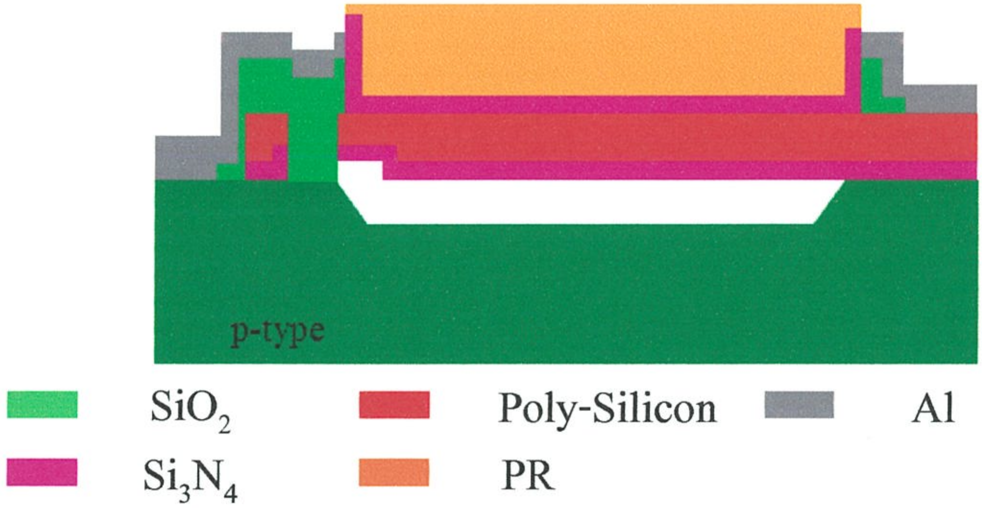
| เทคนิคการตรวจวัด | เซนเซอร์ |
|---|---|
| เปียโซรีซีฟทีป (Piezoresistive) | ความดันและอัตราเร่ง |
| คาปาซีฟทีป (Capacitive) | ความดันและอัตราเร่ง |
| เปียโซอิเล็กทริค (Piezoelectric) | ความดันและอัตราเร่ง |
| ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics) | ตำแหน่งและความเร็ว |
| แมกเนติกส์ (Magnetic) | ตำแหน่ง ความเร็วและสนามแม่เหล็ก |

ไมโครโฟนก็จัดเป็นทรานสดิวเซอร์ทางกลชนิดหนึ่งซึ่งเปลี่ยนความดันเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ในปัจจุบันโครงสร้างของไมโครโฟนขนาดเล็ก (ซิลิคอนไมโครโฟน) ที่นิยมใช้มีด้วยกัน 3 แบบคือ แบบคาปาซีฟทีป, แบบเปียโซรีซีสทีป และ แบบเปียโซอิเล็กทริค ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ดังแสดงได้ตามตารางที่ 1.2

**ตารางที่ 1.2** ข้อดีและข้อเสียของซิลิคอนไมโครโฟนโครงสร้างต่างๆ

| โครงสร้างซิลิคอนไมโครโฟน | ข้อดี | ข้อเสีย |
|---|---|---|
| เปียโซรีซีฟทีป | -นำไปต่อใช้งานกับวงจรภายนอกง่าย | -มีความไวในการทำงานต่ำ<br>-ผลจากอุณหภูมิภายนอกค่อนข้างสูง |
| เปียโซอิเล็กทริค | -นำไปต่อใช้งานกับวงจรภายนอกง่าย | -มีความไวในการทำงานต่ำ |
| คาปาซีฟทีป | -มีความไวในการทำงานสูง<br>-มีผลจากอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ | -การนำไปต่อใช้งานกับวงจรภายนอกค่อนข้างยาก |

จากตารางที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างคาปาซีฟทีปมีความเหมาะสมในการนำไปสร้างซิลิคอนไมโครโฟนเนื่องจากมีความไวในการทำงานสูงและมีกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งมีความไวในการทำงานสูงและมีผลจากอุณหภูมิภายนอกค่อนข้างต่ำ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้โครงสร้างคาปาซีฟทีป




**รูปที่ 1.1** โครงสร้างของซิลิคอนไมโครโฟนแบบคาปาซีฟทีป

ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างตามรูปที่ 1.1 ไมโครโฟนแบบโครงสร้างคาปาซีฟทีปส่วนใหญ่ไดอะแฟรมซึ่งเป็นโครงสร้างหลักจะทำจากซิลิคอนผลึกเดี่ยวและซิลิคอนไนไตรด์ ซึ่งจากงานค้นคว้าและวิจัยต่างๆจะพบว่าไดอะแรมที่สร้างจากซิลิคอนผลึกเดี่ยวถึงแม้จะมีค่าความไวที่สูง แต่มีกระบวนการสร้างที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงและในส่วนของซิลิคอนไนไตรด์ ถึงแม้จะมี

กระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากแต่มีข้อเสียคือมีความไวต่ำจึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำโพลีซิลิคอนมาใช้เป็นไดอะแฟรมเนื่องจากมีกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยาก,ค่าใช้จ่ายสูงและมีความไวในการทำงานในระดับเหมาะสม

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างคาปาซีฟทีปเพื่อใช้เป็นซิลิคอนไมโครโฟน เพื่อศึกษาถึงผลของคุณสมบัติทางกายภาพของไดอะแฟรมว่ามีผลอย่างไรกับค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของไมโครโฟน โดยทำการออกแบบให้ใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมซึ่งเป็นวัสดุที่เราสนใจเปรียบเทียบกับซิลิคอนผลึกเดี่ยวซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันในปัจจุบันโดยออกแบบเพื่อหาพารามิเตอร์ที่จะทำให้ไมโครโฟนที่ทำจากโพลีซิลิคอนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับซิลิคอนไมโครโฟนที่ใช้กันในปัจจุบัน โดยพารามิเตอร์ตัวแรกที่จะทำการศึกษาก็คือผลของพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไมโครโฟนโดยออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ พารามิเตอร์ตัวต่อไปที่ทำการศึกษาคือผลของความหนาที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไมโครโฟนโดยออกแบบให้ไดอะแฟรมมีความหนา 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 μm เพื่อหาค่าพื้นที่หน้าตัดและความหนาที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสร้างซิลิคอนไมโครโฟน นอกจากนั้นยังได้ทำการเปรียบเทียบผลของวัสดุที่ใช้ทำไดอะแฟรมว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างไรโดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โพลีซิลิคอน และ ซิลิคอนผลึกเดี่ยว หลังจากนั้นยังได้ทำการศึกษาผลของอคูสติคโฮลว่ามีส่วนช่วยทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไมโครโฟนเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยเราจะทำการปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดและตำแหน่งของอคูสติคโฮลที่ให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของไมโครโฟนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมานี้จะทำการทดสอบด้วยโปรแกรม Coventorware$^{tm}$ ซึ่งจากงานวิจัยนี้จะทำให้ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการสร้างซิลิคอนไมโครโฟนโครงสร้างคาปาซีฟทีปที่มีกระบวนการสร้าง,ค่าใช้จ่ายและ คุณสมบัติทางไฟฟ้า ที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างจริงต่อไป

## 1.3 การดำเนินงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างคาปาซีฟทีป ดังนี้

1. ความหนาของไดอะแฟรม โดยจะทำการศึกษาผลของความหนาที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างคาปาซีฟทีป ซึ่งจะใช้ความหนาที่ 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 μm

2. พื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรม โดยจะทำการศึกษาผลของพื้นที่หน้าตัดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างคาปาซีฟทีป ซึ่งจะทำการปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดที่ 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$

3. ชนิดของวัสดุสารที่ใช้ทำไดอะแฟรม ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลของวัสดุสารที่ใช้ทำไดอะแฟรมว่ามีผลอย่างไรต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบ โพลีซิลิคอน และ ซิงเกิลคริสตัลซิลิคอน

4. อคูสติคโฮล ศึกษาผลของอคูสติคโฮลว่ามีผลอย่างไรต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและตำแหน่งการวางของอคูสติคโฮล

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัยนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ คือ

1. ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุเพื่อใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก เช่น ความหนาของไดอะแฟรม พื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรม และ ขนาดของอคูสติคโฮล เป็นต้น

2. ประหยัดค่าใช้จ่ายในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เนื่องจากไม่ต้องผ่านกระบวนการสร้างจริง โดยอาศัยการจำลองด้วยโปรแกรม Coventorware ซึ่งจะช่วยให้ค่าใช้จ่ายลดลงอย่างมาก

3. มีการปรับปรุงโครงสร้างใหม่ โดยการออกแบบให้มีอคูสติคโฮล จึงทำให้ขนาดของทรานสดิวเซอร์ความดันมีขนาดเล็กลง ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณของตัวอุปกรณ์ออกมาจำนวนมากเมื่อนำไปสู่กระบวนการสร้างจริง

## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงชนิดของเซนเซอร์แบบต่างๆ ข้อดีข้อเสียของไมโครโฟนแบบต่างๆ วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โครงสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน เทคนิคการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน คุณสมบัติของเสียง และ สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า

บทที่3 ได้กล่าวถึงการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เงื่อนไขต่างๆ และวิธีการสร้างภาพ 3 มิติด้วย CoventorWare™ เบื้องต้น

บทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม CoventorWare™ ที่เงื่อนไขที่ได้ทำการออกแบบต่างๆ

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงสรุปผลการทดลอง

# บทที่ 2
# ทฤษฎี

## 2.1 ฟิล์มโพลีซิลิคอนและฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน

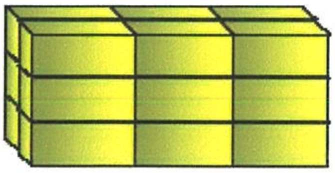
โครงสร้างของฟิล์มซิลิคอน [4] มี 3 ชนิด คือ ผลึกเดี่ยวซิลิคอน โพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน แต่ในที่นี้เราจะกล่าวเฉพาะ ในส่วนของโพลีซิลิคอนเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1.1 โครงสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน

โพลีคริสตอล (poly crystal) เป็นสารของแข็งที่เป็น หน่วยเซลล์ (unit cell) ที่มีการเรียงตัวอย่างไม่ต่อเนื่อง ลักษณะโครงสร้างของโพลีซิลิคอน คล้ายกับก้อนอิฐที่นำมาวางดังรูปที่ 2.1(ก) ที่มีการวางก้อนอิฐกันอย่างกระจัดกระจายโดยก้อนอิฐแต่ละก้อนเปรียบเหมือน หน่วยเซลล์ และกองของก้อนอิฐ เปรียบเหมือนโพลีซิลิคอน

ผลึกโมโนคริสตอลเป็นสารของแข็งที่เป็นหน่วยเซลล์ที่มีการเรียงตัวอย่างต่อเนื่อง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ผลึกรูปเดี่ยว (single crystal) ลักษณะโครงสร้างของผลึกรูปเดี่ยว คล้ายกับก้อนอิฐที่นำมาวางเรียงกันดังรูปที่ 2.1(ข) ที่มีการวางก้อนอิฐอย่างเป็นระเบียบโดยก้อนอิฐเปรียบเหมือนหน่วยเซลล์ และกองของก้อนอิฐเปรียบเหมือนผลึกรูปเดี่ยว ตัวอย่างเช่น ผลึกซิลิคอน เป็นต้น

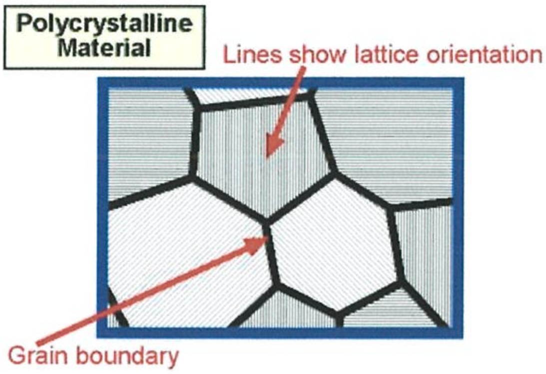
(ก) โครงสร้างโพลีซิลิคอน



(ข) โครงสร้างผลึกซิลิคอน

**รูปที่ 2.1** โครงสร้างโพลีซิลิคอนและซิลิคอน

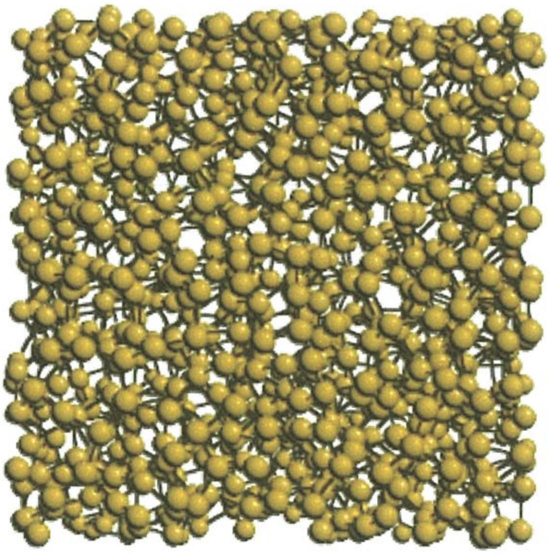
เมื่อทำการดูที่ผิวหน้าของโพลีซิลิคอนมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 โดยภายในมีผลึกแต่ละก้อนที่แบ่งแยกด้วยขอบเขตเกรน (grain boundary) และผลึกในแต่ละก้อนนี้มี ระนาบผลึก (lattice orientation) หลายระนาบผลึกอยู่ในเนื้อฟิล์มเดียวกัน เช่น [111] และ [100] เป็นต้น




**รูปที่ 2.2** ผิวหน้าของโครงสร้างโพลีซิลิคอน

### 2.1.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน

อมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon) เป็นซิลิคอนที่มีโครงสร้างแบบวัตถุอสัณฐานซึ่งลักษณะโครงสร้างของสารของแข็ง ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอนไม่เป็นผลึกพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลึก ตัวอย่างของวัตถุอสัณฐาน คือ อมอร์ฟัสซิลิคอน เป็นต้น



**รูปที่ 2.3** วัตถุอสัณฐานระดับอะตอม

### 2.1.3 คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอน [1, 2, 3]

โพลีซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น สร้างได้ง่ายและทำการควบคุมความหนาได้ง่าย ดังในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ เนื่องจากสร้างจากเทคนิค LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นเครื่องที่มีอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1,000 อังสตรอมต่อชั่วโมงที่เปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอ (uniformity) เท่ากับ 0.5 แต่สำหรับเพชรใช้เครื่อง CVD สร้างใช้อุณหภูมิในการสร้างเพชรอยู่ที่ 800-900 องศาเซลเซียส และเมื่อไปสร้างรวมกับกระบวนการอื่นกระบวนการสร้างฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้ เพชรมีการเปลี่ยนสภาพได้ สำหรับวัสดุผลึกซิลิคอน, แกลเลียมอาร์เซไนด์ส่วนมากจะสร้างจากเทคนิค MBE (Molecular Beam Epitaxy) ซึ่งราคาเครื่องค่อนข้างสูง และอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มค่อนข้างต่ำ

**ตารางที่ 2.1** การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ

| | | วัสดุ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **คุณสมบัติ** | **หน่วย** | **โพลีซิลิคอน** | **ผลึกซิลิคอน** | **เยอรมันเนียม** | **เพชร** | **แกลเลียมอาร์เซไนด์** |
| Density, $\rho m$ | (kg/m$^3$) | 2320 | 2330 | 5350 | 3510 | 5316 |
| Melting point, $T_{mp}$ | (ºC) | - | 1410 | 937 | 3827 | 1238 |
| Boiling point, $T_{bp}$ | ($^{o}$C) | - | 2355 | 2830 | 4827 | N/A |
| Electrical conductivity, $\sigma$ | (10$^3$ S/cm) | - | 4 x10$^{-3}$ | 3 x10$^{-5}$ | ~10$^{-17}$ | ~10$^{-5}$ |
| Energy band gap, $E$ | (eV) | 1.1 | 1.1 | 0.67 | 5.4 | 1.35 |
| Thermal conductivity, $\kappa$ | (W/m/K) | 34 | 168 | 60 | 1000-2600 | 370 |
| Specific heat capacity, $c_p$ | (J/K/kg) | 678 | 678 | 310 | 523 | - |
| Temperature expansivity, $\alpha_1$ | (10-6/K) | 2-2.8 | 2.6 | 5.7 | 1 | 5.7 |
| Dielectric constant, $\varepsilon_r$ | - | - | 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 |

### 2.1.4 กระบวนการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน [2, 3]

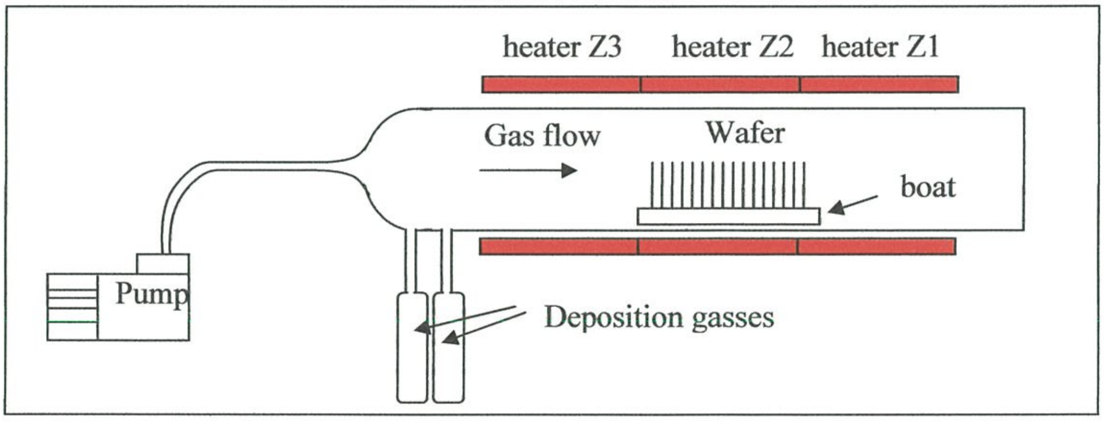
ในการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน ในงานวิจัยนี้เราใช้เครื่อง LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นแบบเตาความร้อนในแนวนอน (horizental hot wall furnace) มีลักษณะเป็นท่อควอทซ์ (quartz tube) ทรงกระบอกวางในแนวนอนซึ่งถูกล้อมรอบด้วยฮีทเตอร์ 3 โซน โครงสร้างของระบบ LPCVD แสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5

การสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน ก๊าซที่ใช้คือ Silane ($SiH_4$) ที่อุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส

$$SiH_4\,(g) \xrightarrow{600-700^{\circ}C} Si\;(s) + 2H_2\,(g) \qquad (2.1)$$

การสร้างฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน ก๊าซที่ใช้คือ Silane ($SiH_4$ ) ที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส

$$SiH_4\,(g) \xrightarrow{500-600^{\circ}C} Si\;(s) + 2H_2\,(g) \qquad (2.2)$$




**รูปที่ 2.4** โครงสร้างเครื่อง LPCVD แบบเตาความร้อนในแนวนอน

**รูปที่ 2.5** เครื่อง LPCVD แบบเตาความร้อนในแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโคร อิเล็กทรอนิกส์

**2.1.5 เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์ฟิล์มโพลีซิลิคอน และอมอร์ฟัสซิลิคอน**

- ทำการวัดค่าความหนาของฟิล์มด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ (Elipsometer)
- ทำการวัดค่าดัชนีหักเหของฟิล์มด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์
- ทำการวัดค่าทางกายภาพ เช่น ขนาดเกรน (Grain size) บนผิวหน้าเนื้อฟิล์มด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- ทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มด้วยเครื่องโฟร์พอยโพรบ (Four-Point- Probes)

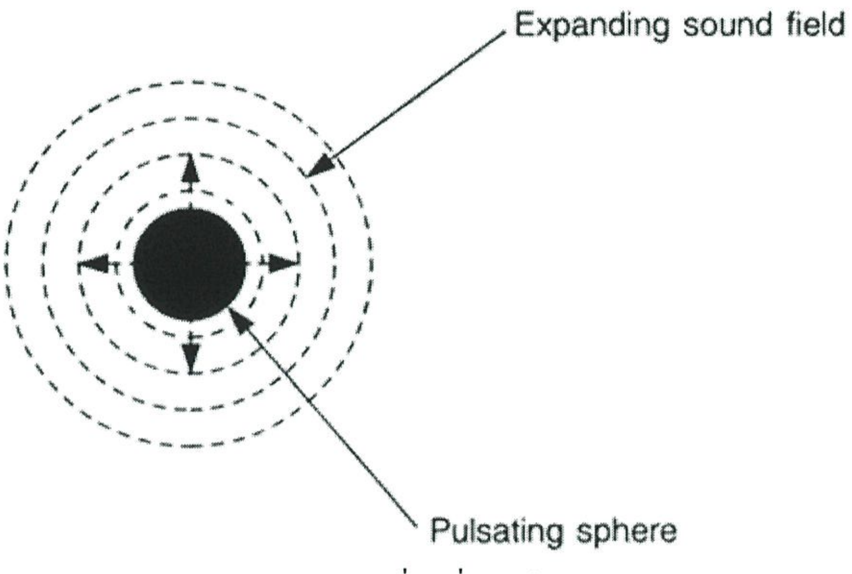
## 2.2 คุณสมบัติของเสียง[5]

**2.2.1 ลักษณะสมบัติของคลื่นเสียง**

คลื่นเป็นลักษณะอย่างหนึ่งของการถ่ายทอดพลังงานจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง พลังงานอยู่ในรูปของพลังงานกล พลังงานความร้อน พลังงานแสง พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า หรือพลังงานเสียง เป็นต้น

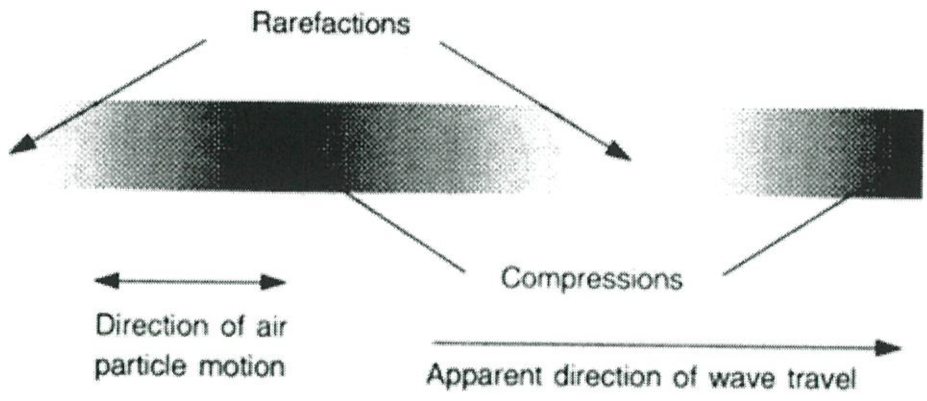
เสียงจะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุ (แหล่งกำเนิดเสียง) สั่นสะเทือน เป็นเหตุทำให้อากาศโดยรอบวัตถุเคลื่อนที่ พิจารณารูปทรงกลมดังรูปที่ 2.6 จะเห็นการเคลื่อนที่เข้าออกรอบ ๆ ทรงกลม จนกระทั่งขนาดของทรงกลมเกิดการแกว่ง หรือ ออสซิเลตในลักษณะที่ใหญ่กว่าระดับปกติเล็กน้อย และเล็กกว่าระดับปกติเล็กน้อยสลับกันไปเรื่อยๆ ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดการอัดและขยาย

ของอากาศรอบๆ ทำให้ลักษณะการอัดและขยายเป็นไปอย่างต่อเนื่องเรื่อยๆ จากทรงกลม มีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดความพริ้ว (Ripple) ทำให้เกิดคลื่นขึ้นนั่นเอง ถ้าหากโยนก้อนหินลงไปในน้ำนิ่งกลางสระน้ำ คลื่นน้ำก็จะเกิดขึ้น โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง ทำให้คลื่นเคลื่อนที่ไปข้างๆ และแผ่กระจายออกไป โดยที่น้ำกลางสระไม่ได้เคลื่อนที่ตามคลื่นไปด้วยเพียงแต่กระเพื่อมขึ้นลงเท่านั้น เช่นเดียวกับคลื่นในรูปที่ 2.7 เป็นคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นเชือกที่มีการสั่นสะเทือนในลักษณะที่ทุกๆ อนุภาคของตัวกลางไม่วิ่งตามคลื่น แต่เคลื่อนที่ขึ้นลงในทิศทางที่ตั้งได้ฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว ได้แก่ คลื่นที่เกิดในลักษณะที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ไป-มาในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของคลื่น เช่น คลื่นในลวดสปริง เมื่อปลายถูกตรึงเอาไว้ทั้งสองข้าง และบางส่วนของสปริงถูกดึงตามยาวแล้วปล่อยทันที



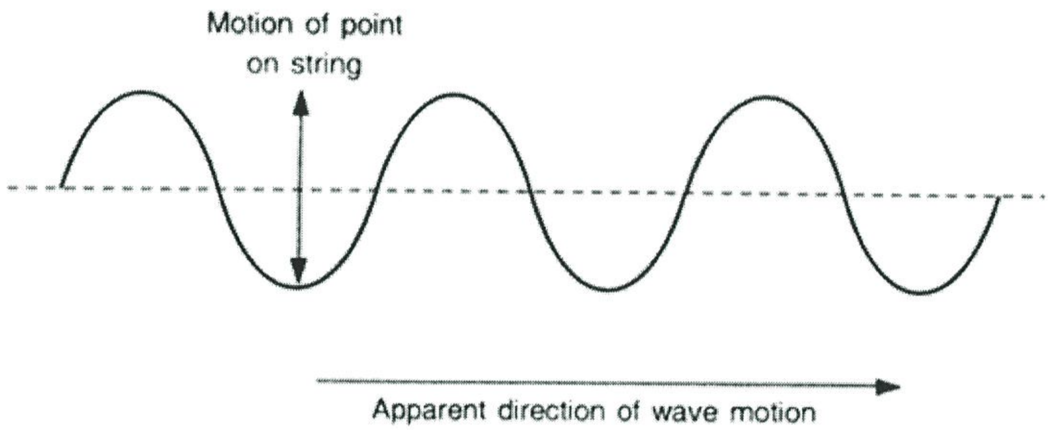

(ก) ทิศทางการเคลื่อนที่ของเสียง

**รูปที่ 2.6** ลักษณะของคลื่นแบบต่างๆ




(ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของเสียง

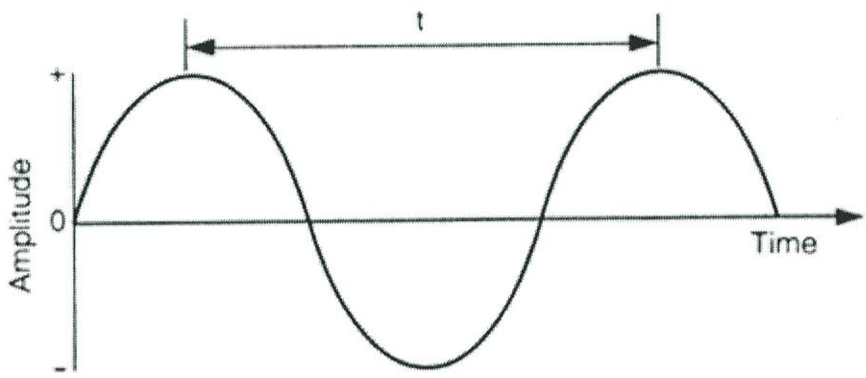
**รูปที่ 2.6 (ต่อ)**




**รูปที่ 2.7** ลักษณะคลื่นตามขวาง

ลักษณะการแกว่งของแหล่งกำเนิดทำให้เกิดความถี่ของคลื่นเสียง มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) หรือรอบต่อวินาที (cps) จำนวนของการอัดและขยายของอากาศที่มีผลมาจากการเคลื่อนที่ของทรงกลมคือ ส่วนสูง หรือ แอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความดัง (Loudness) ของเสียงที่บ่งบอกถึงความเข้มเสียงที่มาถึงหูมนุษย์ ส่วนระยะทางระหว่างยอดคลื่นที่อยู่ใกล้ชิดกัน หรือระยะทางของหนึ่งลูกคลื่นเรียกว่า ความยาวคลื่น (Wavelength) ของคลื่นเสียง เรียกเป็นภาษากรีกว่า แลมด้า ($\lambda$) อย่างไรก็ตาม ความยาวคลื่นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นเสียง เมื่อคลื่นเดินทางด้วยความเร็ว ระยะทางระหว่างยอดคลื่นจะมีค่ามากกว่าคลื่นที่เดินทางช้าโดยให้เวลาคงที่ระหว่างช่วงอัดของยอดคลื่น (นั้นคือความถี่ของการออสซิเลตแหล่งกำเนิดจะคงที่) ดังรูปที่ 2.8 ลักษณะของคลื่นเสียงสามารถแทนได้ด้วยกราฟ แกนทางแนวตั้งเป็นค่าแอมปลิจูด แกนทางแนวนอนเป็นเวลา โดยการแทนช่วงอัดอากาศเป็นบวก (+) และช่วงขยายเป็น (-) สำหรับการเคลื่อนที่เมื่อคลื่นผ่านไป

ในตัวกลาง อนุภาคของตัวกลางจะสั่นสะเทือนด้วยอัตราเดียวกันกับการสั่นสะเทือนของวัตถุที่เป็นต้นกำเนิด การสั่นสะเทือนนั้นเป็นไปอย่างมีจังหวะคือ เป็นไปในรูปแบบซิมเปิลฮาร์โมนิค (Simple Harmonic Motion : S.H.M) ซึ่งได้รูปคลื่นเสียงที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ รูปคลื่นไซน์ที่ปราศจากฮาร์โมนิคใดๆ ปะปน จากคลื่นไซน์ของเสียง ความถี่จะมีค่าเป็นส่วนกลับกับเวลา หากความถี่ของการสั่นสะเทือนอยู่นช่วง 20Hz ถึง 20 kHz โดยประมาณ ซึ่งเป็นเสียงที่หูมนุษย์ได้ยิน และหากเกินค่าวามถี่นี้หูมนุษย์ก็จะฟังไม่ได้ยิน




**รูปที่ 2.8** รูปคลื่นเสียงมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์

### 2.2.2 เสียงเดินทางในอากาศได้อย่างไร

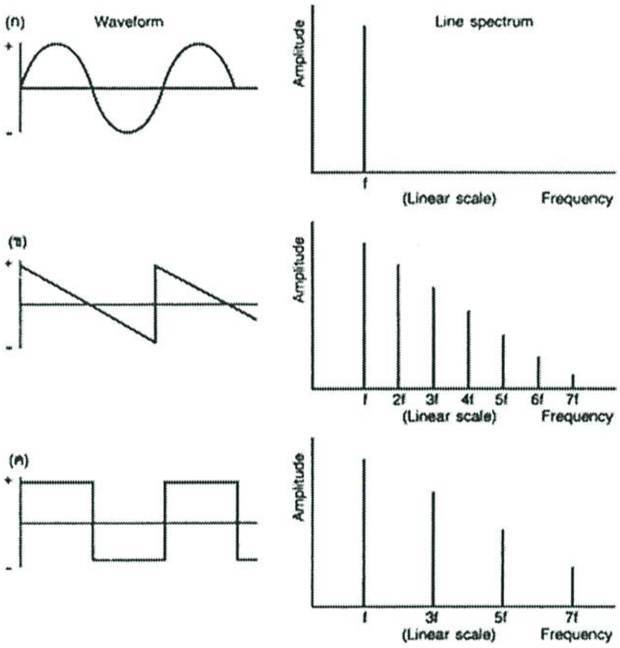
คลื่นเสียงในอากาศเป็นชนิดของคลื่นตามยาวที่โมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่รอบตำแหน่งสมดุลกับจุดกึ่งกลางในแนวที่ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ดังนั้นเมื่อมีเสียงเดินทางในตัวกลางที่เป็นอากาศ จะเกิดการอัดตัวและขยายตัวสลับกันไปดังที่กล่าวมาแล้วลักษณะคลื่นที่มีการสั่นสะเทือนของตัวกลางนี้จะเป็นการสั่นสะเทือนที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกลางที่เรียกว่า Elastic property ทั้งนี้ถ้าหากตัวกลางไม่มีความยืดหยุ่นแล้ว การสั่นสะเทือนส่วนใดส่วนหนึ่งของตัวกลางย่อมไม่สามารถทำให้ส่วนที่อยู่ถัดไปของตัวกลางสั่นสะเทือนได้

ในกรณีของคลื่นเสียงในอากาศ ถ้าหากอากาศมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ คลื่นเสียงจะมีอัตราความเร็วคงที่ประมาณ 340 เมตรต่อวินาที แต่ความเร็วของเสียงในอากาศที่จุดเยือกแข็งความเร็วจะลดลงเหลือประมาณ 330 เมตรต่อวินาที ในเหล็กซึ่งเป็นตัวกลางที่เป็นของแข็ง ความเร็วของเสียงจะมีค่าประมาณ 5100 เมตรต่อวินาที

ค่าความถี่และค่าความยาวคลื่นของคลื่นเสียง จะเกี่ยวข้องกันโดยตรงกับค่าความเร็วของเสียง C จะได้ว่า $c = f\lambda$ หรือ $\lambda = c/f$

### 2.2.3 เสียงอย่างง่ายและเสียงเชิงซ้อน

เสียงจะมีรูปคลื่นอย่างง่ายเป็นคลื่นรูปไซน์ ซึ่งเป็นผลมาจากระบบการสั่นสะเทือนอย่างง่ายของน้ำหนักที่ผูกติดไว้ที่ปลายสปริง คลื่นรูปไซน์ที่มีเสียงบริสุทธิ์มากที่สุด จะเป็นคลื่นที่ประกอบด้วยพลังงานที่มีความถี่เดียว (Fundamental) ปราศจากฮาร์มอนิกหรือเสียงทุ้มแหลมใดๆ ปะปน จึงมักจะเรียกคลื่นรูปไซน์ชนิดนี้ว่า คลื่นที่มีเสียงทุ้มแหลมที่บริสุทธิ์ (Pure tone) แต่ถ้าหากแหล่งกำเนิดเสียงถูกผสมกับความถี่แปลกปลอม จะทำให้เกิดเป็นรูปคลื่นเชิงซ้อนเสียงรบกวน (Noise) ก็จะเกิดขึ้น เช่น เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในเครื่องบันทึกเสียงดนตรีต่างๆ หรือเสียงฮัม เป็นต้น




(ก) ลักษณะรูปแบบคลื่นแบบ Sine Wave

(ข) ลักษณะรูปแบบคลื่นแบบ Saw Wave

(ค) ลักษณะรูปแบบคลื่นแบบ Square Wave

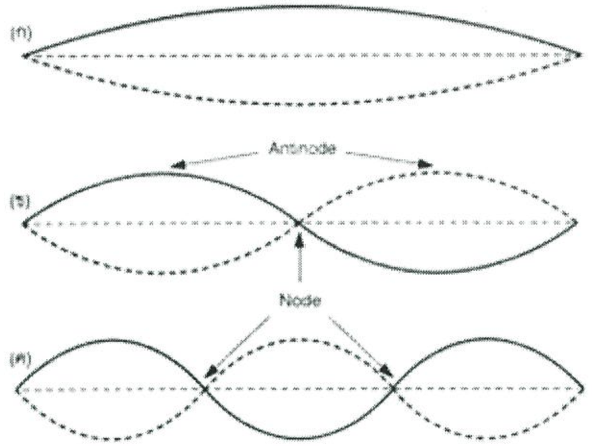
**รูปที่ 2.9** แสดงเงาเส้นสมมูลสำหรับการเลือกรูปคลื่นอย่างง่าย

ลักษณะสำคัญของเสียงที่มีความทุ้มแหลมของสียง (Pitch) ที่แน่นอนจะไม่เป็นรูปคลื่นเชิงซ้อน ซึ่งความทุ้มแหลมของเสียงนี้ก็คือความถี่นั่นเอง ความถี่ในการรับฟังที่ตอบสนองได้ไวที่สุดคือประมาณ 3000 Hz สำหรับรูปที่ 2.9 แสดงสเปกตรัมของแถบความถี่ตามแนวนอน และแทนค่าแอมปลิจูดในแนวดิ่ง ซึ่งบ่งบอกความสัมพันธ์ต่อกันของค่าความถี่ที่แตกต่างกันกับความแตกต่างของค่าแอมพลิจูด ดังรูปที่ 2.9 (ข) จะเห็นว่าค่าความถี่ 2f, 3f ต่างเป็นค่าความถี่เชิงซ้อนทั้งสิ้น โดยเรียกความถี่ 2f ว่าฮาร์มอนิกที่ 2 หรือ First overtones และความถี่ 3f เป็นฮาร์มอนิกที่ 3 หรือ Second overtone หากวงจรขยายมีการขยายสัญญาณผิดรูปคลื่นไปจากเดิม ซึ่งความถี่ฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเปอร์เซนต์ความเพี้ยน

**2.2.4 ความถี่สเปกตรัมของเสียงซ้ำ**

จากรูปที่ 2.9 ลักษณะคลื่นอย่างง่าย เส้นสเปกตรัมมีส่วนประกอบเดียวที่ความถี่ของรูปคลื่นไซน์เป็นความถี่มูลฐานในการออสซิลเลต ส่วนรูปคลื่นที่เกิดขึ้นซ้ำ เช่นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีความถี่มูลฐานเช่นเดียวกัน และประกอบด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่มูลฐานค่าต่างๆ กันโดยเรียกความถี่ที่สูงกว่านี้ว่า ความถี่ฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกประกอบด้วยเสียงที่มีความถี่เป็นทวีคูณของความถี่เดิมเป็นสองเท่า สามเวลาและสี่เวลา เป็นต้น เช่น เสียงที่มีความถี่เดิมเท่ากับ 100 Hz ประกอบด้วยฮาร์มอนิก 200 Hz 400 Hz และ 600 Hz จากรูปที่ 2.10 ความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น เป็นการสั่นสะเทือนตามจำนวนของโนดที่สอดคล้องกับผลคูณเลขจำนวนเต็มของความถี่เดิมของการสั่นสะเทือนของเส้นเชือก ความถี่จะสอดคล้องกับโนดของเส้นเชือกที่เคลื่อนที่ขึ้นและลงทั้งหมด ด้วยเหตุที่ฮาร์มอนิกสอดคล้องกับโนดตามรูปแบบของการสั่นสะเทือน คือแบ่งความถี่ฮาร์มอนิกตามค่าสูงสุดและต่ำสุดของการเคลื่อนที่ตามเส้นเชือก (ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แอนติโนด และโนด) สามารถมองเห็นโนดที่ 2 ทำให้เกิดเป็นค่ายอดสองค่าของการสั่นสะเทือน และโนดที่ 3 เกิดเป็นค่ายอดสามค่าตามลำดับจากรูปที่ 2.9 ความถี่มูลฐานจะมีค่าแอมปลิจูดสูงสุด แต่แอมปลิจูดของความถี่ฮาร์มอนิกจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่ไม่เสมอไป เช่น เสียงจากคลื่นดนตรีชนิดต่างๆ คือเปียโน ฉิ่ง และกลอง เป็นลักษณะของเสียงทั่วไปที่มักจะเกิดจากคลื่นความถี่ต่างๆ ผสมกันอย่างซับซ้อน แต่สามารถแยกได้เป็นคลื่นมูลฐาน หรือคลื่นฮาร์มอนิกต่างๆ แล้วประกอบเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดเป็นเสียงดนตรีที่มีความถี่แตกต่างกัน โดยเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่มูลฐานเดียวกัน ทั้งนี้ความถี่ที่สูงขึ้นระหว่างเครื่องดนตรีบางชิ้นอาจมีค่าแอมปลิจูดลดลงหรือสูงขึ้นดังรูปที่ 2.11 สำหรับการได้ยินเสียงความถี่มูลฐานหรือความถี่เดิมจะได้ยินชัดเจนที่สุด ดังนั้น เสียงที่เกิดจากคลื่นความถี่ต่างๆ จะผสมกันอย่างซับซ้อน แต่ยังสามารถแยกได้ว่าเป็นเสียงของคลื่นดนตรีชนิดใด เสียงแตกต่างกันอย่างไร มีชื่อเรียกว่าอะไร และมีคุณภาพของเสียงเป็นอย่างไร (Quality หรือ Timbre)

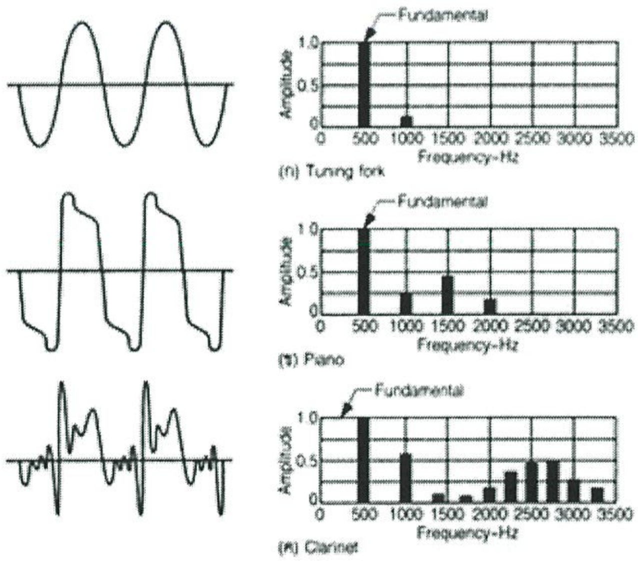



(ก) ความถี่มูลฐาน

(ข) ฮาร์มอนิกที่ 2 แอนติโนดมีแอมพลิจูดสูงสุด

(ค) ฮาร์มอนิกที่ 3 โนดแอมปลิจูดจะเป็นศูนย์

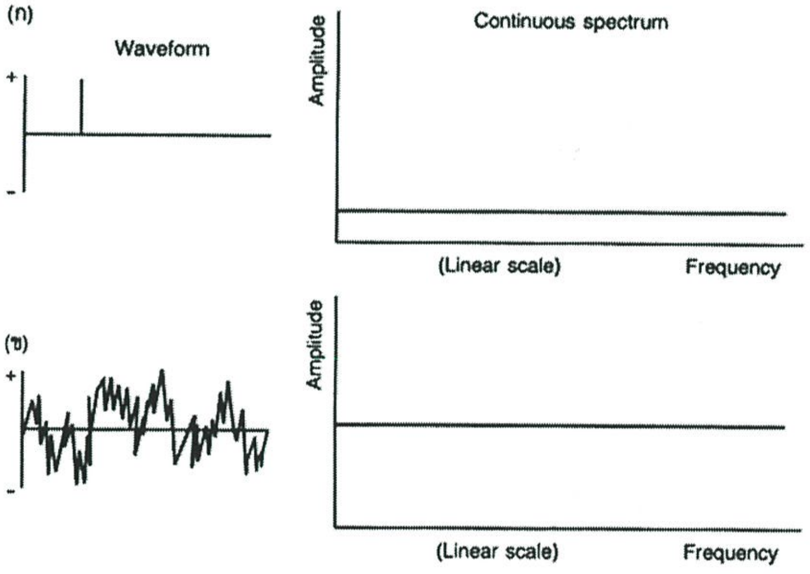
**รูปที่ 2.10** โนดการสั่นสะเทือนของเส้นเชือก




**รูปที่ 2.11** รูปคลื่นและความถี่สเปกตรัมของเสียงดนตรี

### 2.2.5 ความถี่สเปกตรัมของเสียงไม่ซ้ำ

ลักษณะของรูปคลื่นที่ไม่เกิดซ้ำๆ หรือคลื่นเดิม จะไม่มีความทุ้มแหลมของเสียงเกิดขึ้น เป็นเหตุให้สัญญาณรบกวนของเสียงมักปะปนกับความถี่เดิม ทำให้คุณภาพของเสียงตก ความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นเพราะเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ที่ป้อนเข้าวงจรขยายเสียง รวมทั้งอุปกรณ์ประกอบภายในวงจร สัญญาณรบกวนทางอุณหภูมิที่เป็นคุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์นั้นๆ ตลอดทั้งการเดินสายวงจร นอกจากนี้ยังมีความถี่ออสซิลเลตที่มีผลต่อวงจรขยาย หากเกิดออสซิลเลตนานๆ โดยไม่ปิดสวิตซ์เครื่อง ลำโพงและอุปกรณ์ภายในเครื่องอาจเกิดการเสียหายได้ จากรูปที่ 2.12 รูปคลื่นที่ปรากฏจะมีคลื่นเสียงแปลกปลอมเป็นสัญญาณรบกวนที่ประกอบด้วยความถี่หลายความถี่มีพลังงานคงที่ตลอดย่านความถี่สเปกตรัม เมื่อคิดค่าเฉลี่ยแถบของความถี่จะมีค่าเป็นเส้นตรง จึงเรียกว่าสัญญาณรบกวนขาว (White noise) และหากความถี่หลายความถี่ที่กล่าวมาแล้วมีความแรงของสัญญาณที่ปรากฏเท่าๆกัน ความถี่สเปกตรัมจะเป็นเส้นตรงตลอดย่านความถี่ แต่ถ้าค่าของความถี่สูงขึ้น สัญญาณของพลังงานจะลดลง เรียกว่าสัญญาณรบกวนชมพู (Pink noise) มีค่าเท่ากับพลังงานต่อออคเตฟ (Octave)



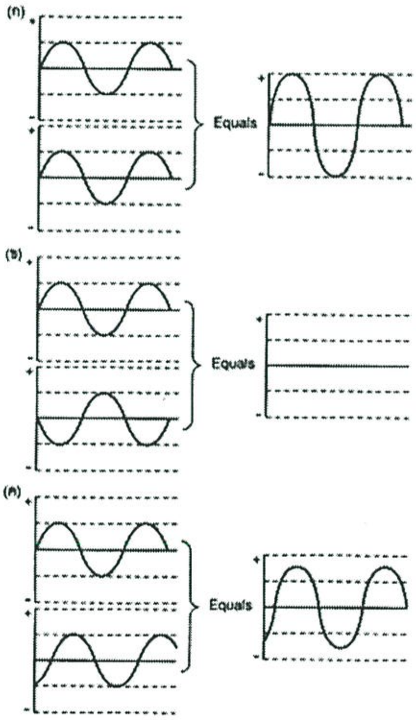

(ก) รูปพัลส์

(ข) สัญญาณรบกวน

**รูปที่ 2.12** ค่าความถี่สเปกตรัมของรูปคลื่นที่ไม่ซ้ำ

### 2.2.6 เฟส

หากคลื่นสองคลื่นมีความถี่และแอมปลิจูดเดียวกัน หรือเกิดขึ้นพร้อมกัน กล่าวคือ เริ่มต้นจุดเดียวกันและจบลงที่จุดเดียวกัน เรียกว่า คลื่นที่มีเฟสเดียวกัน (Inphase) ดังรูปที่ 2.13 ถ้าสัญญาณสองสัญญาณมีเฟสเดียวกัน ค่าแอมปลิจูดจะเป็นผลบวก หมายถึงความสูงของแอมปลิจูด จะมีค่าเป็นสองเท่า สำหรับคลื่นที่มีเฟสต่างกัน (Out of phase) เกิดจากคลื่นสองคลื่นที่มีความถี่และแอมปลิจูดเดียวกัน แต่เกิดขึ้นไม่พร้อมกัน กล่าวคือ คลื่นแรกจะเริ่มต้นทางครึ่งรอบบวก (Positive half-cycle) คลื่นหลังจะเริ่มต้นทางครึ่งรอบลบ (Negative half-cycle) ในลักษณะที่ตรงข้ามกัน ผลรวมที่ได้จะเป็นศูนย์ คือไม่มีสัญญาณนั้นเอง และอีกกรณีหนึ่งหากสัญญาณสองสัญญาณมีขนาดเท่ากัน แต่เฟสไม่ตรงกันแล้วนำมารวมกัน ผลที่ได้คือคลื่นบางส่วนจะเป็นผลบวก บางส่วนจะหักล้างกัน โดยผลรวมของคลื่นแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.13(ค)



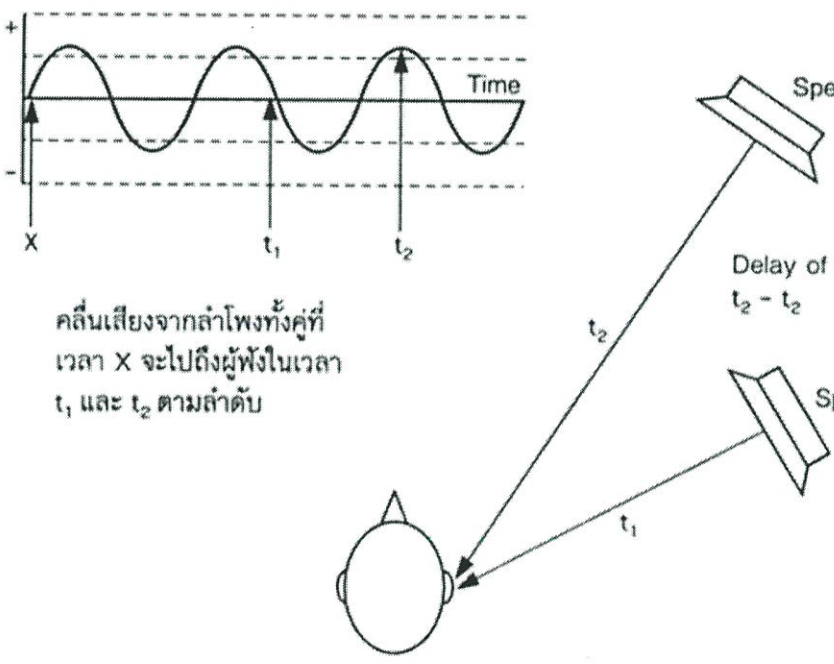

(ก) คลื่นที่ความถี่และเฟสเดียวกันจะทำให้ค่าแอมปลิจูดเป็นสองเท่า

(ข) คลื่นสองคลื่นที่เหมือนกันแต่มีเฟสต่างกันมารวมกัน ผลที่ได้จะเป็นศูนย์

(ค) คลื่นสองคลื่นที่เหมือนกันเพียงบางส่วนและมีเฟสต่างกัน ผลที่ได้จะเป็นการรวมจุดต่อจุด

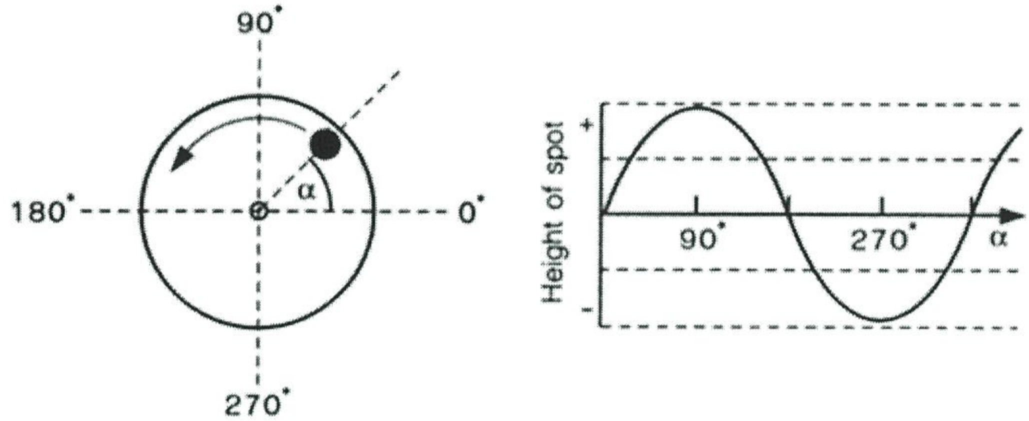
**รูปที่ 2.13** คลื่นที่มีเฟสเดียวกัน

ความแตกต่างระหว่างสัญญาณ ซึ่งเป็นผลจากการประวิงเวลาระหว่างคลื่นสองคลื่นเมื่อมีสองสัญญาณออกจากแหล่งกำเนิดที่มีระยะห่างจากผู้ฟังเท่ากัน จากเวลาที่กำหนด สัญญาณเสียงที่กล่าวมานี้ก็จะไปถึงผู้ฟังแต่ถ้าแหล่งกำเนิดเสียงหนึ่งมีระยะทางมากกว่าแหล่งกำเนิดอื่น การประวิงก็จะเกิดขึ้น ความสัมพันธ์ของเฟสจะขึ้นอยู่กับการประวิงเวลา ดังรูปที่ 2.14 ใช้กฎนิ้วหัวแม่มือเสียงจะเดินทางประมาณ 30 เซนติเมตร ต่อหนึ่งในพันวินาที ดังนั้น ถ้าแหล่งกำเนิดเสียงที่สองอยู่สูงกว่าแหล่งกำเนิดเสียงที่หนึ่ง 1 เมตร เป็นผลทำให้ระยะทางยาวกว่าแหล่งกำเนิดที่หนึ่งด้วย เวลาการประวิงก็จะมีมากกว่า 3 ms ความสัมพันธ์ทางเฟสระหว่างสองสัญญาณควรจะขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียงที่ 330 Hz เวลาประวิง 3 ms สอดคล้องกับหนึ่งความยาวคลื่น ทำให้การประวิงของสัญญาณเป็นไปตามลักษณะที่มีเฟสเดียวกันและไม่มีการประวิงสัญญาณถ้าใช้เวลาในการประวิงเพียงครึ่งเดียว (1.5 ms) แล้วสัญญาณทั้งสองควรจะมีเฟสที่ต่างกันที่ 330 Hz




**รูปที่ 2.14** การวางตำแหน่งลำโพงสองตัวให้คลื่นเสียงเดียวกันในเวลาเดียวกัน ความแตกต่างทางเฟสระหว่างคลื่นเสียงที่มีหูผู้รับฟังจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการประวิงเวลา $t_2$-$t_1$

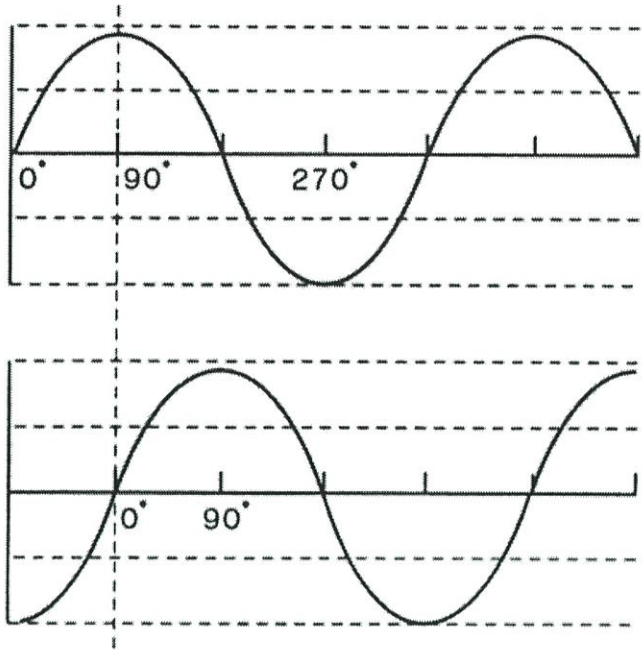
เมื่อกล่าวถึงเรื่องเฟสมักจะเกี่ยวข้องกับค่าองศาเสมอ โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 2.15 แสดงคลื่นรูปไซน์ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของจุดบนขอบนอกของแผ่นกลม เริ่มต้นจาก 0-360 องศา ต่อ 1 รอบ ซึ่งแต่ละองศาของมุมการเคลื่อนที่บนจุด จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกลับค่าไซน์ในตรีโกณมิติ เมื่อการเคลื่อนที่ของจุดมีมุม 90 องศา กราฟที่ได้จะมีค่าสูงสุดทางบวก ($\sin 90^\circ = 1$) และที่มุม 180 องศา กราฟจะมีค่าเป็นศูนย์ ($\sin 180^\circ = 0$) ที่ 270 องศาจะมีค่าสูงสุดทางลบ ($\sin 270^\circ = -1$) และที่ 360 องศา จะมีค่าเป็นศูนย์ต่อไป




**รูปที่ 2.15** ความสูงของจุดที่เปลี่ยนตามค่ามุมไซน์ ส่วนมุมของเฟสคือจำนวนองศาของการหมุนรอบ

ถ้าคลื่นสองคลื่นมีขนาดเท่ากันแต่เฟสไม่ตรงกัน ดังรูปที่ 2.16 คลื่นที่ 1 ต่างเฟสกัน 90 องศากับคลื่นที่ 2 นั้นก็คือเฟสทั้งสองจะต้องสัมพันธ์ต่อกันอย่างแท้จริง โดยเฉพาะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นซ้ำๆ กันอย่างต่อเนื่องเช่น ผลบางประการที่เกิดขึ้นต่อสัญญาณเสียงในภาวะชั่วครู่ในช่วงเวลาสั้นๆ คือ การเปิด-ปิดเครื่องขยายจะมีเสียงดังออกจากลำโพงทันทีทันใด ถึงแม้ว่าจะไม่เปิดเสียงก็ตาม และส่งผลให้ลำโพงเสียหายได้หากไม่แก้ไข ทั้งนี้เพราะสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับกระชากเข้าวงจรอย่างรวดเร็วนั้นเองจึงเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า เสียงในภาวะชั่วครู่ (Transient sounds)

เพราะฉะนั้นเรื่องของเฟสจึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับวงจรขยายเสียง กล่าวคือ เมื่อมีสัญญาณผ่านเข้าวงจร จะมีการเปลี่ยนแปลงทางแอมปลิจูดและเฟสขึ้น ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะเปลี่ยนไปตามค่าความถี่ต่างๆ โดยการเปลี่ยนแปลงแอมปลิจูดต่อความถี่เรียกว่า การตอบสนองต่อความถี่ (Frequency response) ส่วนเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปตามค่าความถี่ต่างๆ เรียกว่าการตอบสนองต่อเฟส (Phase response)

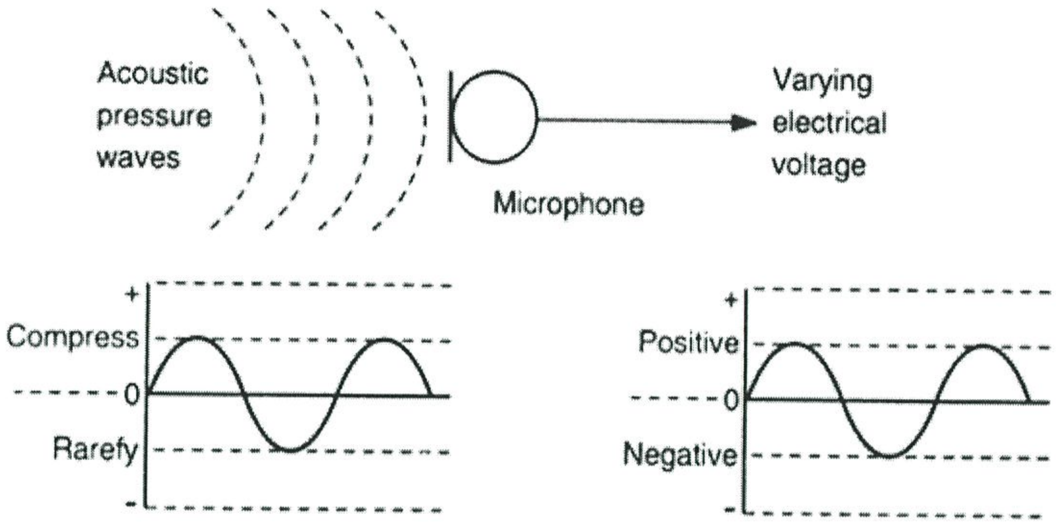



**รูปที่ 2.16** รูปคลื่นมีค่าต่ำกว่า 90 องศา ต่างเฟสกับรูปคลื่นที่มีจำนวนองศาสูงกว่า

**สรุป** การหักล้างทางเฟส หรือเฟสต่างกันมากกว่า 90 องศา ค่าแอมปลิจูดจะถูกลดทอนลงตามเฟสที่เลื่อนไป แต่ถ้าเฟสต่างกันคาบเวลาของคลื่นทั้งสองจะแตกต่างกันอีก ผลรวมจะมีทั้งเพิ่มและลดค่าแอมปลิจูด ตรงกันข้ามหากคลื่นสองคลื่นมีเฟสเดียวกัน ผลรวมค่าที่ได้จะเพิ่มมากขึ้น

**2.2.7 เสียงในรูปลักษณะทางไฟฟ้า**

เสียงที่ได้ยินจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ ขณะที่เสียงเดินทางไปในตัวกลาง อนุภาคของอากาศจะเกิดการอัดตัวและขยายตัว แรงกดอัดดังกล่าวเมื่อกระทบกับไมโครโฟน ส่งผลให้ไมโครโฟนทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยนำเสียงที่ได้ไปขยายบันทึกและผสมกับสัญญาณอื่นๆ เป็นต้น สำหรับแอมปลิจูดของสัญญาณที่เกี่ยวกับเสียงในทางไฟฟ้าหมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้านั่นเอง จากรูป 2.17 คลื่นรูปไซน์ที่ได้เกิดจากการอัดตัวและขยายตัวของอากาศ สัญญาณครึ่งบวกเกิดจากจังหวะอัด และในช่วงจังหวะขยายตัวของอากาศ จะได้สัญญาณครึ่งทางลบสลับกันไปเรื่อยๆ จึงเป็นเหตุให้เกิดค่าของกระแสไฟสลับ หรือ AC ขึ้น ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นจากสัญญาณเสียงจะนำไปใช้งานต่อไป




**รูปที่ 2.17** ไมโครโฟนทำหน้าที่เปลี่ยนความกดดันของอากาศที่เกิดขึ้นจากเสียงต่างๆ ให้เป็นการเปลี่ยนแปลงในรูปของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการอัดของอากาศจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าบวก และการขยายตัวของอากาศจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าลบ

ในระบบเอซี ค่าความต้านทานจะถูกแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่ประกอบด้วยค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ โดยรีแอกแตนซ์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของสัญญาณด้วย ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่สัญญาณความถี่ต่ำ และค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สัญญาณความถี่สูง ทั้งนี้จะไม่ให้กระแสไฟตรงไหลผ่าน ดังนั้นตัวเก็บประจุจะมีผลต่อค่าความถี่หรือเอซีนั่นเอง

**2.2.8 เดซิเบล**

เดซิเบล (Decibel) หรือ dB เป็นหน่วยพื้นฐานที่ใช้แพร่หลายในวิศวกรรมระบบเสียงจะพบเห็นอยู่บ่อยๆ เช่นเดียวกับหน่วยของโวลต์ หรือวัตต์ และใช้ในการวัดระดับสัญญาณเสียงโดยมีความสัมพันธ์กับลอการิทึม (Logarithm) ซึ่งวิศวกรโทรศัพท์ได้เรียกชื่อหน่วยนี้ว่า ลอการิทึมของอัตราส่วนระหว่างกำลังเสียงสองสัญญาณ และตั้งหน่วยพื้นฐานของระบบเป็นเบล (Bel) เพื่อให้เกียรติแก่อเล็กซานเดอร์ เกรแฮมเบลล์ ผู้คิดประดิษฐ์โทรศัพท์ขึ้นเป็นคนแรก

จะได้ค่า Bel ดังนี้

$$\text{Bel} = \log (P_1/P_2)$$

$$\text{dB} = 10\log (P_1/P_2)$$

ตัวอย่างเช่น ค่าความแตกต่างของเดซิเบลระหว่างสัญญาณของกำลังเสียง 1 และ 2 วัตต์ คือ 10 log (2/1) เท่ากับ 3dB

ถ้าเดซิเบลเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังเสียงสองสัญญาณ การเปรียบเทียบกับค่าอื่นๆ ที่นอกเหนือกำลังสัญญาณเสียง หมายถึงกำลังสัญญาณเสียงที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า จะได้ว่า

$$dB = 10 \log (V_1^2/ V_2^2) \quad \text{เมื่อ } P = V^2/R$$

$$= 10 \log (V_1/ V_2)^2$$

$$= 20 \log (V_1/ V_2)$$

ตัวอย่างเช่น ค่าความแตกต่างของเดซิเบลระหว่างสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ และ 2 โวลต์ คือ 20 log (2/1) เท่ากับ 6 dB

จากหน่วยวัด dB จะสามารถกำหนดเสียงที่หูมนุษย์ฟังได้ยินสูงสุดโดยไม่เป็นอันตรายต่อหู คือ อยู่ในช่วง 120 dB ลงมา ส่วนเสียงที่หูมนุษย์ฟังได้ยินเบาที่สุดคือ 0 dB ถ้าหาต่ำกว่า 0 dB จะฟังไม่ได้ยิน นอกจากนี้ระดับความดังของเสียง SPL (Sound Pressure Level) ใช้วัดค่าเป็น dB อ้างอิงกับความดันที่ $2 \times 10^{-5}$ $Nm^{-2}$ (0.0002ไมโครบาร์ หรือ 0.0002 $dyne/cm^2$) ที่ความถี่มาตรฐาน 1000 Hz

เมื่อ $SPL = 20 \log (P_2/ P_1)$

$SPL$ = ระดับความดังของเสียง (dB)

$P_2$ = ความดันของเสียงใดๆ ($Nm^{-2}$)

$P_1$ = ความดันของเสียงที่ระดับเปรียบเทียบ ($Nm^{-2}$)

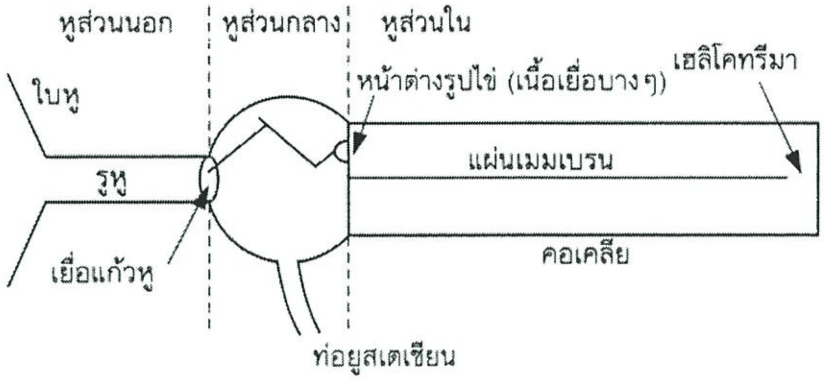
การทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการรับฟัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายขึ้นกับหูของมนุษย์ กล่าวคือ หูของมนุษย์เริ่มได้ยินเสียงเมื่อหูได้รับความดัน $2 \times 10^{-5}$ $Nm^{-2}$ จนกระทั่งความดังสูงสุดที่ 200 $Nm^{-2}$

**ตารางที่ 2.2** ระดับความดังของเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง

| แหล่งกำเนิดเสียง | ระดับความดังเสียง(dB) |
|---|---|
| เสียงเบาที่สุดที่หูมนุษย์เริ่มได้ยิน | 0 |
| เสียงลมหายใจ | 10 |
| เสียงใบไม้กระทบกันเมื่อลมพัด | 20 |
| เสียงในสำนักงานเงียบๆ | 30 |
| เสียงนกร้องระยะทางไกลๆ | 40 |
| เสียงในสำนักงานที่เปิดประตูทิ้งไว้ | 50 |
| เสียงสนทนาห่างกัน 3 ฟุต | 60 |
| เสียงสนทนาห่างกัน 1 ฟุต | 70 |
| เสียงวงดนตรีออเคสตร้าในระดับเฉลี่ย | 80 |
| เสียงพัดลมระบายอากาศขนาดใหญ่ | 90 |
| เสียงเลื่อยยนต์ | 100 |
| เสียงวงดนตรีคอนเสิร์ตแนวร็อค | 110 |
| เสียงเครื่องบินไอพ่นบินขึ้นในระยะ 1500 ฟุต | 120 |
| หูมนุษย์เริ่มได้รับอันตรายจากการได้ยิน | 130-140 |
| จุดทำให้หูหนวกเฉียบพลัน | 150-160 |

### 2.2.9 กลไกการรับฟังเสียงของมนุษย์

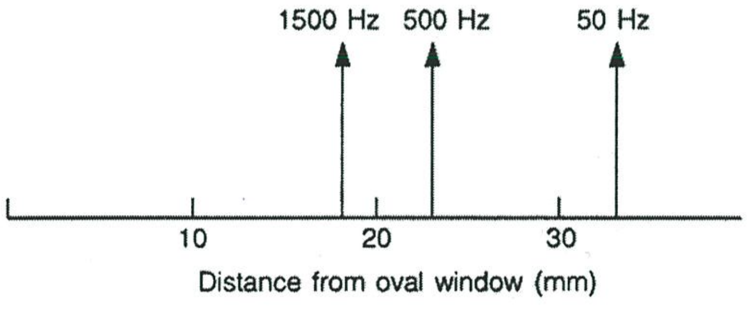
แม้ว่าจะไม่ใช่การศึกษาด้านสรีรศาสตร์โดยตรง แต่ก็มีควมจำเป็นต้องเรียนรู้ลักษณะและส่วนประกอบของหู ดังรูปที่ 2.18 เป็นแผนผังโครงสร้างภายในหูที่ประกอบด้วยกลไกที่สำคัญ 3 ส่วนคือ หูส่วนนอก ประกอบด้วยใบหู รูหูและเยื่อแก้วหู ซึ่งเป็นเยื่อบางๆ ต่อจากเยื่อแก้วหูคือหูส่วนกลาง ประกอบด้วยรูรูปค้อน กระดูกรูปทั่ง และกระดูกรูปโกลน ซึ่งทำหน้าที่สำคัญคือรับพลังงานสั่นสะเทือนที่ส่งมาจากเยื่อแก้วหู แล้วขยายสัญญาณเสียงที่สั่นสะเทือนผ่านเข้ายังหูส่วนใน ซึ่งเริ่มจากเนื้อเยื่อบางๆเรียกว่า โอวอลวินโดว์ (Oval window) หรือช่องรูปไข่ซึ่งติดกับกระดูกรูปโกลน ด้านในติดกับท่อรูปคล้ายหอยโข่งมีของไหลอยู่ภายในเรียกว่า คอเคลีย (Cochlea) และแผ่นบาซิลาร์เมมเบรน (Basilar membrane) ที่กั้นภายในคอเคลีย ช่วงปลายสุดของเยื่อบางบาซิลาร์เมมเบนระห่างจากหูส่วนกลาง โดยมีช่องว่างเล็กๆที่เรียกว่า เฮริโคทรีมา (Helicotrema) ที่ปล่อยให้ของเหลวไหลผ่านจากช่องที่สูงกว่าไปยังช่องที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ภายในคอเคลียมีเนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยประสาทรับเสียง และนำคลื่นเสียงที่ได้ส่งต่อไปยังสมอง โดยสมองจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณให้เป็นการรับรู้เกี่ยวกับ การได้ยินของเสียงต่อไป




**รูปที่ 2.18** แผ่นภาพกลไกอย่างง่ายของหู

### 2.2.10 ความถี่ที่มนุษย์สามารถรับฟังได้

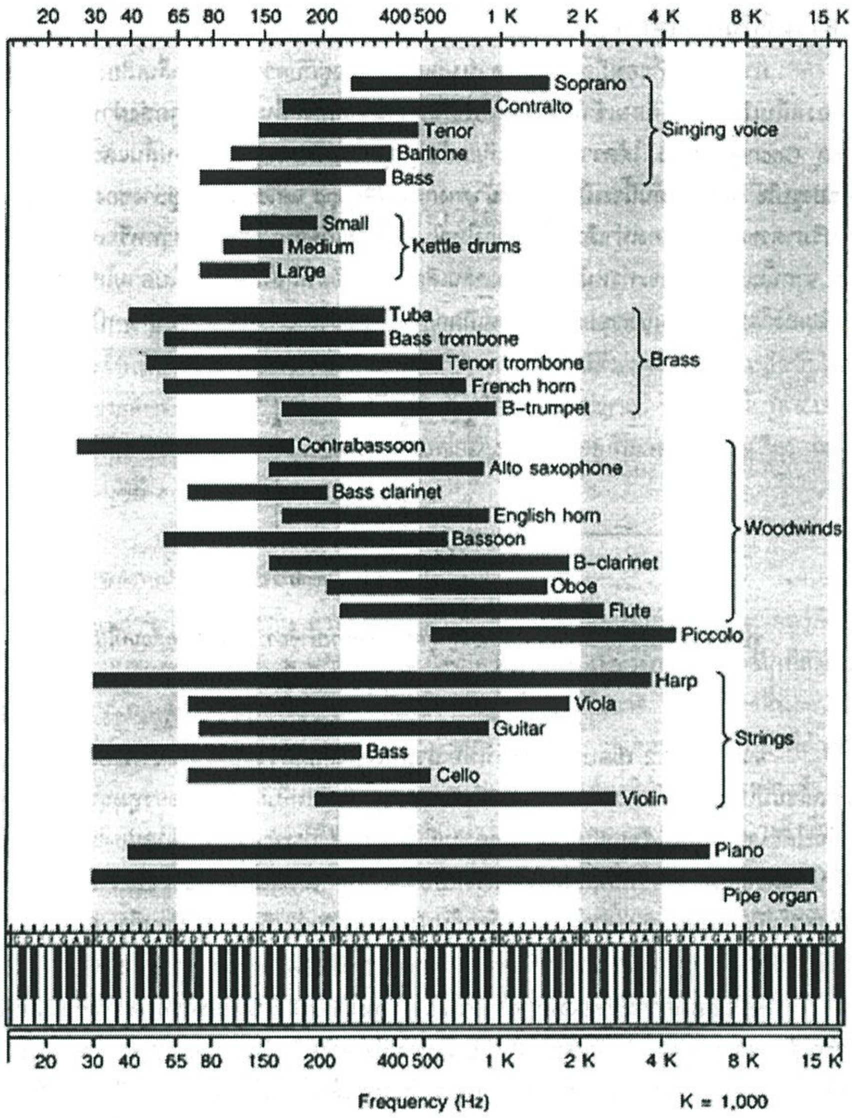
การเคลื่อนที่ของเยื่อบางบาซิลาร์เมมเบรน ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นเสียง นั่นคือ ส่วนยอดของคลื่นเสียงจะเคลื่อนเข้าใกล้ช่องรูปไข่ ความดันของคลื่นเสียงจะถูกส่งผ่านต่อเข้าไปในของไหล Cochlea fluid ได้ความดันเท่าเทียมกันทุกจุด แต่ถ้ากระดูกรูปโกลนสั่นและส่งผ่านความดันให้ช่องรูปไข่ ซึ่งความดันนี้จะเป็นผลให้หน้าต่างกลม (Round window) ที่อยู่ล่างช่องรูปไข่โป่งออกโดยที่ปริมาตรของไหลยังคงเท่าเดิม ทำให้ของไหลในคอเคลียเกิดสั่นปลายประสาทหรือเซลล์ขน (Hair cells) จากนั้นเซลล์ขนก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นให้เป็นอิมพัลส์ไฟฟ้า ส่งไปตามโสตประสาทถึงสมอง สมองก็จะแปลสัญญาณออกมา ทำให้เกิดการได้ยินเสียงเป็นคำพูด หรืออื่นๆ เป็นต้น




**รูปที่ 2.19** ตำแหน่งสั่นสะเทือนของเยื่อบางบาซิลาร์เมมเบรนเคลื่อนที่ไปทางช่องรูปไข่โอวอลวินโดว์เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของความถี่

จากรูปที่ 2.19 เยื่อบางบาซิลาร์เมมเบรน โดยเฉลี่ยมีความยาวประมาณ 3.5 เซนติเมตร ส่วนเซลล์ขนมีประมาณ 30,000 เส้น เมื่อพิจารณาความถี่เสียงกับการได้ยินของหูมนุษย์แล้วใช่ว่าหูมนุษย์จะได้ยินคลื่นเสียงได้ทุกชนิดเพราะที่ความถี่ต่ำมากๆ ประมาณ 30 Hz ลงไป หูมนุษย์จะไม่ได้ยิน แต่รับรู้ได้จากการที่คลื่นเสียงมากระทบประสาทหู จึงจำเป็นต้องใช้วงจรขยายเสียงเข้าช่วยสำหรับความถี่กลางจะมีแถบความถี่เกี่ยวกันประมาณ 200 Hz ขึ้นไปจนถึง 4000 Hz ส่วนความถี่ที่สูงกว่ามากจะฟังไม่ได้ยิน โดยพิจารณาได้จากเสียงเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ

การเลือกความถี่ของหูอาจกล่าวได้ว่า หูมนุษย์จัดเป็นวงจรกรองความถี่ชนิดหนึ่งที่สามารถเลือกความถี่เสียงได้ ถ้าเสียง 2 เสียงมีความถี่ต่างกันเล็กน้อย เช่น สัญญาณความถี่ 200 Hz และ 201 Hz ดังขึ้นพร้อมกัน ความดังรวมที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ จะมีจังหวะที่เสียงดังและไม่ดังสลับกันไป ปรากฏการณ์เช่นนั้นเป็นการสอดแทรกของคลื่นอย่างหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดบีต (Beat) ขึ้นเนื่องจากเสียง 2 เสียงที่มาถึงเยื่อแก้วหู ซึ่งเป็นเยื่อบางๆ จะเกิดการสั่นสะเทือน และส่งสัญญาณการสั่นสะเทือนเข้าไปยังหูส่วนกลางและหูส่วนใน ผลที่ได้จะเป็นการรวมของคลื่น จุดใดที่คลื่นมีเฟสเดียวกันเสียงก็จะดัง ข้าม จุดใดที่คลื่นมีเฟสต่างกันเสียงก็จะค่อย ความถี่ของบีต เรียกว่า Beat frequency มีความถี่เท่ากับผลต่างคือ 201-200 Hz เท่ากับ 1 Hz หูจะได้ยินบีต 1 ครั้งต่อวินาที แต่ถ้าหากมีค่าความแตกต่างมาก หูมนุษย์จะรับฟังไม่ทันและไม่รู้เรื่อง เช่นความถี่ของบีตเกิน 10 Hz เป็นต้น

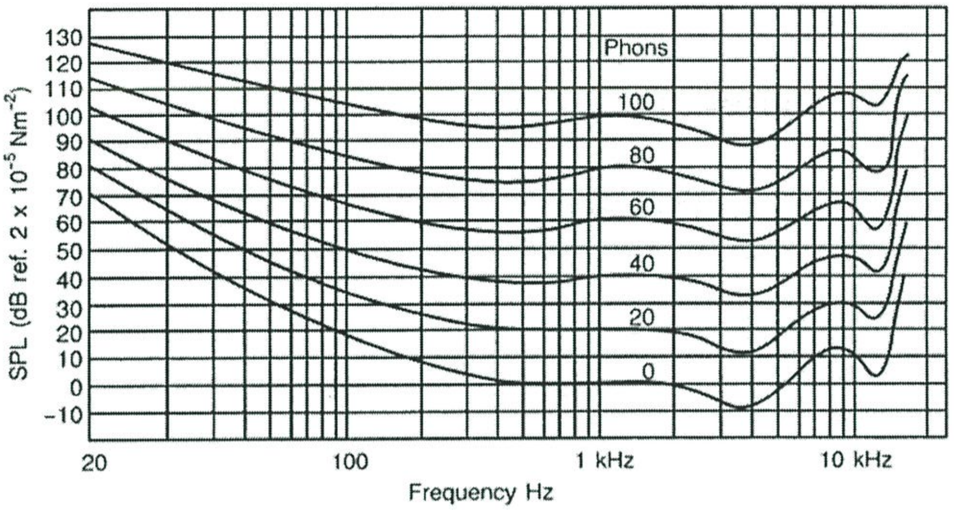



**รูปที่ 2.20** แถบความถี่ของเสียงเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ

### 2.2.11 ความดังของเสียงกับการได้ยิน

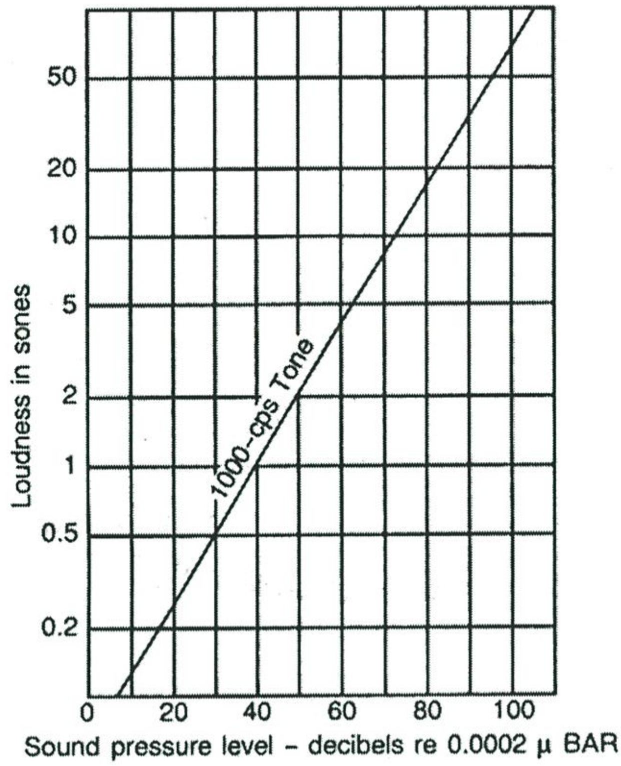
ความดังของเสียงเป็นการวัดเสียงจากความรู้สึกของการได้ยิน และมีความสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของเสียงและความถี่ของเสียง โดยหน่วยวัดความดังของเสียงคือฟอน (Phon) ณ ความถี่ของเสียง 1000 Hz ถ้าระดับความเข้มข้นเป็น 0 dB หมายถึงเสียงที่พอจะได้ยินเรียกว่า Threshold of hearing ตรงกับความดัง 0 ฟอน หากต่ำกว่าระดับนี้หูจะฟังไม่ได้ยิน และถ้าระดับความดังของเสียงเป็น 140 ฟอน เรียกว่า Threshold of pain เสียงจะดังมากจนเจ็บเยื่อแก้วหู ดังรูปที่ 2.21 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นของเสียง (แกนตั้งสเกลธรรมดา) อ้างอิงความดันที่ $2\times10^{-5}$ $Nm^{-2}$ กับความถี่เสียงที่หูมนุษย์ฟังได้ยิน (ใช้แกนนอนโดยแบ่งสเกลเป็นลอการิทึม) เส้นกราฟแต่ละเส้นจะบอกให้เราทราบว่า บนเส้นกราฟนั้นๆ เสียงมีความดังเท่ากัน

จึงเรียกกราฟที่ได้นี้ว่ากราฟแสดงหน่วยความดังของเสียงในหน่วยที่เป็นฟอน ซึ่งตัวเลขที่แสดงความดังของเสียงเป็นฟอน จะเป็นตัวเลขเดียวกับที่บอกระดับความเข้มข้นของเสียง เมื่อความถี่เป็น 1000 Hz




**รูปที่ 2.21** กราฟความดังของเสียงในหน่วยที่เป็นฟอน

เนื่องจากฟอนเป็นหน่วยความดังของเสียงที่ไม่เป็นสัดส่วน กล่าวคือ เสียง 10 ฟอนไม่ดังเป็น 2 เท่าของเสียง 5 ฟอน จึงมีหน่วยความดังของเสียงอีกหน่วยหนึ่งเรียกว่า โซน (Sone) ซึ่งเป็นหน่วยความดังของเสียงที่เป็นสัดส่วนคือ เสียง 2x โซน จะดังเป็น 2 เท่าของเสียง x โซน หน่วยความดังของเสียงฟอนและโซนมีความสัมพันธ์กัน โดยค่าความดังของเสียง 1 โซน ประมาณเท่ากับ 40 ฟอน หากความดังในหน่วยฟอนเพิ่มขึ้น 10 ฟอน คือเป็น 50 ฟอน ความดังในหน่วยโซนจะเพิ่มขึ้น 2 เท่าเสมอไป คือเป็น 2 โซน ในทางตรงกันข้ามถ้าความดังในหน่วยฟอนลดลงจากเดิม 10 ฟอน ความดังในหน่วยโซนจะลดลงครึ่งหนึ่งของค่าเดิม ดังรูปที่ 2.22 ความดังของเสียงบนเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นสเกลเชิงเส้น



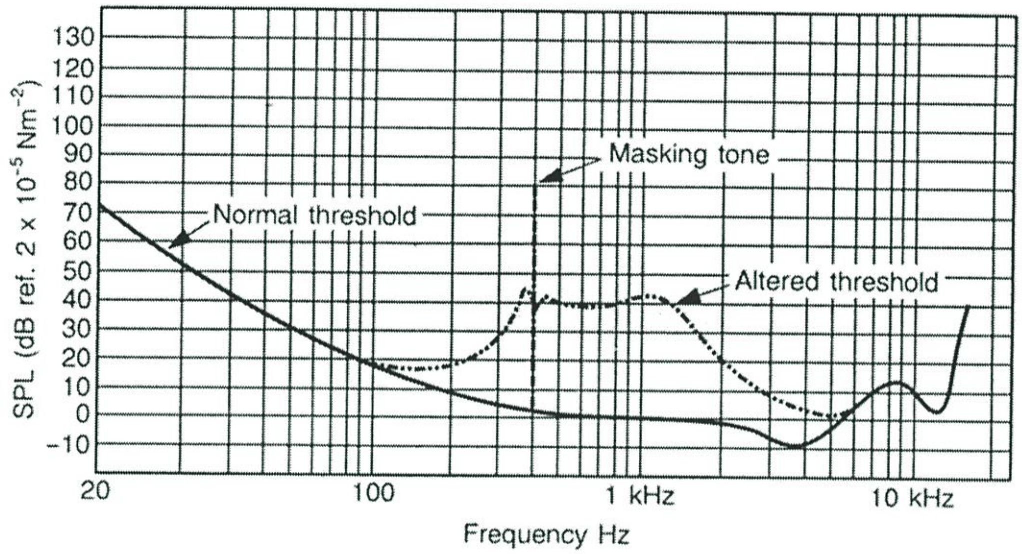

**รูปที่ 2.22** กราฟความสัมพันธ์ความดังของเสียงในหน่วยฟอนและโซน

**ตารางที่ 2.3** ค่าความดังของเสียงในหน่วยฟอนและโซน

| แหล่งกำเนิดเสียง | ความดัง (ฟอน) | ความดัง (โซน) |
|---|---|---|
| เครื่องบินไอพ่นขนาดใหญ่อยู่เหนือศีรษะ 125 ฟุต | 140 | 1020 |
| เครื่องบินใบพัดขนาดใหญ่อยู่เหนือศีรษะ 125 ฟุต | 130 | 510 |
| วงดนตรีวงใหญ่ขณะแสดงคอนเสิร์ต | 120 | 255 |
| เครื่องเจาะถนนคอนกรีตในระยะ 125 ฟุต | 90 | 32 |
| โรงอาหารในโรงเรียนขณะพักกลางวัน | 80 | 16 |
| สำนักงานที่มีคนพลุกพล่าน | 70 | 8 |
| รถไฟระยะห่าง 1.5 ไมล์ | 65 | 6 |
| การจราจรข้างถนนเวลารถน้อยๆ | 55 | 3 |

หูมนุษย์จะฟังเสียงได้ค่อยที่สุด 0 ฟอนจนถึงความดังที่สุด 140 ฟอน เป็นย่านการเปลี่ยนแปลงความดัง (Dynamic range)

อีกตัวประกอบหนึ่งที่สำคัญ ณ จุดความดังของเสียงที่พอจะฟังได้ยิน (Threshold of hearing) ถูกยกขึ้นไปให้สูงที่ความถี่หนึ่ง โดยเฉพาะกับอีกเสียงหนึ่งที่มีความถี่คล้ายคลึงกัน โดยเสียงหนึ่งจะถูก Masking (ปิดบังหรือกลบ) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ขณะที่รับฟังเสียงหนึ่งอยู่จะมีอีกเสียงหนึ่งค่อยๆ มีความดังมากขึ้น จึงทำให้ไม่ได้ยินเสียงแรก เพราะว่าเสียงที่สองมีความดังมากกว่าและจะปิดบังหรือกลบเสียงแรก ดังรูปที่ 2.23




**รูปที่ 2.23** กราฟขณะเกิด Masking tone

**2.2.12 แบนด์วิดท์เสียง**

แบนด์วิดท์ หมายถึงแถบความกว้างของสัญญาณความถี่ หรือช่วงความถี่ของอุปกรณ์ที่มีต่อระบบส่งผ่านสัญญาณ กล่าวโดยสรุปจะได้ว่า แบนวิดท์คือระยะห่างระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดของแบนด์วิดท์ที่ระบุไว้ ตัวอย่างเช่น หูมนุษย์จะมีแบนด์วิดท์ของการได้ยินอยู่ระหว่าง 20 Hz ถึง 20000 kHz และมีความกว้างของย่านความถี่เป็น 19980Hz ซึ่ง IEC (International Electrotechnical Commission) ได้กำหนดช่วงความถี่เสียงเป็น 22.4 Hz ถึง 22.4 kHz ส่วนการวิเคราะห์ย่านความถี่เสียงจะเป็นการวิเคราะห์การวัดเสียงรบกวนเพราะหากเสียงรบกวนเกิดขึ้นในย่านความถี่เสียงสม่ำเสมอ จะเป็นผลทำให้การวัดระดับเสียงเปลี่ยนไป ค่าแบนด์วิดท์ก็จะเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปจากเดิม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรฟิลเตอร์โดยใช้ย่านความถี่ในแต่ละออคเตฟ เพราะแต่ละออคเตฟจะมีความถี่เสียง 2 ความถี่ คือความถี่ที่สูงกว่าจุดตัด (upper cut off) และความถี่ที่ต่ำกว่าจุดตัด (lower cut off) เป็นอัตราส่วนต่อกันช่วงความถี่ของแบนด์วิดท์ที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับวงจรฟิลเตอร์ชนิดต่างๆ เช่น

Low-pass จะยอมให้ความถี่ที่ต่ำกว่าที่กำหนดผ่านได้

High-pass จะยอมให้ความถี่ที่สูงกว่าที่กำหนดผ่านได้

Band-pass จะยอมให้ความถี่ในช่วงที่กำหนดผ่านได้ ส่วนความถี่ที่นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกลดทอนขนาดของสัญญาณลง

All-pass จะยอมให้ความถี่ผ่านไปได้ โดยไม่ลดทอนขนาดของสัญญาณ ทั้งนี้อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเฟสของสัญญาณที่อาจเกิดขึ้นบางความถี่เท่านั้น

## 2.3 ไมโครโฟนเบื้องต้น

ไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์พื้นฐานชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง กล่าวคือ เปลี่ยนพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยหลักการแล้วจะตรงกันข้ามกับลำโพงที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานเสียง ซึ่งพลังงานเสียงจะเคลื่อนที่ในลักษณะของคลื่น มีขนาดและความถี่ปนกันออกไป โดยไมโครโฟนจะใช้คุณลักษณะการเคลื่อนที่แบบคลื่นของพลังงานเสียงมาแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งไมโครโฟนที่อยู่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุ

### 2.3.1 คุณลักษณะของไมโครโฟน

คุณลักษณะของไมโครโฟน (Microphone Characteristics) การเลือกไมโครโฟนไปใช้งานจะต้องพิจารณาถึงขนาดและรูปร่างให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วต้องพิจารณาถึงลักษณะจำเป็นของไมโครโฟนดังต่อไปนี้

**ผลตอบสนองต่อความถี่**

ไมโครโฟนจะตอบสนองตลอดย่านความถี่ที่ต้องการเท่ากัน ดังนั้นในระบบที่มีคุณภาพสูงกราฟของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะลากย้อนความถี่ของระดับอินพุตเสียงที่คงที่ตลอดย่าน 20-20000 Hz ซึ่งควรจะเป็นเส้นตรง แต่ไมโครโฟนรุ่นเก่าคงจะทดสอบได้ลำบาก ตรงกันข้ามกับไมโครโฟนในปัจจุบันที่สามารถเลือกให้ตรงกับตัวอย่างกราฟแสดงการตอบสนองความถี่ที่เกี่ยวข้อง ปัจจุบันตลอดย่านความถี่อาจจะไม่จำเป็นมากนัก เนื่องจากมีย่านความถี่แคบๆสำหรับไมโครโฟนโดยเฉพาะที่ใช้ในยวดยานพาหนะหรืออากาศยานที่พอจะสื่อสารถึงกัน ในขณะที่รอบๆข้างมีเสียงรบกวน โดยเฉพาะนักร้องก็สามารถเลือกใช้ไมโครโฟนที่มุ่งเน้นคุณภาพของเสียงช่วงความถี่ที่ตอบสนองดี เสียงเพลงจึงไพเราะ ส่วนไมโครโฟนที่ใช้สำหรับผู้อ่านข่าวจะมีที่หนีบติดไว้ตรงหน้าอกเสื้อ เป็นไมโครโฟนชนิดลาวาเลีย (Lavalier) ก็ต้องการการตอบสนองความถี่เท่าเทียมกัน

**ความไวของไมโครโฟน**

ความไวของไมโครโฟน คือความสามารถในการรับสัญญาณได้ไวมากน้อยเพียงใด เช่น ไมโครโฟนบางชนิดพูดเสียงค่อยๆ ก็สามารถเก็บเสียงขยายออกลำโพงได้ แต่บางแบบพูดเสียงดังก็ไม่มีเสียงขยายออกลำโพง ส่วนประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงของไมโครโฟนคือ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากระดับความดังของเสียง (Sound Pressure Level) มาตรฐาน SPL ถูกกำหนดโดย IEC และมาตรฐานของอังกฤษ กล่าวคือ ขณะเปิดวงจร (ปลดโหลด) ค่าแรงดันเอาต์พุตจากแรงกดที่ทำให้เกิดเสียงด้านอินพุตมีค่า 1 Pascal (10 ไมโครบาร์) จากความสอดคล้องนี้ค่าความดังของเสียงเมื่อ 1 Pa เท่ากับ 94 dB ซึ่งอยู่สูงกว่าระดับของเสียงที่พอจะฟังได้ยิน (Threshold of hearing) หรืออาจจะใช้ค่าอ้างอิงพิกัดจากแรงดันเอาต์พุต 74 dB (1 μbar) เป็นความไวในการรับสัญญาณของไมโครโฟนก็ได้ หรือระดับปกติของการพูดที่ระยะห่าง 20 cm ลักษณะปกติของไมโครโฟนถ้ามีขนาดใหญ่จะมีความไวสูง แต่ตอบสนองความถี่ต่ำ ตรงกันข้ามกับไมโครโฟนขนาดเล็กจะมีความไวต่ำ แต่ตอบสนองความถี่สูง

**เสียงรบกวนจากภายในตัวไมโครโฟน**

ระดับเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากไมโครโฟนรวมทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากวงจรขยายสัญญาณควรจะมีค่าต่ำมากๆ ซึ่งถือเป็นความต้องการที่สำคัญในการเข้าสู่การบันทึกด้วยระบบดิจิตอล เช่น คอมแพ็กดิสก์ (CD) ซึ่งมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) ที่มากกว่า 90 dB ถือเป็นเรื่องปกติ เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากตัวไมโครโฟนโดยทั่วไปถือปีนค่าสมมูลของ SPL ที่ให้ค่าเป็นแรงดันเอาต์พุตเช่นเดียวกันมีค่า 15-20 dBm SPL คือระดับเสียงรบกวนแวดล้อมในห้องบันทึกเสียงที่ดีที่สุด ที่สอดคล้องกับค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิประมาณ -129 dBm

**ความเพี้ยน**

สำหรับรูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้าที่แสดงให้เห็นรูปคลื่นเสียงเดิมที่ปราศจากจากคลื่นฮาร์มอนิกจะไม่มีความเพี้ยน ความเพี้ยนไม่เชิงเส้นต้องมีค่าต่ำ เช่น ความพี้ยนส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับระดับสัญญาณสูงๆ และการทำงานที่โหลดเกิน อัตราความเพี้ยนของไมโครโฟนปกติใช้ค่าเช่นเดียวกับค่าสูงสุด SPL ซึ่งสามารถให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมได้ ซึ่งอาจมีค่าเป็น 130 dB ที่ 0.5% THD

## 2.4 การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า [6]

### 2.4.1 ความจุไฟฟ้า

ค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าคาพาซิแตนซ์คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนของประจุไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุสามารถประจุได้ ใช้ตัวย่อว่า “C” ซึ่งเป็นความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุนั่นเอง ค่าความจุไฟฟ้า “C” แสดงได้ในสมการที่ 2.1

$$C = \frac{Q}{V} \tag{2.1}$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad) ย่อว่า F

Q คือ ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ย่อว่า C

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) ย่อว่า V

จากความสัมพันธ์ของสมการ 2.1 สามารถเขียนสรุปความหมายของค่าความจุไฟฟ้าได้ว่า ความจุไฟฟ้า 1 ฟารัด หมายถึง เมื่อเราป้อนแรงดัน 1 โวลต์เข้าที่ขั้วทั้งสองของตัวเก็บประจุ แล้วทำให้เกิดประจุไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ขึ้นที่แผ่นโลหะแต่ละแผ่นของตัวเก็บประจุ เราถือว่าตัวเก็บประจุนี้มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 1 ฟารัด

หน่วยของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคือ ฟารัด (F) ซึ่งในงานทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรเครื่องรับวิทยุ ในแผ่นวงจรพิมพ์ และ วงจรอื่นๆ มักจะมีตัวเก็บประจุเป็นตัวประกอบที่สำคัญเสมอ ในทางปฏิบัติจริง ตัวเก็บประจุที่ใช้จะมีค่าอยู่ในรูปของไมโครฟารัด (μF) และ พิโคฟารัด (pF)

### 2.4.2 สนามไฟฟ้า แรงระหว่างประจุ และพลังงานในตัวเก็บประจุ

สิ่งที่ตัวเก็บประจุเก็บไว้ในแผ่นตัวนำทั้งสอง คือ ประจุไฟฟ้า (Q) แต่สิ่งที่แฝงอยู่ในรูปพลังงานระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองคือ สนามไฟฟ้า “Electric Field” สนามไฟฟ้านี้จะเกิดอยู่ในสารที่เป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งอยู่ในรูปของเส้นแรงไฟฟ้า (Line of Force) เป็นไปตามกฎของคูลอมบ์

กฎของคูลอมบ์ “Coulomb’s Law” ผลของเส้นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง มีค่าเท่ากับค่าคงที่ตัวหนึ่งคูณกับประจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำทั้งสอง และหารด้วยระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำยกกำลังสอง เป็นไปดังสมการ 2.2

$$F = \frac{kQ_1Q_2}{d^2} \qquad (2.2)$$

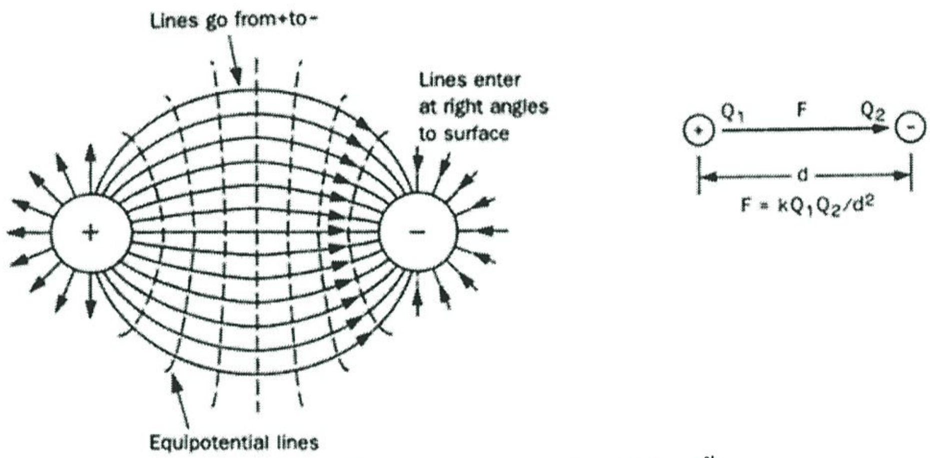
เมื่อ F คือ แรงในหน่วยของนิวตัน (N)

$Q_1Q_2$ คือ ประจุไฟฟ้าในแผ่นตัวนำที่ 1 และ 2 มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

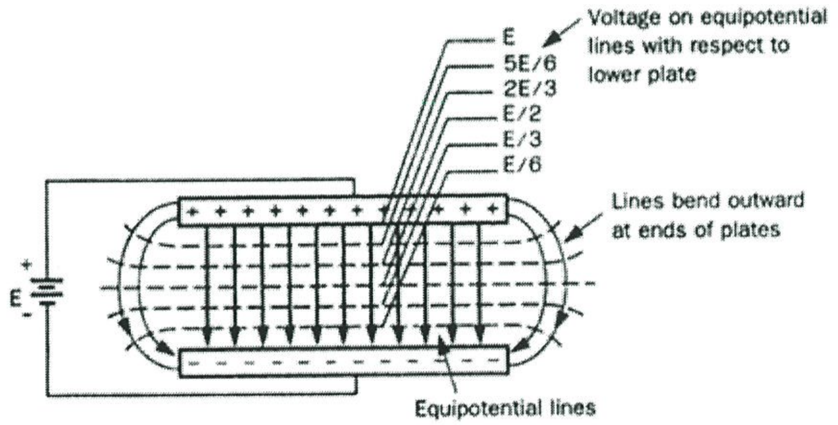
d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง หน่วยเป็นเมตร (m)

k คือ Proportionality Constant = $9 \times 10^9$

ลักษณะทิศทางของเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 2.24 คือมีทิศทางเคลื่อนที่จากแผ่นตัวนำที่มีประจุบวกไปสู่แผ่นที่มีประจุลบ และขนาดของเส้นแรง F ดังสมการ 2.2 แสดงรายละเอียดในรูป 2.24




(ก) สนามไฟฟ้าและแรงระหว่างประจุไฟฟ้าทั้งสอง




(ข) แรงดันไฟฟ้าระหว่างเพลทโลหะทั้งสองและระยะห่างระหว่างเพลทโลหะ

**รูป 2.24** สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างเพลททั้งสองของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

พลังงานที่ถูกสะสมในตัวเก็บประจุนั้น พิจารณาจากผลรวมของเส้นแรง (F) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับประจุ $Q_1$ และ $Q_2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ก) ซึ่งสมการหาค่าพลังงานสะสมภายในตัวเก็บประจุ (Work หรือ W) ดังแสดงในสมการ 2.3

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \qquad (2.3)$$

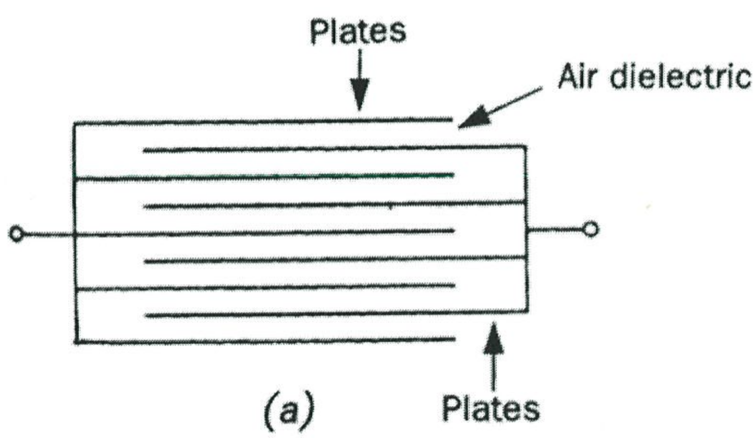
เมื่อ W คือ งาน มีหน่วยเป็นจูล (Joule, J)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นฟารัด (Farads, F)

V คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt, V)

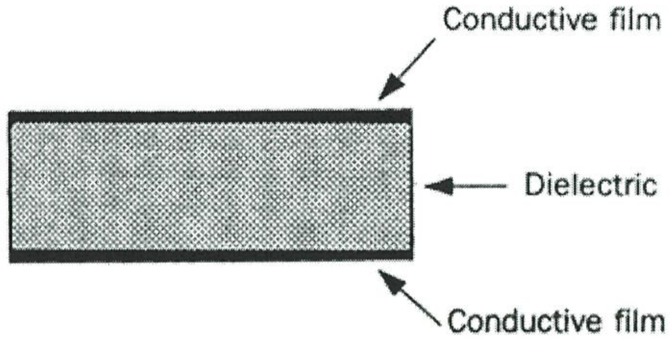
### 2.4.3 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่สามารถสะสมหรือเก็บประจุไฟฟ้าเอาไว้โดยอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า ค่าประจุไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานที่ถูกสะสมเก็บไว้ในตัวเก็บประจุเราเรียกว่า “ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)” โครงสร้างเบื้องต้นของตัวเก็บประจุประกอบด้วยแผ่นตัวนำ (Conductive Plate) 2 แ ผ่นวางขนานกัน ตรงกลางคือวัสดุที่เป็นฉนวน (Insulating Material) ซึ่งอาจใช้ฉนวนได้หลายแบบแต่เรียกรวมว่า “ไดอิเล็กตริก (Dielectric)” ที่แผ่นตัวนำทั้งสองจะถูกต่อด้วยลวดตัวนำออกมาเป็นขาทั้ง 2 ข้างเพื่อนำไปใช้งาน ลักษณะโครงสร้างแสดงใน รูป 2.25 (ก), (ข), (ค) และสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแสดงในรูป 2.26

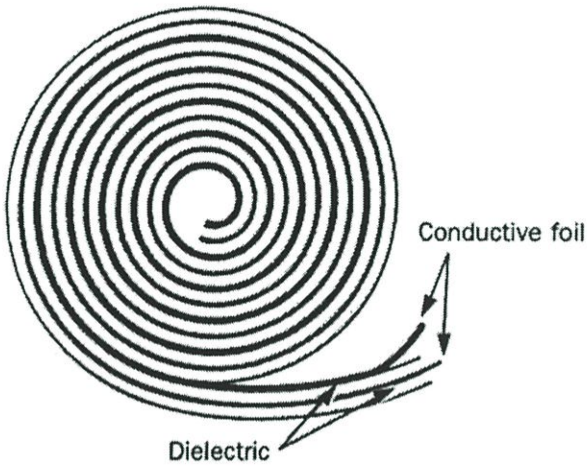



(ก) ลักษณะโครงสร้างแบบโลหะ

**รูปที่ 2.25** ลักษณะของความจุไฟฟ้าแบบต่างๆ




(ข) ลักษณะโครงสร้างแบบชั้นฟิล์ม




(ค) ลักษณะโครงสร้างแบบขด

**รูปที่ 2.25(ต่อ)**

(ก) สัญลักษณ์ความจุไฟฟ้าแบบไม่มีขั้ว

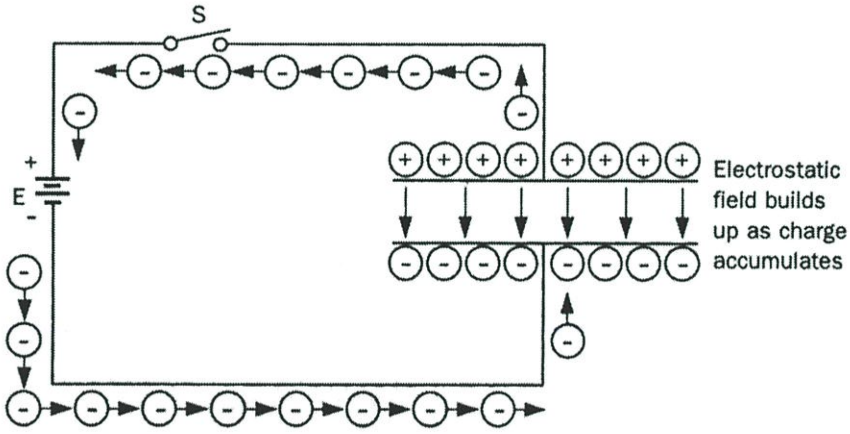
(ข) สัญลักษณ์ความจุไฟฟ้าแบบปรับได้


(ค) สัญลักษณ์ความจุไฟฟ้าแบบมีขั้ว

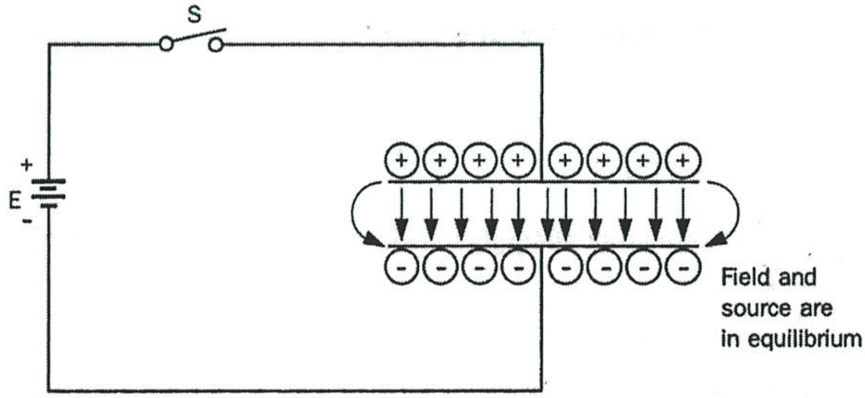
**รูปที่ 2.26** สัญลักษณ์ความจุไฟฟ้า

**การเก็บประจุไฟฟ้า**

การเก็บประจุเริ่มต้นเมื่อเรานำแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เช่น แบตเตอรี่มาต่อเข้ากับขั้วทั้งสองของตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูป 2.27 (ก) (E คือแบตเตอรี่) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแผ่นตัวนำ + เข้าสู่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ โดยผลจากแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้าระหว่างขั้วกัน ทำให้แผ่นตัวนำ + สูญเสียอิเล็กตรอนไป ทำให้สภาพทางไฟฟ้าของแผ่นตัวนำ + มากขึ้น ในทำนองเดียวกันขั้วลบของแบตเตอรี่จะผลักดันให้อิเล็กตรอนที่รับมาจากแผ่นตัวนำ + ให้ไหลเข้าสู่แผ่นตัวนำ – ผลคือ แผ่นตัวนำ – จะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบมากขึ้น กระบวนนี้จะดำเนินการต่อไปจนกระทั่งความต่างศักย์ของแผ่นตัวนำทั้งสองมีค่าเท่ากันกับความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ จึงจะหยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเข้าไปประจุในแผ่นตัวนำทั้งสองอีก ขั้นตอนตั้งแต่ในรูป 2.27(ก) จนถึง 2.27(ข) เราเรียกว่า การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ (Capacitor Stores Charge)




(ก) ก่อนการเก็บประจะ




(ข) หลังการเก็บประจุ

**รูปที่ 2.27** การเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

**2.4.4 ตัวประกอบที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ**

มีตัวประกอบทางด้านโครงสร้างภายในที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆ 3 ประการคือ

1. พื้นที่ของแผ่นตัวนำ
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ
3. ชนิดของฉนวนไดอิเล็กตริก

ฉนวนแต่ละชนิดที่ใช้ในตัวเก็บประจุจะมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเช่นกัน ฉนวนทุกชนิดจะมีค่าคงที่ตัวหนึ่งเรียกว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกใช้อักษรกรีกเป็นตัวย่อคือ “$\varepsilon_r$” อ่านว่า เอปซิลอน (Epsilon) ค่าของตัวเก็บประจุจะขึ้นกับชนิดของฉนวน ซึ่งฉนวนชนิดต่างๆ จะมีค่า $\varepsilon_r$ ไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r$) ของฉนวนต่างๆ

| วัสดุ | $\varepsilon_r$ |
|---|---|
| อากาศ | 1.0006 |
| แบคคาไลต์ | 7 |
| เซรามิก | 100 |
| สตรอนเซียม ไทเทเนต | 7,500 |
| แก้ว | 7.5 |
| ไมก้า | 5 |
| น้ำมัน | 4 |
| กระดาษ | 2.5 |
| ฟิล์มพลาสติก | 2.5 |
| กระเบื้องเคลือบ | 6 |
| ยาง | 3 |
| เทฟลอน | 2 |

**2.4.5 การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ**

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคำนวณได้จากสมการ 2.4

$$C = \frac{\in_0 x \in_r xA}{d} \quad (2.4)$$

เมื่อ C คือ ความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (F)

A คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร ($m^2$)

$\varepsilon_r$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวน

$\varepsilon_0$ คือ ค่า Permittivity ของสุญญากาศ = $8.8 \times 10^{-12}$ F/m

D คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง มีหน่วยเป็นเมตร (m)

**2.4.6 ความคงทนไดอิเล็กตริก**

ค่าความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) ของวัสดุต่างๆ ที่ใช้เป็นฉนวนไดอิเล็กตริกในตัวเก็บประจุนั้น คือ ความสามารถของวัสดุที่จะทนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ ซึ่งแปรไปตามความหนาของฉนวนวัสดุดังกล่าว ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงเกินกว่าที่วัสดุจะทนได้จะเกิดค่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage,BV) ค่าแรงดัน BV เป็นไปดังสมการ (2.5)

$$BV= (d) (\text{Dielectric Strength}) \quad (2.5)$$

เมื่อ BV คือ Breakdown Voltage (V)

D คือ Spacing (mm)

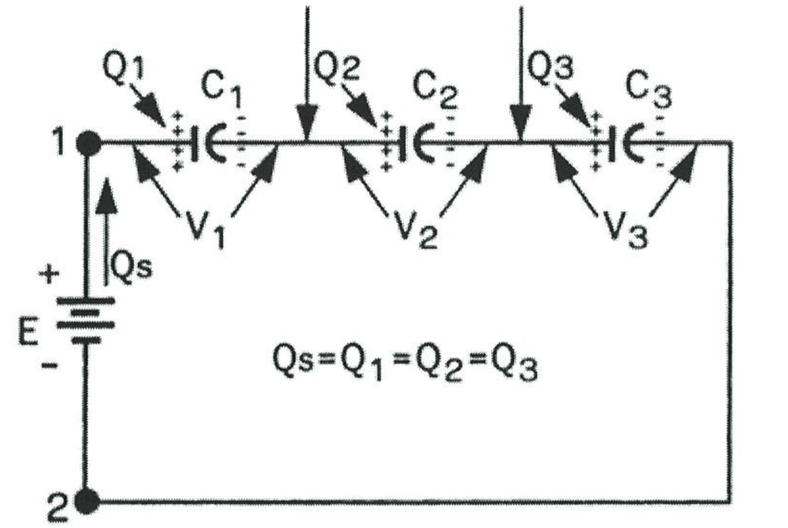
Dielectric Strength คือ ค่าคงที่หน่วยเป็น (V/mm) พิจารณาจากสมการ 2.2

**ตารางที่ 2.5** ค่าความคงทนไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่างๆ

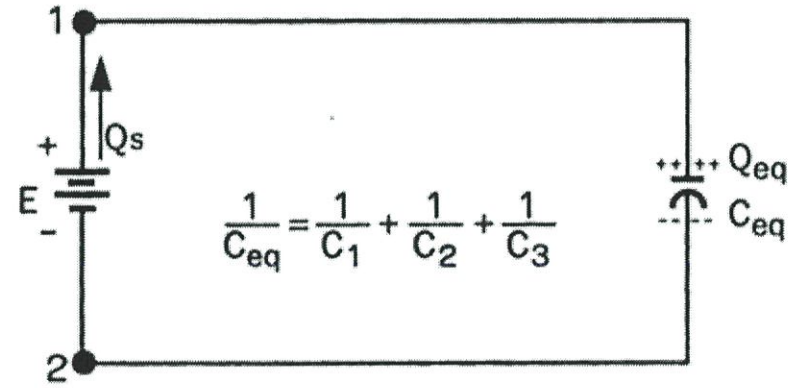
| วัสดุ | $\varepsilon_r$ |
|---|---|
| อากาศ | 3 |
| แบคคาไลต์ | 16 |
| เซรามิก | 3 |
| แก้ว | 40-120 |
| ไมก้า | 200 |
| น้ำมัน | 12-20 |
| กระดาษ | 40-79 |
| ฟิล์มพลาสติก | 20 |
| กระเบื้องเคลือบ | 4-10 |
| ยาง | 28-47 |
| เทฟลอน | 60 |

### 2.4.7 วงจรอนุกรมตัวเก็บประจุ

วงจรอนุกรมตัวเก็บประจุ (Capacitor Connected in Series) ทำได้โดยต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัวเรียงลำดับกัน คล้ายการต่อตัวต้านทานหรือแบตเตอรี่แบบอนุกรม ถ้าเป็นตัวเก็บประจุชนิดมีขั้ว (+) ของ $C_1$ ต่อกับขั้ว (+) ของ E โดยสวิตซ์นั้นปิดวงจรเรียบร้อย และขั้ว (-) ของ $C_1$ ต่อกับขั้ว (+) ของ $C_2$ ขั้ว (-) ของ $C_2$ ต่อกับขั้ว (+) ของ $C_3$ สุดท้ายขั้ว (-) ของ $C_3$ ต่อกับขั้ว (-) ของ E ดังแสดงในรูป 9.7




(ก) วงจรอนุกรมตัวเก็บประจุ 3 ตัว




(ข) วงจรอนุกรมตัวเก็บประจุ 1 ตัว

**รูปที่ 2.28** วงจรอนุกรมตัวเก็บประจุ

การต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกันทำให้เกิดความสัมพันธ์ 2 ประการ ดังนี้

1. แรงดันของแบตเตอรี่ E แบ่งไปตกคร่อม C แต่ละตัวเป็น $V_1$, $V_2$ ,$V_3$

2. พื้นที่ของแผ่นโลหะขั้ว (+) ของ $C_1$ เท่านั้นที่ได้รับแรงดันป้อนเข้า ในทำนองเดียวกันกับพื้นที่ของแผ่นโลหะขั้ว (-) ของ $C_3$ (ตัวสุดท้าย) ที่จะได้รับแรงดันจาก E ป้อนเข้าเช่นกัน ดูเหมือนว่าระยะห่างระหว่างขั้ว (+) ของ $C_1$ กับขั้ว (-) ของ $C_3$ จะมีระยะห่างมากขึ้นเท่ากับ ช่องไดอิเล็กตริกของ $C_1$ บวกช่องไดอิเล็กตริกของ $C_2$ บวกช่องไดอิเล็กตริกของ $C_3$ ผลคือ ค่าความจุไฟฟ้ารวมลดลง เพราะถ้าว่างแผ่นโลหะ 2 แผ่นห่างกันมากๆจะทำให้ค่าความจุ

ลดลง ในที่นี้แผ่นหนึ่งคือ ขั้ว (+) ของ $C_1$ และอีกแผ่นหนึ่งคือขั้ว (-) ของ $C_3$ จากความสัมพันธ์ทั้ง 2 ประการนำมาเขียนสมการได้ว่า

$$V_1 = Q_1/C_1$$

$$V_2 = Q_2/C_2$$

$$V_3 = Q_3/C_3$$

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ได้ว่า

$$E = V_1 + V_2 + V_3$$

$$= Q_1/C_1 + Q_2/C_2 + Q_3/C_3$$

ดังนั้น $$Q_s = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$$

สมการหาค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจำนวน n ตัวคือ

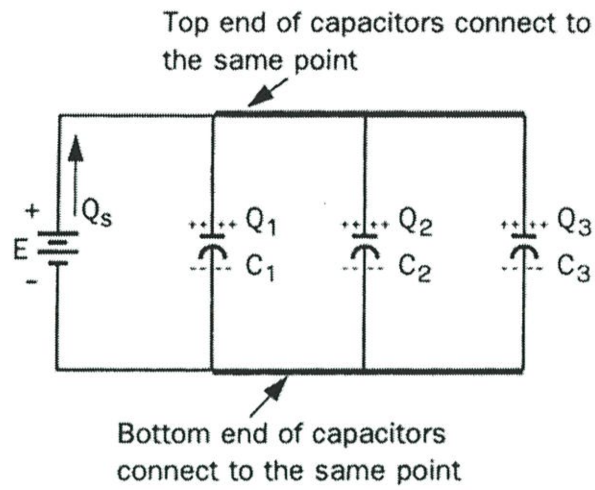
$$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2 + \ldots + 1/C_n \qquad (2.7)$$

และเมื่อต่อ C อนุกรม 2 ตัว สามารถคำนวณค่าได้จากสมการ 2.8

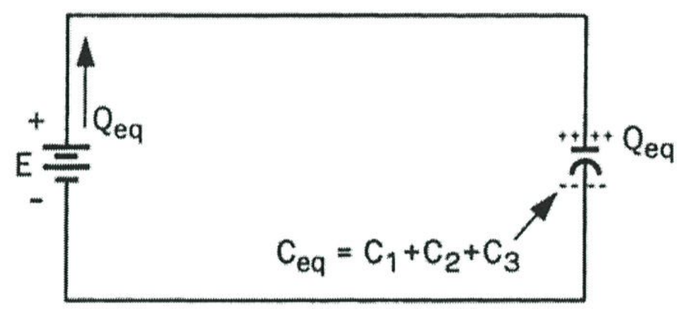
$$C_{eq} = (C_1C_2)/(C_1 + C_2) \qquad (2.8)$$

**2.4.8 วงจรขนานตัวเก็บประจุ**

การต่อขนานกันของตัวเก็บประจุ ตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.29 จะต้องต่อให้ขั้วของ C แต่ละตัวตรงกันกับขั้วของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในรูป (ก) ใช้ C 3 ตัวต่อขนานสามารถหาค่า $C_{eq}$ ได้ดังรูป (ข)




(ก) วงจรขนานตัวเก็บประจุ 3 ตัว




(ข) วงจรขนานตัวเก็บประจุ 1 ตัว

**รูปที่ 2.29** วงจรขนานตัวเก็บประจุ

ผลให้เกิดข้อสังเกต 2 ประการดังนี้

1. แรงดันตกคร่อม C แต่ละตัวเท่ากัน
2. พื้นที่โลหะของ C1, C2 และ C3 ที่เป็นขั้วบวกหรือลบต่อถึงกัน คล้ายกับว่าพื้นที่ของแผ่นโลหะขั้วบวกและขั้วลบของทั้ง 3 ตัวรวมกันทำให้พื้นที่รวมมากขึ้น ประจุไฟฟ้าในพื้นที่ย่อมมากขึ้นตามไปด้วย

จากข้อสรุปทั้ง 2 ข้อ ทำให้เราได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้

เมื่อ Qs คือ ประจุไฟฟ้ารวมจะได้ว่า

$$Q_s = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n \qquad (2.9)$$

เนื่องจาก $I_s = I_1 + I_2 + I_3$

ดังนั้น $I = Q/t$

$$I_1 = Q_1/t$$

$$I_2 = Q_2/t$$

$$I_3 = Q_3/t$$

ได้ว่า $$I_s = Q_1/t + Q_2/t + Q_3/t$$

ลดรูปได้เป็น $$Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

ในวงจรอนุกรมตัวเก็บประจุจะได้ค่า $Q_s$ คือ

$$Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

และ $$Q_1 = C_1E$$

$$Q_2 = C_2E$$

$$Q_3 = C_3E$$

ได้ว่า $$Q_s = C_1E + C_2E + C_3E$$

แต่ $$C_{eq} = C_s$$

ดังนั้น $$Q_{eq} = Q_s$$

แต่ $$Q_{eq} = EC_{eq}$$

ได้ว่า $$EC_{eq} = C_1E + C_2E + C_3E$$

หรือ $$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$$

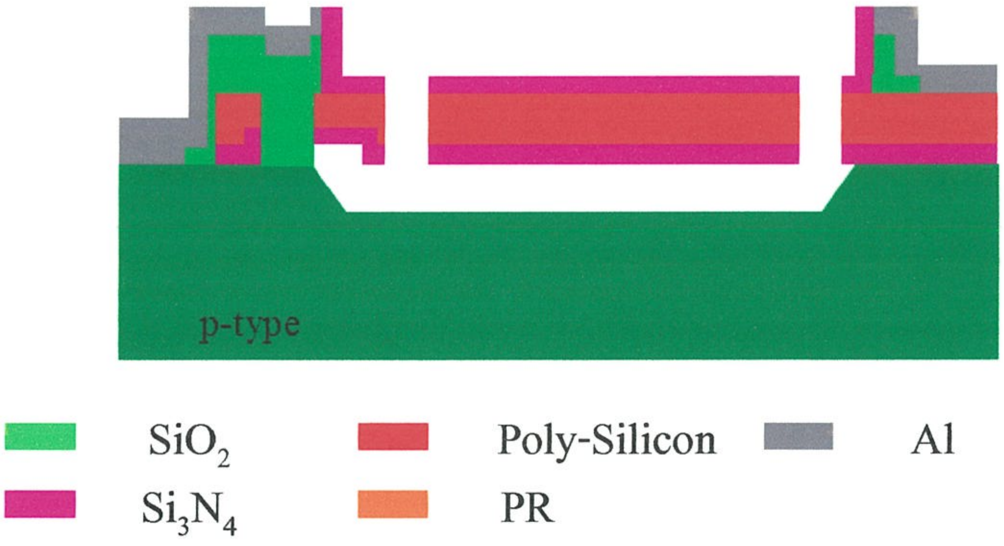
เมื่อ C จำนวน n ตัวต่อขนานกันจะได้ว่า

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \tag{2.10}$$

# บทที่ 3
# การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ

**3.1 การออกแบบ Process flow**

ก่อนที่จะทำการออกแบบมาส์กได้นั้นจะต้องทำการออกแบบขั้นตอนกระบวนการสร้าง (Process flow) ก่อนว่าจะทำการสร้างชั้นฟิล์ม รึว่าทำการกัด (Etching) ชั้นฟิล์มเมื่อใด ซึ่งการกัดจะเป็นตัวกำหนดจำนวนมาส์กที่จะใช้ในการทดลองซึ่งจากภาพตัดขวาง (รูปที่ 3.1) จะต้องมีการกัดทั้งหมด 9 ครั้ง ดังนั้นจะต้องทำการสร้างมาส์กทั้งหมด 9 มาส์ก เพื่อที่จะสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันให้มีลักษณะโครงสร้างดังรูป จากรูปที่ 3.1 ส่วนสีแดงและสีสมพูคือชั้นโพลีซิลิคอนและซิลิคอนไนไตรด์ตามลำดับ ซึ่งสองชั้นนี้จะเป็นตัวกำหนดความหนาของไดอะแฟรมแต่ชั้นซิลิคอนไนไตรด์นั้นเราจะสร้างให้มีความหนาคงที่ดังนั้นชั้นโพลีซิลิคอนจึงเป็นตัวกำหนดความหนาของไดอะแฟรม ซึ่งเราสามารถกำหนดได้ในขั้นตอนการสร้างชั้นฟิล์มโพลีซิลิคอนซึ่งในการทดลองนี้เรากำหนดความหนาของไดอะแฟรมที่ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm ตามที่ได้ทำการจำลองการทำงานไว้ ส่วนสีเขียวนั้นคือส่วนของฐานรองซึ่งเราใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพีเป็นฐานรอง และส่วนพื้นที่เป็นช่องว่างบนไดอะแฟรมคือส่วนของอคูสติคโฮลซึ่งมีไว้เพื่อใช้ในการลดสัญญาณรบกวน

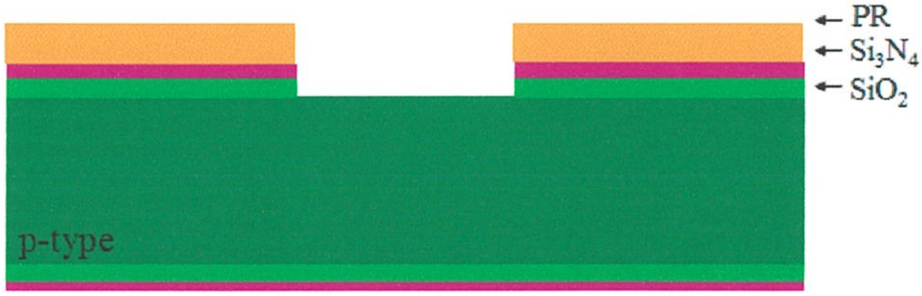



**รูปที่ 3.1** ภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ

โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.1 จะมีขั้นตอนในการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุอยู่หลักๆด้วยกัน 16 ขั้นตอนหลักๆคือ

1. ขั้นตอนการออกซิเดชั่นเพื่อที่จะเข้าสู่กระบวนการสร้างส่วนของ cavity (ช่องว่าง) เพื่อเป็นพื้นที่ในการยุบตัวของไดอะแฟรมโดยจะต้องทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เตรียมไว้ก่อน

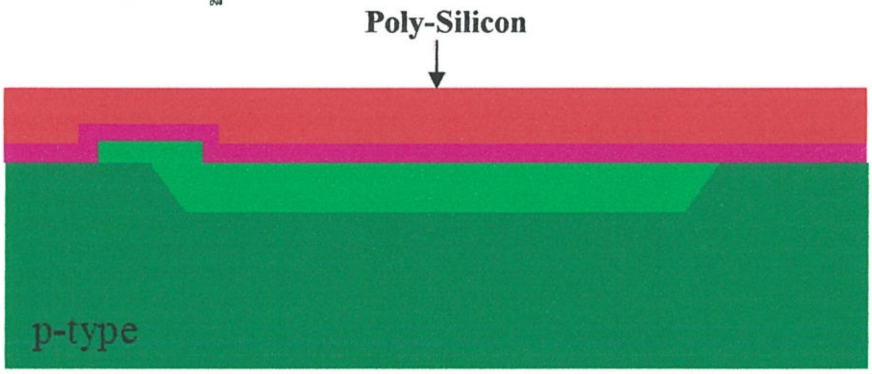

2. ขั้นตอนการเตรียมสร้างช่อง cavity ในขั้นตอนนี้เราจะต้องทำการเปิดออกไซด์และซิลิคอนไนไตรด์ในบริเวณที่ต้องการจะสร้างให้เป็นไดอะแฟรมของตัวทรานสดิวเซอร์ โดยใช้มาส์กแรกที่เราได้ทำการออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม L-edit โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของไดอะแฟรม



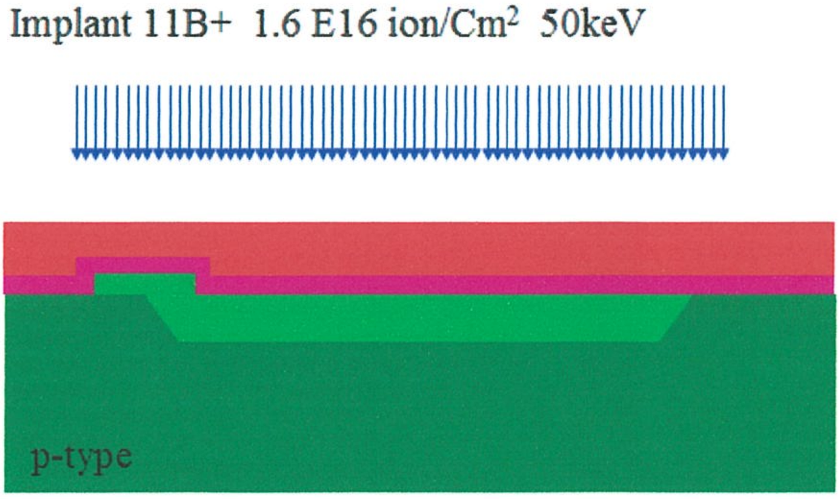

3. ขั้นตอนการกัดผิวหน้าให้สม่ำเสมอกันซึ่งเตรียมแผ่นฐานรองไว้เพื่อจะเข้าสู่ขั้นตอนของการกัดสร้างท่อเพื่อที่จะใช้ในกัดเปิดช่องcavity ซึ่งเราจะต้องทำการสร้างออกไซด์ก่อนแล้วจึงทำการ Penalization เพื่อทำให้ผิวหน้าเรียบเสมอกันก่อนเข้าสู่กระบวนการต่อไป

4. ขั้นตอนการสร้างท่อเพื่อที่จะนำสารเคมีที่ใช้ในการกัดเปิดช่องcavity ในส่วนข้างใต้ไดอะแฟรมซึ่งในขั้นตอนนี้เราจะใช้มาส์กที่สอง


5. ขั้นตอนการสร้างชั้นโพลีซิลิคอนเพื่อที่จะใช้เป็นไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดัน ซึ่งเราสามารถเปลี่ยนความหนาของไดอะแฟรมได้จากขั้นตอนนี้ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งก่อนหน้านี้เราจะต้องทำการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์เพื่อกันการช็อตกันของไดอะแฟรมและฐานรองของเรา

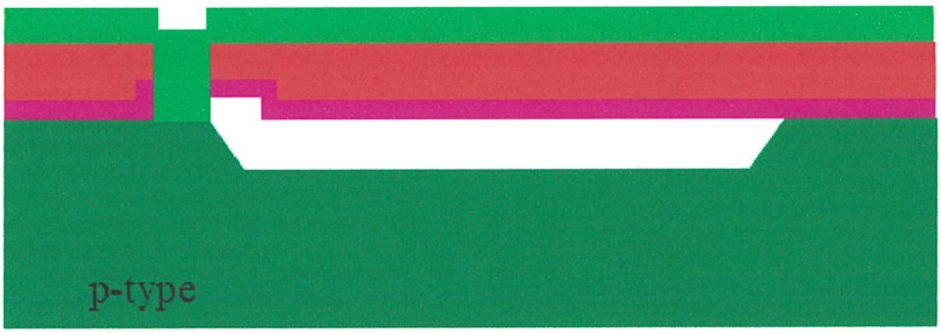



6. ขั้นตอนการยิงฝังประจุ (Implantation) เพื่อที่จะทำให้ชั้นโพลีซิลิคอนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพื่อที่เราจะต่อขั้วไฟฟ้ากับชั้นโพลีซิลิคอนได้โดยตรงโดยใช้ความหนาแน่นประจุ 1.6 x$10^{16}$ ion/$Cm^2$ 50 keV



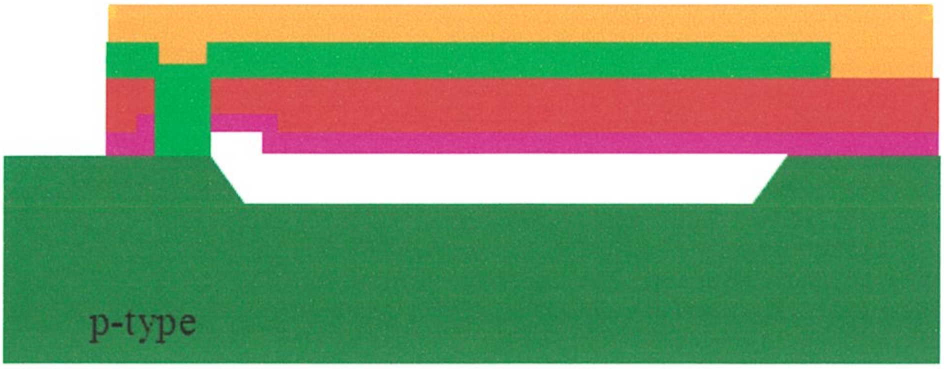
7. ขั้นตอนการกัดเปิดช่อง cavity ขั้นตอนนี้เราจะทำการกัดเปิดช่องcavityซึ่งเราจะใช้วิธีการกัดแบบเปียกซึ่งเราจะทำการเปิดชั้นโพลีซิลิคอนและซิลิคอนไนไตรด์เพื่อที่จะได้เป็นช่องนำสารเคมีไปกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างเป็น Cavity โดยใช้มาส์กที่สาม


8. ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์เพื่อปิดท่อที่เราใช้ในการนำสารเคมีลงไปกัดเปิดช่อง cavity ซึ่งถ้าเราไม่ทำการปิดท่อนี้ก็อาจจะทำให้เป็นสาเหตุของการเกิดจุดบกพร่องได้



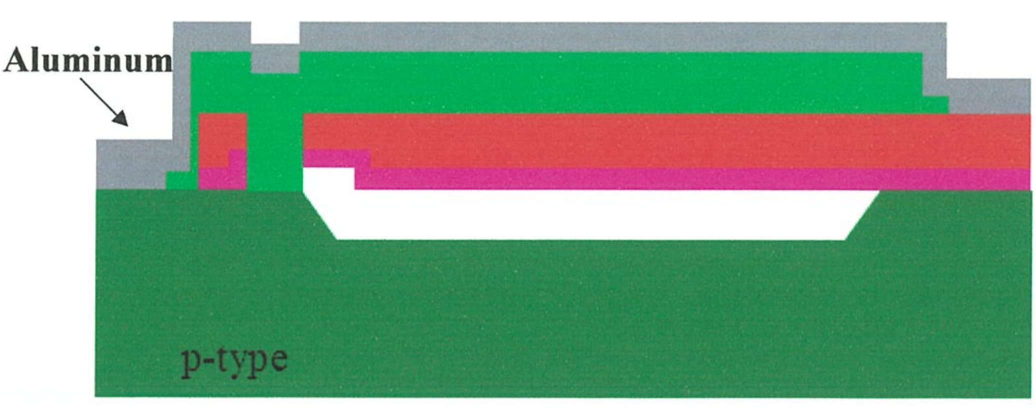

9. ขั้นตอนการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยเราจะทำการกัดชั้นออกไซด์ทั้ง 2 ด้าน เพื่อที่จะใช้เป็นบริเวณต่อขั้วไฟฟ้าที่จะนำไปต่อใช้งานกับวงจรภายนอกโดยช่องทางขวามือจะเป็นช่องที่ใช้ต่อขั้วไฟฟ้ากับส่วนของโพลีซิลิคอน โดยขั้นตอนนี้เราจะใช้มาส์กที่สี่

10. ขั้นตอนการกัดเปิดชั้นโพลีซิลิคอนและซิลิคอนไนไตรด์เพื่อที่จะสร้างขั้วไฟฟ้าที่ต่อมาจากส่วนของฐานรอง โดยในขั้นตอนนี้เราจะใช้มาส์กที่ห้าในการกัด

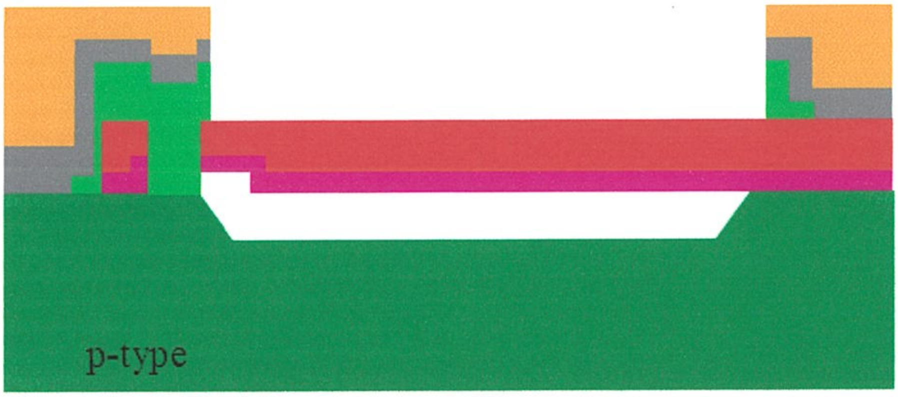



11. ขั้นตอนของการสร้างฉนวนเนื่องจากชั้นโพลีจะคลุมผิวหน้าทั้งหมดถ้าเราสร้างชั้นขั้วไฟฟ้าเลยอาจทำให้เกิดการช็อตกันของขั้วทั้งสองได้ ดังนั้นเราจึงต้องทำการสร้างชั้นออกไซด์เพื่อเป็นฉนวนป้องกันก่อนแล้วหลังจากนั้นจึงเปิดช่องคอนแท็คโดยใช้มาส์กที่ 6

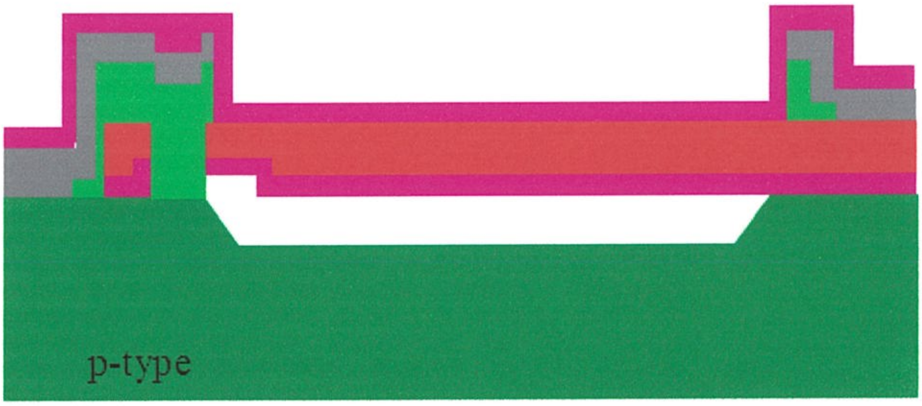

12. ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะซึ่งในการทดลองนี้เราใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าโดยสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าระหว่างแผ่นฐานรองกับชั้นโพลีซิลิคอน



13. ขั้นตอนการกัดชั้นอลูมิเนียมและชั้นออกไซด์เพื่อที่จะเปิดให้ชั้นโพลีซิลิคอนสามารถรับแรงดันได้โดยตรงซึ่งจะทำให้ความไวในการทำงานของทรานสดิวเซอร์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเราจะใช้มาส์กที่เจ็ดในการกัด



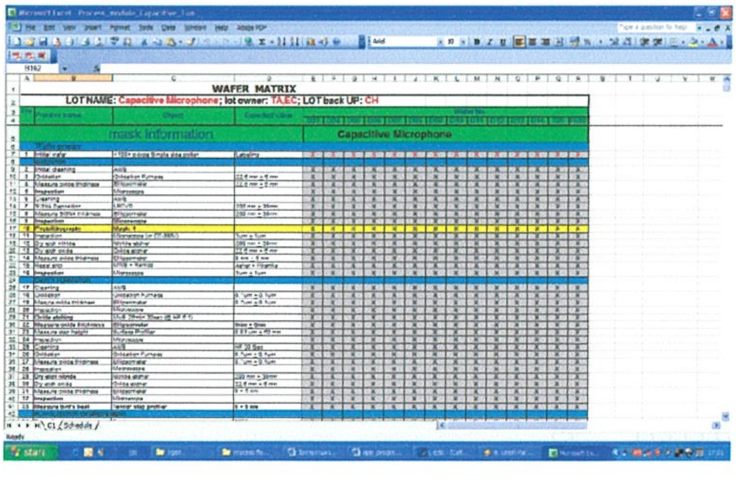

14. ขั้นตอน passivation ซึ่งขั้นตอนนี้เราจะทำการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์เพื่อป้องกันตัวทรานสดิวเซอร์จากสิ่งปนเปื้อนภายนอกต่างๆ เช่น ความชื้น ฝุ่นละออง เป็นต้น



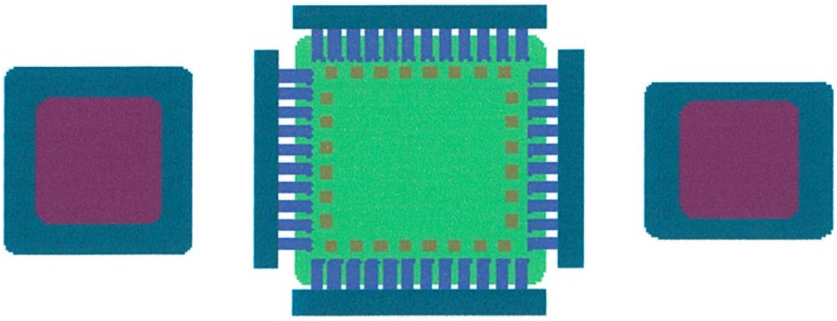

15. ขั้นตอนการเปิดคอนแทคส์ซึ่งเราจะทำการกัดชั้น Passivation ตรงบริเวณคอนแทคส์ออกเพื่อจะใช้ต่อขั้วไฟฟ้ากับบริเวณของอลูมิเนียมที่เราได้สร้างไว้ ซึ่งขั้นตอนนี้เราจะใช้มาส์กที่แปด

16. ขั้นตอนการสร้างอคูสติคโฮล โดยตัวอคูสติคโฮลนั้นจะมีส่วนช่วยในการลดสัญญาณรบกวนของตัวทรานดิวเซอร์ความดันสำหรับไมโครโฟนตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยเราจะทำการศึกษาพารามิเตอร์ของอคูสติคโฮลด้วยว่ามีผลอย่างไรกับการทำงานของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ โดยเราจะใช้มาส์กที่เก้า ในการสร้างอคูสติคโฮล


จากขั้นตอนทั้งหมดข้างต้นเราจะนำมาเขียน process flow ตามตัวอย่างในรูปที่ 3.2 และรูปเลย์เอ้าที่สำเร็จแล้วจะแสดงดังรูปที่ 3.3 จากรูปบริเวณสีเขียวก็คือไดอะแฟรม บริเวณสีฟ้าคือท่อนำสารเคมีที่ใช้ในการกัดเปิดช่อง cavity และบริเวณสีม่วงก็คือขั้วไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดัน โดยในกระบวนการสร้างของการทดลองนี้จะมีตัวแปรอยู่ด้วยกันสามตัวคือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรม, ความหนาของไดอะฟรม และ ขนาดพื้นที่หนาตัดของอคูสติคโฮล ซึ่งขนาดพื้นที่หน้าตัดของไดอะปฟรมเราจะใช้ที่ค่า100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ ส่วนความหนาของไดอะแฟรมนั้นเราจะใช้ที่ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm และ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของอคูสติคโฮลเราจะใช้ที่ 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$



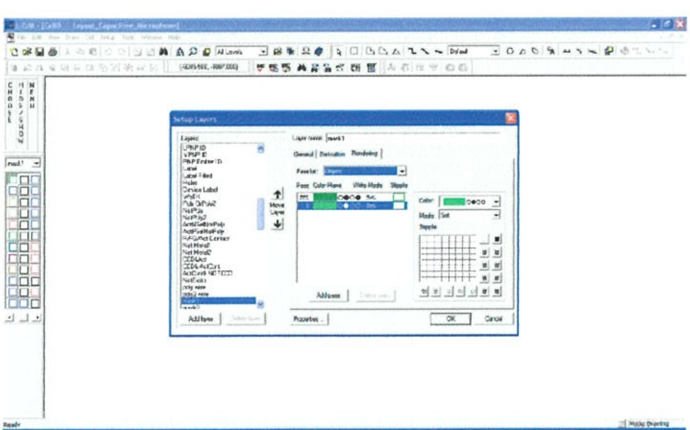

**รูปที่ 3.2** ตัวอย่าง Process flow ที่ใช้ในกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ



**รูปที่ 3.3** โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันที่ได้ทำการออกแบบ

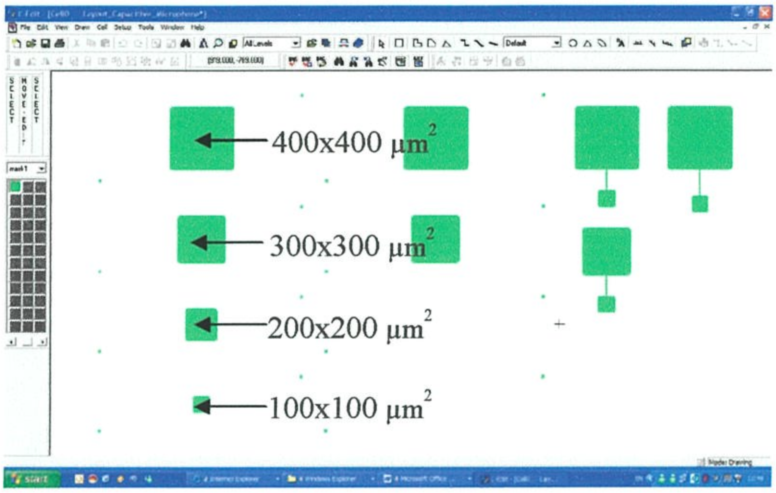
**3.2 การออกแบบมาส์กต้นแบบด้วยโปรแกรม L-edit**

โปรแกรม L-edit เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเลย์เอ้าของอุปกรณ์ไอซี (IC) ซึ่งจะใช้ในการออกแบบมาส์กเบื้องต้นในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งมีวิธีการใช้งานที่ไม่ยุ่งยาก โดยในขั้นแรกนั้นเราจะต้องทำการกำหนดชื่อและสีของเลย์เอ้าต้นแบบก่อนตามรูปที่ 3.4 หลังจากนั้นก็ทำการกำหนดความห่างระหว่างจุด และก็ทำการเขียนเลย์เอ้าต้นแบบให้มีขนาดตามที่ต้องการดังตัวอย่างในรูปที่ 3.4 ซึ่งระยะห่างขั้นต่ำสุดที่สามารถสร้างจริงเสามารถกำหนดได้ในส่วนของเทคโนโลยีไฟล์ของตัวโปรแกรม ซึ่งในส่วนนี้มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากถ้าระยะห่างมีค่าน้อยเกินไปก็อาจจะทำให้ตัวอุปกรณ์นั้นไม่สามารถใช้งานได้ จากรูปที่ 3.3 แสดงเลย์เอ้าที่จะใช้ในกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุในการทดลองซึ่งเราได้ทำการเขียนเลย์เอ้าไว้ให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ ตามที่ได้จำลองการทำงานไว้ ส่วนการกำหนดความหนานั้นสามารถกำหนดได้ในขั้นตอนกระบวนการสร้าง



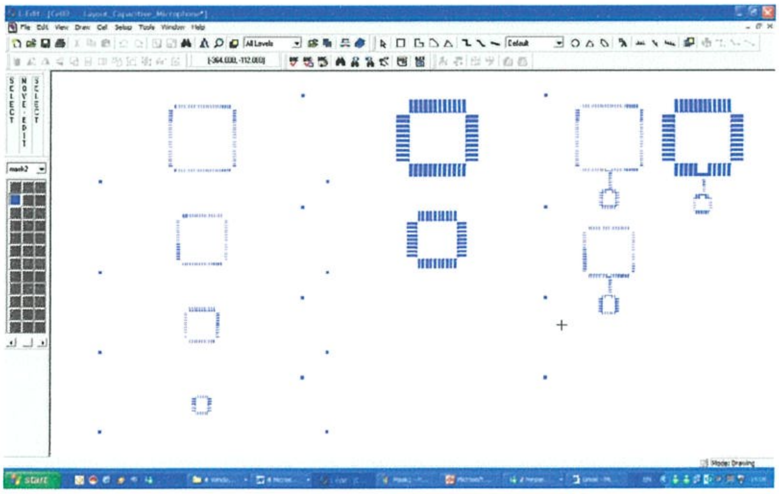
**รูปที่ 3.4** วิธีการกำหนดชื่อและสีของมาส์กแต่ละชั้น

โดยมาส์กที่เราได้ทำการออกแบบจะมีทั้งหมด 9 มาส์ก โดยมาส์กแรกดังรูปที่ 3.5 จะใช้ในการกัดเปิดช่อง Cavity ซึ่งมาส์กแรกนี้ยังเป็นตัวกำหนดขนาดของไดอะแฟรมด้วยซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เราจะทำการศึกษาโดยออกแบบให้มีขนาดไดอะแฟรมอยู่ 4 ค่าคือ 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ ที่เราสนใจพารามิเตอร์ที่ 4 ค่านี้เนื่องจากเป็นค่าที่สามารถสร้างได้จริงด้วยเทคโนโลยีการสร้างของ TMEC ซึ่งมาส์กแรกจะใช้ในขั้นตอนที่ 2

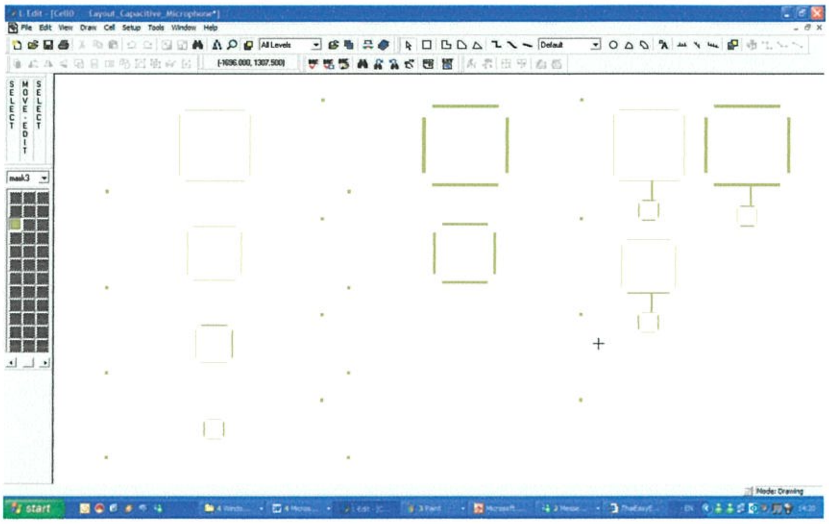



**รูปที่ 3.5** มาส์กแรกใช้เพื่อเปิดช่องCavityและกำหนดขนาดของไดอะแฟรม

มาส์กที่สองดังในรูปที่ 3.6 ใช้สำหรับกัดเปิดช่องไปยัง Cavity เพื่อจะทำการ Wet Etch Oxide เพื่อทำเป็นช่อง Cavity ซึ่งจะต่อเชื่อมกับมาส์กที่สามดังรูปที่ 3.7 เพื่อใช้ในการกัดเพื่อเปิดชั้นซิลิคอนไนไตรด์เพื่อจะทำการัดเปิดช่อง Cavity ซึ่งมาส์กที่สองและสามจะใช้ในขั้นตอนที่ 4 และ 7

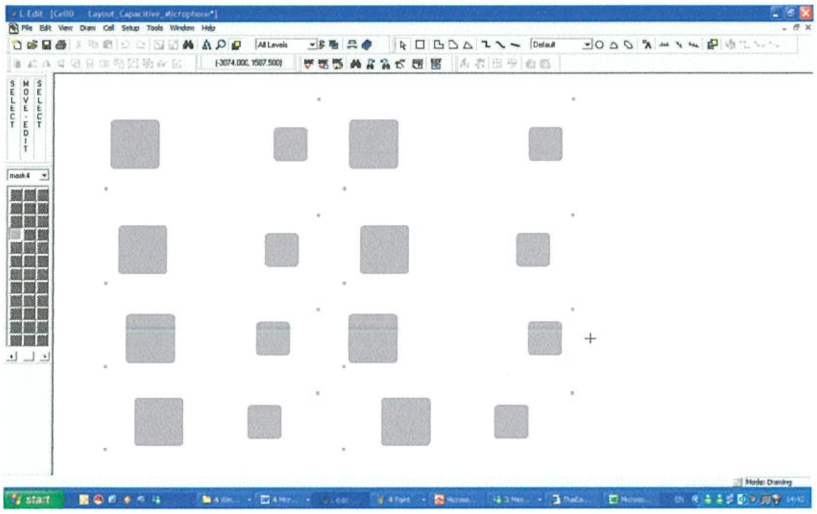


**รูปที่ 3.6** มาส์กที่สองใช้ในการกัดท่อเพื่อเชื่อมต่อไปยัง Cavity



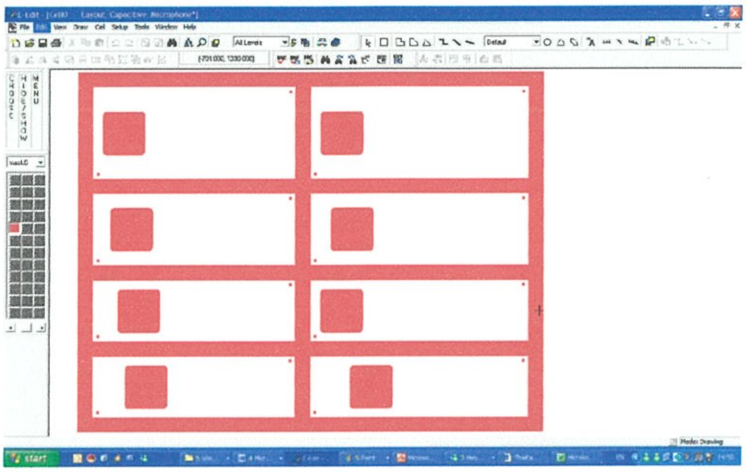
**รูปที่ 3.7** มาส์กที่สามใช้ในการเปิดชั้นในไตรด์เพื่อกัด Cavity

มาส์กที่สี่ใช้ในการกัดชั้นออกไซด์เพื่อที่จะทำขั้วไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยเราจะทำการกัดชั้นออกไซด์ทั้ง 2 ด้าน เพื่อที่จะใช้เป็นบริเวณต่อขั้วไฟฟ้าที่จะนำไปต่อใช้งานกับวงจรภายนอก ซึ่งมาส์กที่สี่นี้จะใช้ในขั้นตอนที่ 9



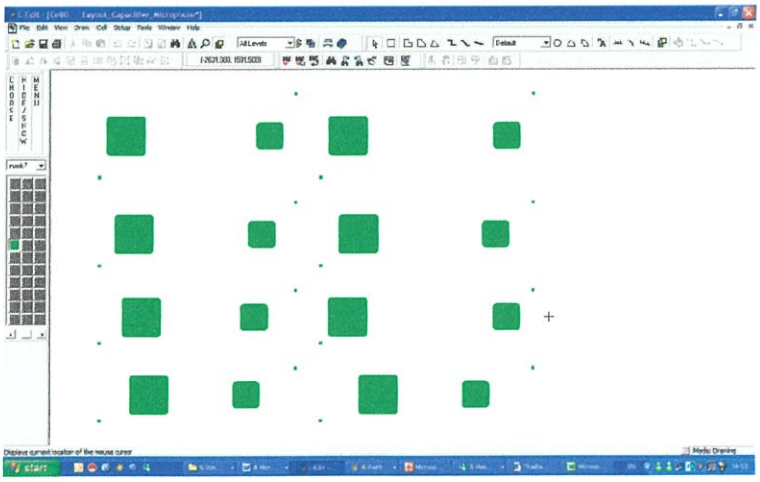
**รูปที่ 3.8** มาส์กที่สี่ใช้ในการกัดชั้นออกไซด์เพื่อที่จะทำขั้วไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ

มาส์กที่ห้าดังรูปที่ 3.9 จะใช้ในการกัดการกัดเปิดชั้นโพลีซิลิคอนและซิลิคอนไนไตรด์เพื่อที่จะสร้างขั้วไฟฟ้าที่ต่อมาจากส่วนของฐานรองแล้วยังเป็นมาส์กที่ใช้ในการกัดเพื่อแบ่งเซลล์ของแต่ละตัวอุปกรณ์ออกจากกันตามลักษณะกรอบสีแดงในเลย์เอ้าซึ่งจะใช้ในขั้นตอนที่ 10



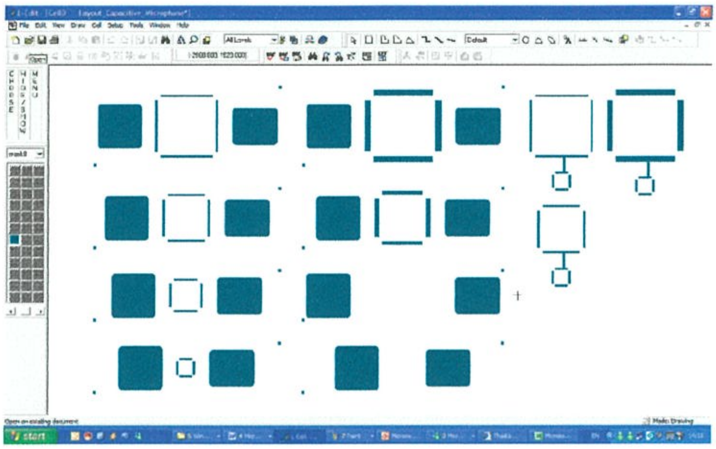
**รูปที่ 3.9** มาส์กที่ห้าใช้ในการกัดเปิดชั้นโพลีซิลิคอนและซิลิคอนไนไตรด์เพื่อที่จะสร้างขั้วไฟฟ้าและใช้ในการแบ่งเซลล์

หลังจากเราเปิดบริเวณคอนแทคส์แล้ว เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจะเห็นได้ว่าชั้นโพลีจะคลุมผิวหน้าทั้งหมดถ้าเราสร้างชั้นขั้วไฟฟ้าเลยอาจทำให้เกิดการช็อตกันของขั้วทั้งสองได้ ดังนั้นเราจึงต้องทำการสร้างชั้นออกไซด์เพื่อเป็นฉนวนป้องกันก่อนแล้วหลังจากนั้นจึงเปิดช่องคอนแท็คโดยใช้มาส์กที่หกตามรูปที่ 3.10 ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนที่ 11



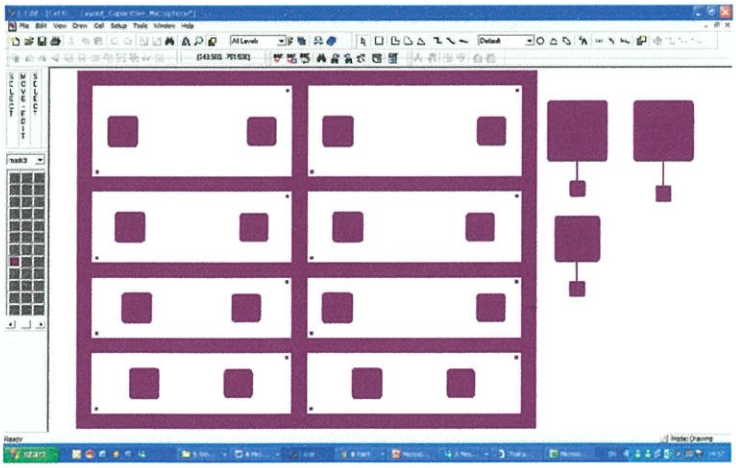
**รูปที่ 3.10** มาส์กที่หกใช้ในการกัดชั้นฉนวนเพื่อเปิดบริเวณที่จะสร้างขั้วไฟฟ้า

มาส์กที่เจ็ดดังในรูปที่ 3.11 จะใช้ในขั้นตอนที่ 13 เพื่อใช้ในการกัดชั้นอลูมิเนียมและชั้นออกไซด์เพื่อที่จะเปิดให้ชั้นโพลีซิลิคอนสามารถรับแรงดันได้โดยตรงซึ่งจะทำให้ความไวในการทำงานของทรานสดิวเซอร์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเราจะต้องทำการสร้างมาส์กให้ปิดบริเวณขั้วคอนแทคส์ทั้งสองและส่วนของท่อนำสารเคมีในกระบวนการ Etch Cavity เพื่อทำการกัดชั้นอลูมิเนียมและชั้นออกไซด์ออกจากตัววทรานสดิวเซอร์ของเรา



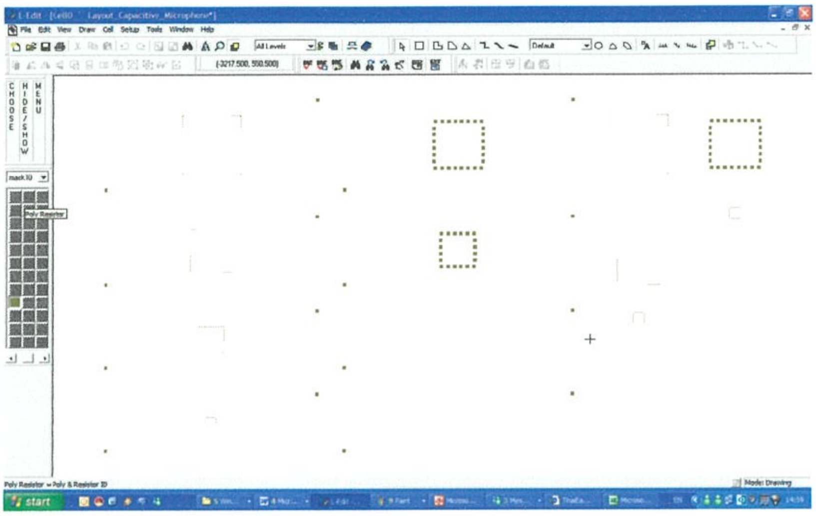
**รูปที่ 3.11** มาส์กที่เจ็ดใช้ในการกัดชั้นอลูมิเนียมและชั้นออกไซด์ออกจากผิวหน้าไดอะแฟรม

ในส่วนของมาส์กที่แปด(รูปที่ 3.12) เราจะใช้ในขั้นตอนที่ 15 ซึ่งจะใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นชั้น Passivation ซึ่งบริเวณท่เรากัดก็คือบริเวณในมาส์กซึ่งก็คือ บริเวณขั้วคอนแทคส์ นอกจากนี้มาส์กนี้ยังใช้ในการกัดเพื่อแบ่งเซลล์อุปกรณ์เช่นเดียวกับมาส์กที่ห้าด้วย



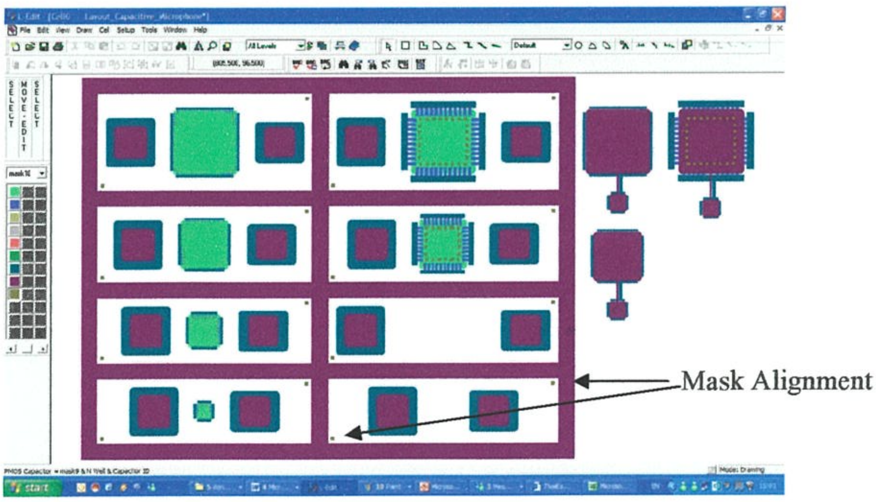
**รูปที่ 3.12** มาส์กที่แปดใช้สำหรับกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นชั้น Passivation และใช้ในการกัดเพื่อแบ่งเซลล์

มาส์กที่เก้าดังรูปที่ 3.13 ใช้สำหรับการสร้างอคูสติคโฮลซึ่งมาส์กนี้จะใช้ในการกัดชั้น Passivation ชั้นโพลีซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไนไตรด์เพื่อสร้างอคูสติคโฮลโดยเราจะออกแบบให้อคูสติคโฮลมีขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ ซึ่งอคูสติคโฮลก็เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่เราจะทำการศึกษาว่ามีผลอย่างไรกับความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ



**รูปที่ 3.13** มาส์กที่เก้าใช้สำหรับการสร้างอคูสติคโฮล

ซึ่งจากมาส์กทั้ง 9 มาส์กสามารถแสดงรวมออกมาได้ดังในรูปที่ 3.14 ซึ่งจะเป็นเลย์เอ้าท์ที่เราจะใช้ในการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุซึ่งในการออกแบบเลย์เอ้านั้นเราจะต้องออกแบบให้มีสี่เหลี่ยมเล็กๆ บริเวณมุมของแต่ละเซลล์เพื่อใช้เป็น Mask Alignment

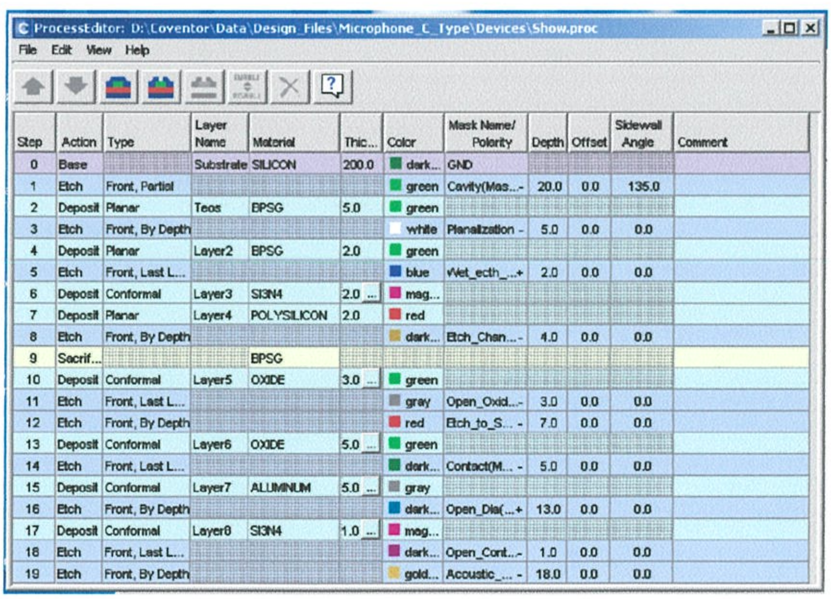



**รูปที่ 3.14** เลย์เอ้าท์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ

## 3.3 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ความหนาไดอะแฟรมค่าต่างๆด้วยโปรแกรม Coventorware™

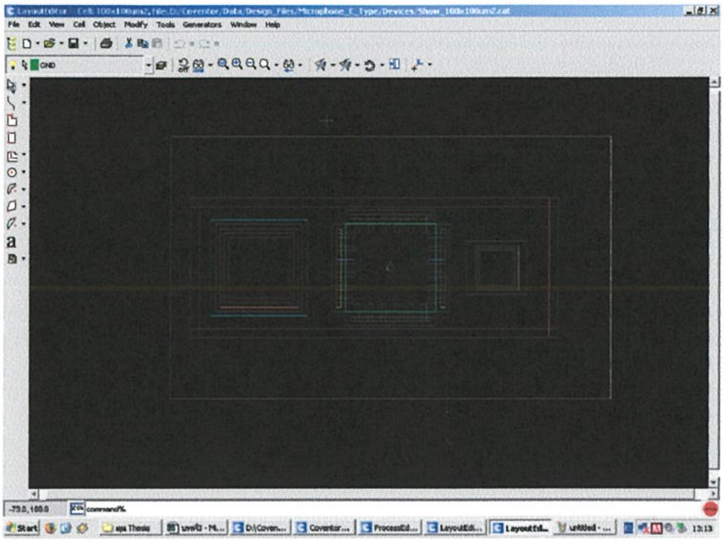
ซึ่งหลังจากที่เราได้ออกแบบ Process Flow และเลย์เอ้าของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดลองนี้แล้วเราจะลองนำโครงสร้างที่เราได้ทำการออกแบบมาสร้างเป็นภาพ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Coventorware™ โดยอาศัย Process Flow และ เลย์เอ้าที่เราได้ทำการออกแบบไว้เบื้องต้น แต่ Process Flow ที่สร้างจาก Coventorware™ อาจจะมีขั้นตอนที่น้อยกว่า แต่จุดที่สำคัญคือจะต้องมีการกำหนดมาส์กที่ใช้ในขั้นตอนการกัด (Etching) ให้ครบถ้วนสมบูรณ์ตามเลย์เอ้าที่เราได้ออกแบบตามทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เราได้ทำการออกแบบไว้ โดยตัวอย่างการสร้างรูป 3 มิติ เป็นไปดังนี้

ในขั้นแรกจะต้องทำการเขียน Process Flow ดังในรูปที่ 3.15 โดยจะต้องทำการกำหนดขั้นตอนการแพร่สาร (Diffusion) และการกัดสาร (Etching) ซึ่งเราสามารถกำหนดชนิดของสารและความหนาของแต่ละชั้นได้ที่ขั้นตอนนี้โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจะทำการศึกษาพารามิเตอร์ความหนาที่ ซึ่งเมื่อเราออกแบบ Process Flow เสร็จสิ้นแล้วหลังจากนั้นเราจะต้องทำการสร้างเลย์เอ้า ด้วยโปรแกรม Lay-out ใน Coventorware™ โดยขนาดพื้นที่หน้าตัดนั้นสามมารถกำหนดได้ที่ส่วนของการออกแบบเลย์เอ้า ตัวอย่างของเลย์เอ้าแสดงได้ดังในรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นเลย์เอ้าที่มีขนาดไดอะแฟรมเท่ากับ 100x100 $\mu m^2$




| Step | Action | Type | Layer Name | Material | Thic... | Color | Mask Name/ Polarity | Depth | Offset | Sidewall Angle | Comment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | Base | | Substrate | SILICON | 200.0 | dark... | GND | | | | |
| 1 | Etch | Front, Partial | | | | green | Cavity(Mas...- | 20.0 | 0.0 | 135.0 | |
| 2 | Deposit | Planar | Teos | BPSG | 5.0 | green | | | | | |
| 3 | Etch | Front, By Depth | | | | white | Planalization - | 5.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 4 | Deposit | Planar | Layer2 | BPSG | 2.0 | green | | | | | |
| 5 | Etch | Front, Last L... | | | | blue | Wet_ecth_...+ | 2.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 6 | Deposit | Conformal | Layer3 | SI3N4 | 2.0 ... | mag... | | | | | |
| 7 | Deposit | Planar | Layer4 | POLYSILICON | 2.0 | red | | | | | |
| 8 | Etch | Front, By Depth | | | | dark... | Etch_Chan...- | 4.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 9 | Sacrif... | | | BPSG | | | | | | | |
| 10 | Deposit | Conformal | Layer5 | OXIDE | 3.0 ... | green | | | | | |
| 11 | Etch | Front, Last L... | | | | gray | Open_Oxid...- | 3.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 12 | Etch | Front, By Depth | | | | red | Etch_to_S... - | 7.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 13 | Deposit | Conformal | Layer6 | OXIDE | 5.0 ... | green | | | | | |
| 14 | Etch | Front, Last L... | | | | dark... | Contact(M... - | 5.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 15 | Deposit | Conformal | Layer7 | ALUMINUM | 5.0 ... | gray | | | | | |
| 16 | Etch | Front, By Depth | | | | dark... | Open_Dia(...+ | 13.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 17 | Deposit | Conformal | Layer8 | SI3N4 | 1.0 ... | mag... | | | | | |
| 18 | Etch | Front, Last L... | | | | dark... | Open_Cont...- | 1.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 19 | Etch | Front, By Depth | | | | gold... | Acoustic_... - | 18.0 | 0.0 | 0.0 | |

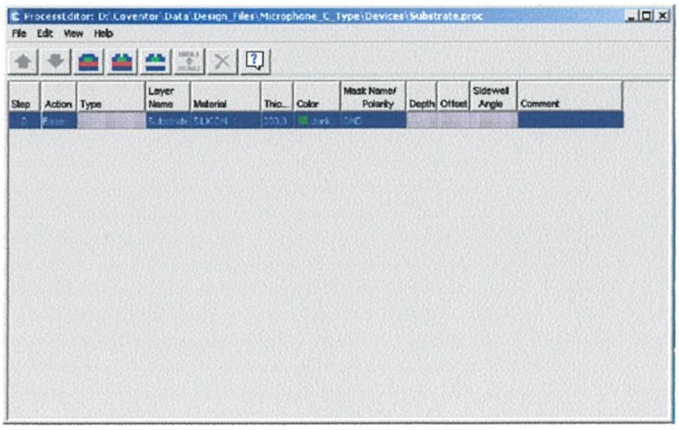
**รูปที่ 3.15** Process Flow ที่ใช้ในโปรแกรม Coventorware™



**รูปที่ 3.16** เลย์เอ้าที่ใช้ในการสร้างภาพสามมิติที่ขนาดพื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$

โดยจะขอยกตัวอย่างการสร้างโครงสร้างภาพ 3 มิติที่ความหนาโพลีซิลิคอน 0.5 μm และที่ขนาดพื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ ดังตัวอย่างนี้

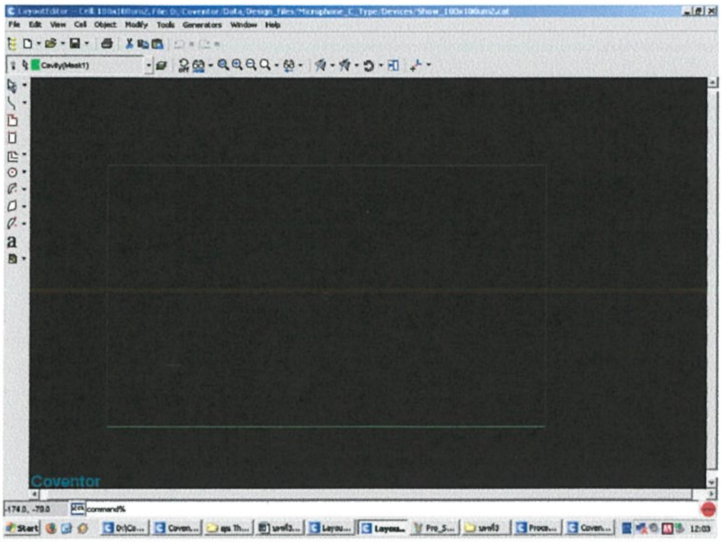
ขั้นแรกทำการสร้างฐานรองซิลิคอนที่ความหนา 200 μm ขนาด 500x300 $\mu m^2$ โดยใช้ Process Flow เป็นตัวกำหนดความหนาและชนิดของสาร ในส่วนของเลย์เอ้าจะเป็นตัวกำหนดขนาดของฐานรอง ซึ่ง Process Flow และเลย์เอ้าที่ใช้แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 และ โครงสร้างภาพ 3 มิติจะมีลักษณะดังในรูปที่ 3.18




(ก)

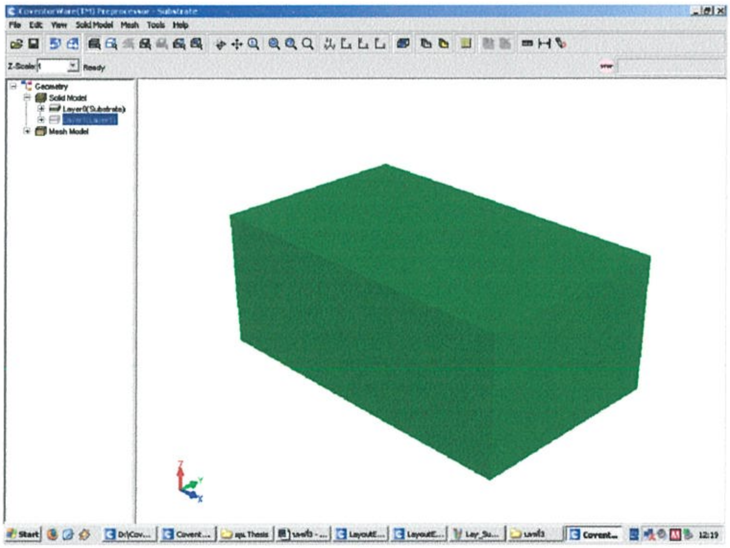
**รูปที่ 3.17** (ก) Process Flow ที่ใช้ในการสร้างฐานรอง

(ข) เลย์เอ้าที่ใช้ในการสร้างฐานรอง



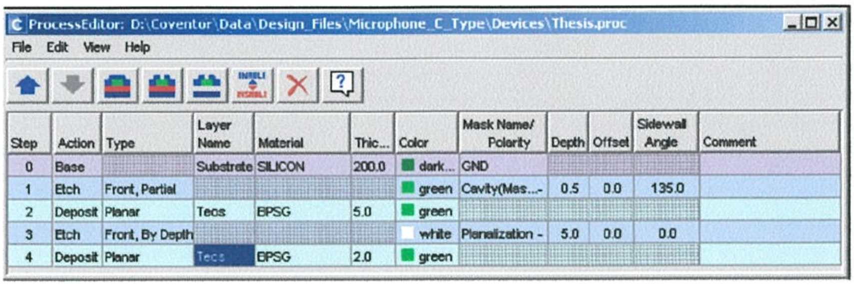
(ข)

**รูปที่ 3.17 (ต่อ)**



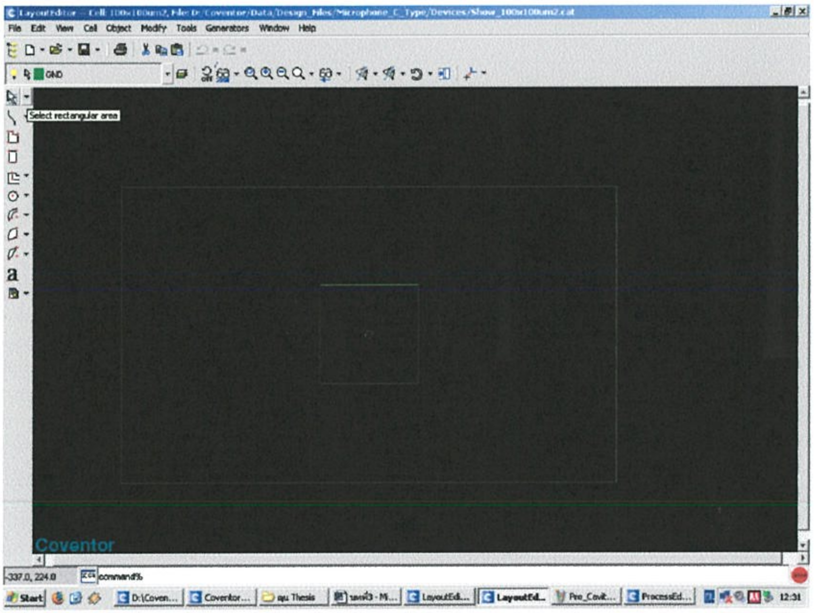
**รูปที่ 3.18** ภาพโครงสร้าง 3 มิติของฐานรองซิลิคอน

หลังจากสร้างฐานรองแล้วเราจะทำการกำหนดขนาดของไดอะแฟรมให้มีขนาด 100x100 μm$^2$ โดยเราจะใช้Process Flow และ เลย์เอ้าดังในรูปที่ 3.19 ซึ่งความลึกของออกไซด์จะอยู่ที่ 0.5 μm ซึ่งสามารถกำหนดได้ที่ Stepที่ 1 ของ Process Flow โดยที่ความลึกของออกไซด์นั้นจะเป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างเพลทของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ ภาพโครงสร้าง 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 3.20




| Step | Action | Type | Layer Name | Material | Thic... | Color | Mask Name/ Polarity | Depth | Offset | Sidewall Angle | Comment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | Base | | Substrate | SILICON | 200.0 | dark... | GND | | | | |
| 1 | Etch | Front, Partial | | | | green | Cavity(Mas... - | 0.5 | 0.0 | 135.0 | |
| 2 | Deposit | Planar | Tecs | BPSG | 5.0 | green | | | | | |
| 3 | Etch | Front, By Depth | | | | white | Planarization - | 5.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 4 | Deposit | Planar | Tecs | BPSG | 2.0 | green | | | | | |

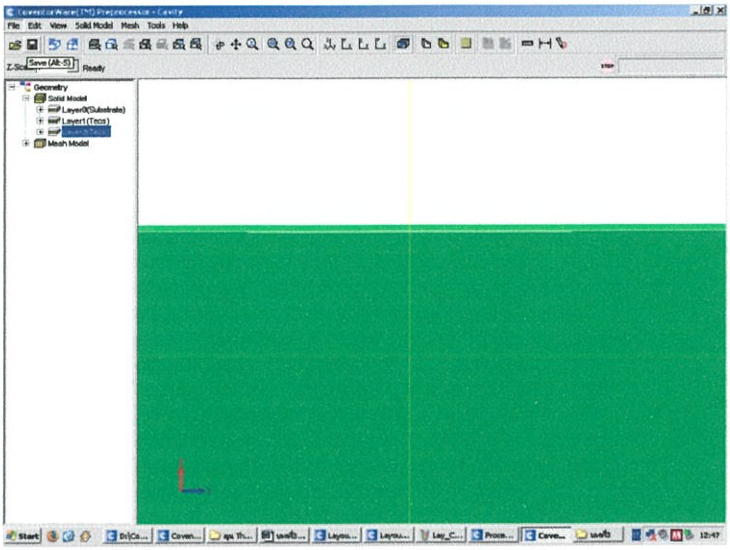
(ก)




(ข)

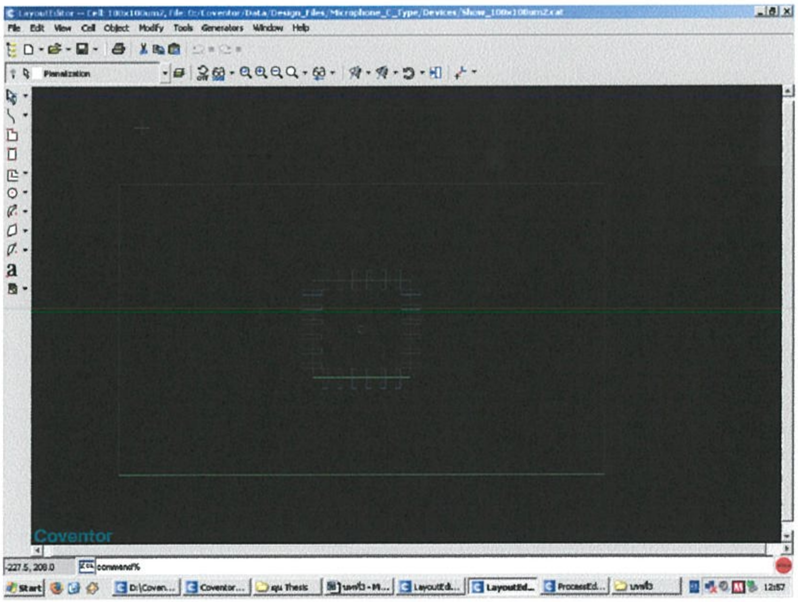
**รูปที่ 3.19** (ก) Process Flow ที่ใช้ในการกำหนดขนาดไดอะแฟรม

(ข) เลย์เอ้าที่ใช้สำหรับไดอะแฟรมขนาด 100x100 μm$^2$

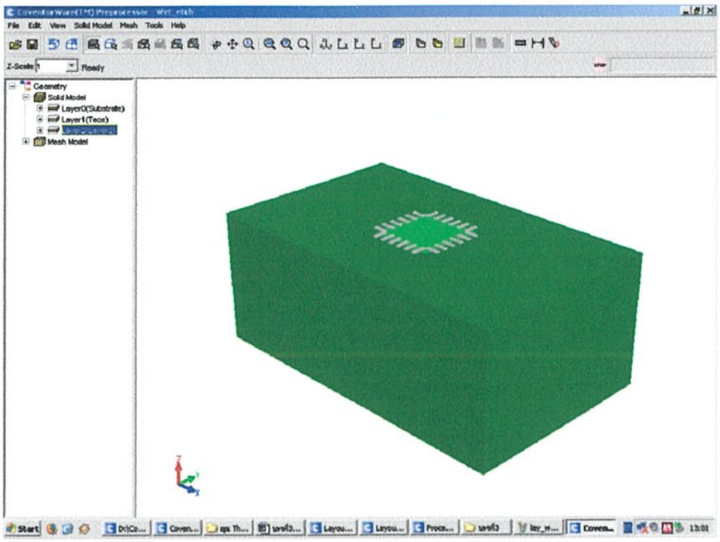


**รูปที่ 3.20** ภาพตัดขวางแสดงส่วนที่เป็น Cavity

หลังจากนั้นทำการสร้างท่อที่ใช้สำหรับการกัดไดอะแฟรมด้วยมาส์กที่ 2 (รูปที่ 3.21) เพื่อใช้ในกระบวนการ Wet-Etch ซึ่งสามารถแสดงได้ดังโครงสร้างภาพ 3 มิติ ในรูปที่ 3.22 ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกันกับมาส์กที่สองที่เราออกแบบด้วยโปรแกรม L-edit

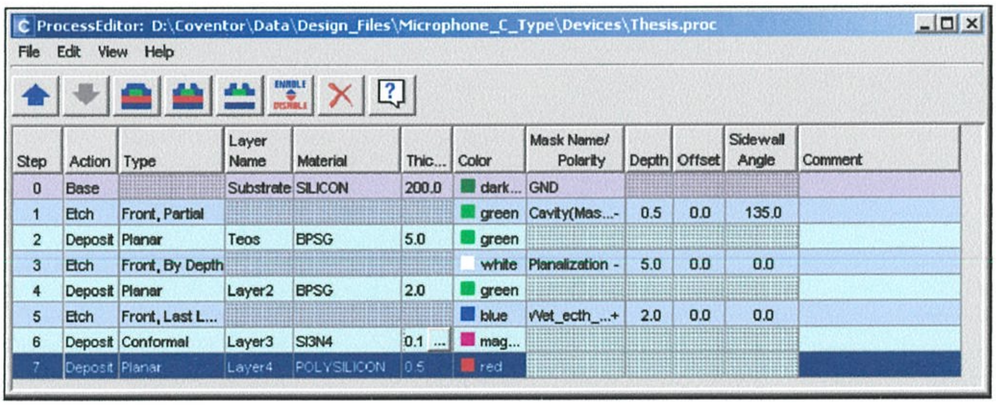



**รูปที่ 3.21** เลย์เอ้าท์ที่ใช้ในการสร้างท่อสำหรับกระบวนการ Wet-Etch Oxide



**รูปที่ 3.22** โครงสร้างภาพ 3 มิติของท่อที่ใช้ในกระบวนการ Wet-Etch oxide

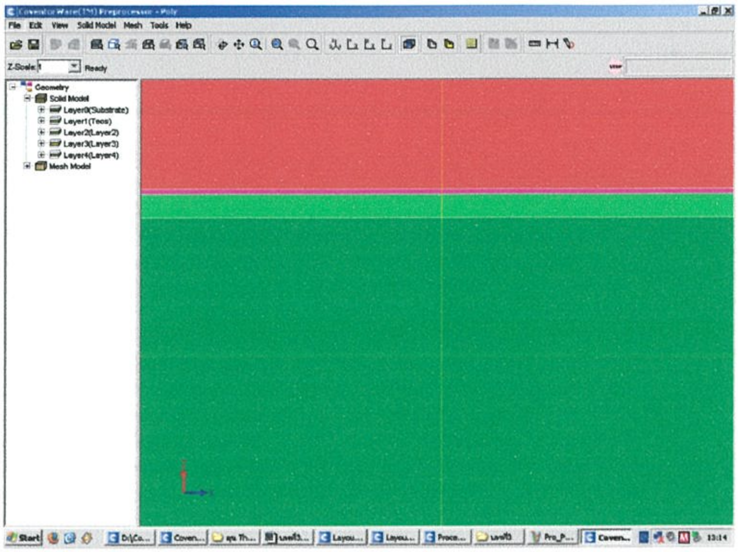
ต่อไปจะทำการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่ความหนา 0.1μm และสร้างชั้นโพลีซิลิคอนที่ความหนา 0.5 μm ซึ่งความหนาของไดอะแฟรมจะกำหนดได้ที่ขั้นตอนนี้ดังแสดงได้ดัง Process Flow ในรูปที่ 3.23 และโครงสร้างภาพ 3 มิติแสดงได้ดังในรูปที่ 3.24 ซึ่งในบริเวณสีชมพูคือชั้นของซิลิคอนไนไตรด์ และ ในส่วนพื้นที่สีแดงคือชั้นของโพลีซิลิคอนซึ่งในรูปนี้มีความหนา 0.5 μm



ProcessEditor: D:\Coventor\Data\Design_Files\Microphone_C_Type\Devices\Thesis.proc

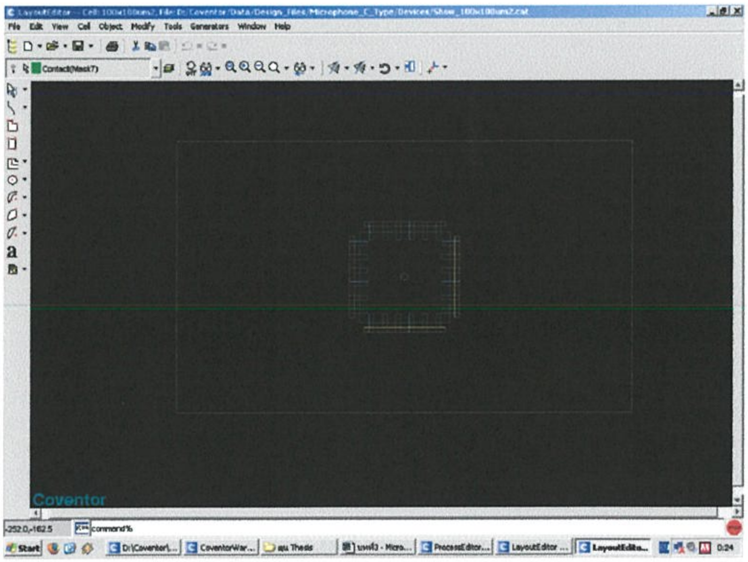
| Step | Action | Type | Layer Name | Material | Thic... | Color | Mask Name/ Polarity | Depth | Offset | Sidewall Angle | Comment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | Base | | Substrate | SILICON | 200.0 | dark... | GND | | | | |
| 1 | Etch | Front, Partial | | | | green | Cavity(Mas...- | 0.5 | 0.0 | 135.0 | |
| 2 | Deposit | Planar | Teos | BPSG | 5.0 | green | | | | | |
| 3 | Etch | Front, By Depth | | | | white | Planalization - | 5.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 4 | Deposit | Planar | Layer2 | BPSG | 2.0 | green | | | | | |
| 5 | Etch | Front, Last L... | | | | blue | Wet_ecth_...+ | 2.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 6 | Deposit | Conformal | Layer3 | SI3N4 | 0.1 ... | mag... | | | | | |
| 7 | Deposit | Planar | Layer4 | POLYSILICON | 0.5 | red | | | | | |

**รูปที่ 3.23** Process Flow ที่ใช้สำหรับกระบวนการสร้างโพลีซิลิคอนซึ่งสามารถกำหนดความหนาของไดอะแฟรมได้ที่ขั้นตอนนี้



**รูปที่ 3.24** โครงสร้างภาพ 3มิติของชั้นซิลิคอนไนไตรด์ (ชมพู) และชั้นโพลีซิลิคอน (แดง)

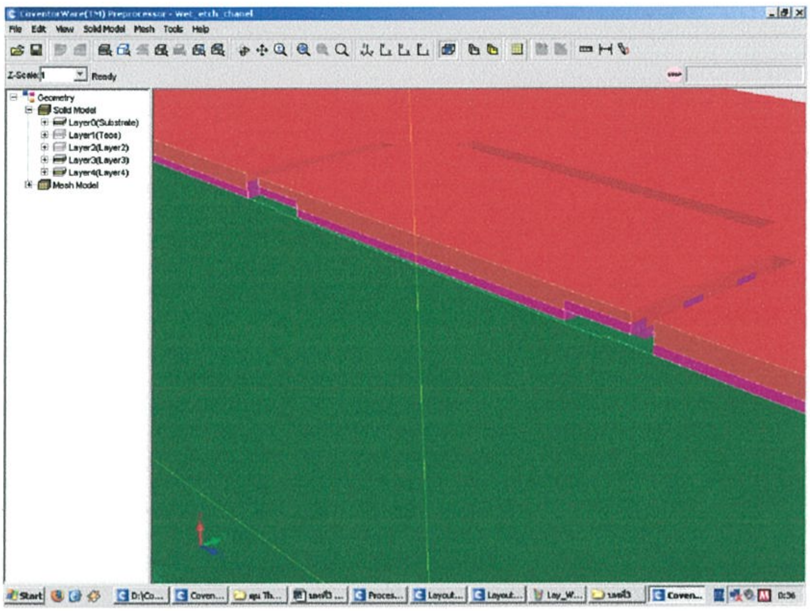
หลังจากทำการสร้างส่วนของไดอะแฟรมแล้ว ขั้นตอนต่อไปเราจะทำการกัดเปิดช่อง Cavity ขั้นตอนนี้เราจะทำการกัดเปิดช่อง cavity ซึ่งเราจะทำการเปิดชั้นโพลีซิลิคอนและซิลิคอนไนไตรด์เพื่อกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกเพื่อสร้างเป็น Cavity โดยใช้มาส์กที่สามดังในรูปที่ 3.25



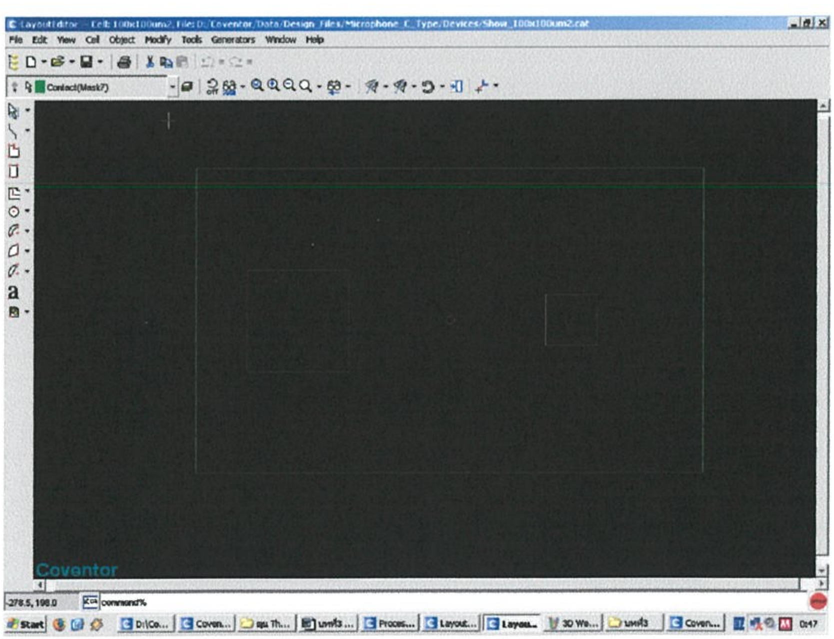

**รูปที่ 3.25** มาส์กที่สามที่ใช้ในการกัดเปิดช่องออกไซด์

โดยภาพโครงสร้าง 3 มิติจะมีลักษณะดังในรูปที่ 3.26 ในขณะนี้เราจะได้ Cavity ที่มีความลึก 0.5 μm แล้วโดยในส่วนต่อไปเราจะทำการสร้างชั้นออกไซด์เพื่อปิดช่องที่เราได้ทำการกัดชั้นออกไซด์ในบริเวณใต้ไดอะแฟรมเนื่องจากช่องนี้อาจทำให้เกิดจุดบกพร่องได้หลังจากนั้นเราจะทำ

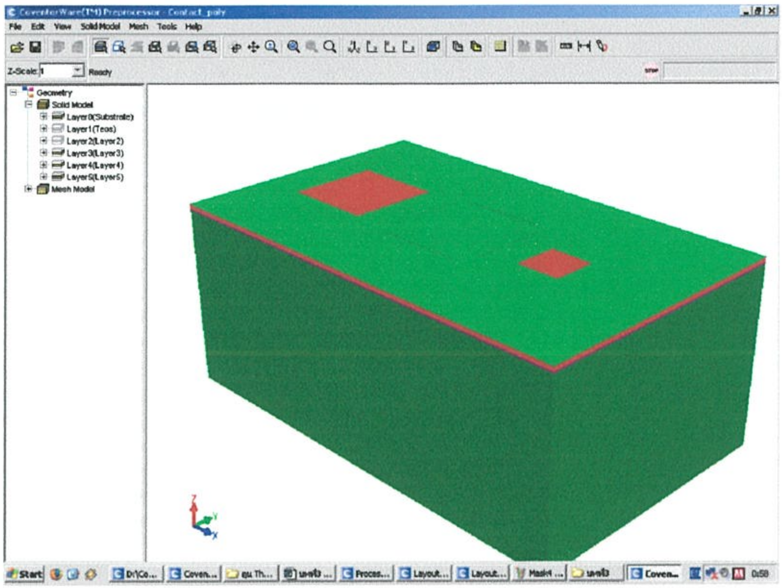
การเปิดชั้นออกไซด์เพื่อที่จะทำเป็นช่องต่อขั้วไฟฟ้าในส่วนของโพลีซิลิคอนโดยเราจะใช้มาส์กที่สี่ ดังในรูปที่ 3.27 โดยอีกด้านหนึ่งนั้นเราจะทำการเปิดชั้นออกไซด์ก่อนเพื่อที่ขั้นตอนต่อไปจะได้สามารถกัดชั้นโพลีซิลิคอนและซิลิคอนไนไตรด์ได้เลยเพื่อที่จะสร้างบริเวณขั้วไฟฟ้ากับฐานรอง ซึ่งโครงสร้างภาพ 3 มิติสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.28



**รูปที่ 3.26** โครงสร้างภาพ 3 มิติในการกัดเพื่อสร้าง Cavity โดยใช้มาส์กที่สาม

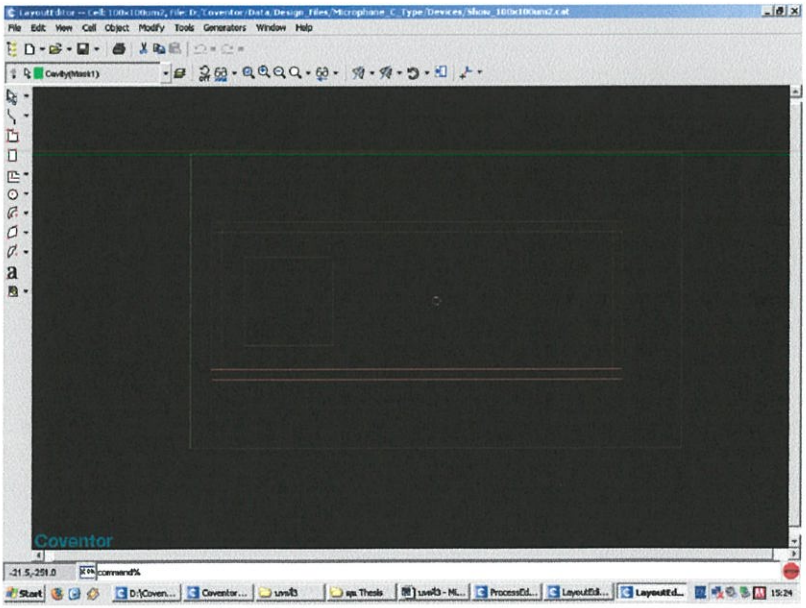



**รูปที่ 3.27** มาส์กที่สี่ที่ใช้ในการเปิดชั้นออกไซด์เพื่อที่จะใช้เป็นบริเวณที่ใช้ต่อขั้วไฟฟ้า

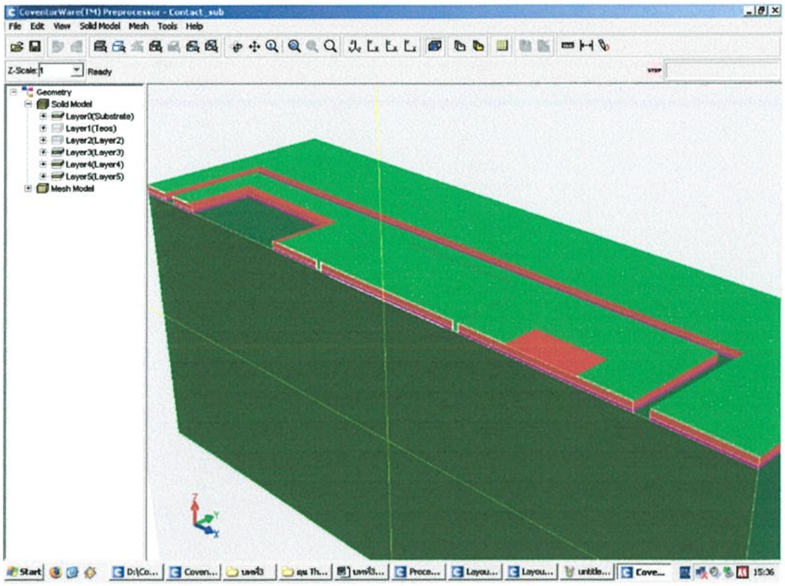


**รูปที่ 3.28** ภาพโครงสร้าง 3 มิติในส่วนของการสร้างขั้วไฟฟ้ากับโพลีซิลิคอน

ซึ่งหลังจากนั้นเราจะทำการเปิดชั้นโพลีซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไนไตรด์ เพื่อที่จะสร้างขั้วไฟฟ้าที่บริเวณฐานรองซึ่งเราสามารถทำการกัดชั้นโพลีซิลคอนและซิลิคอนไนไตรด์ได้ดว้ยมาส์กที่ห้า (รูปที่ 3.29) สำหรับกรอบสีแดงดังในรูปใช้เพื่อกัดในการแบ่งแยกแต่ละเซลล์ออกจากกัน โดยภาพโครงสร้าง 3 มิติ ของขั้นตอนการเปิดบริเวณขั้วไฟฟ้าของฐานรองแสดงได้ดังในรูปที่ 3.30

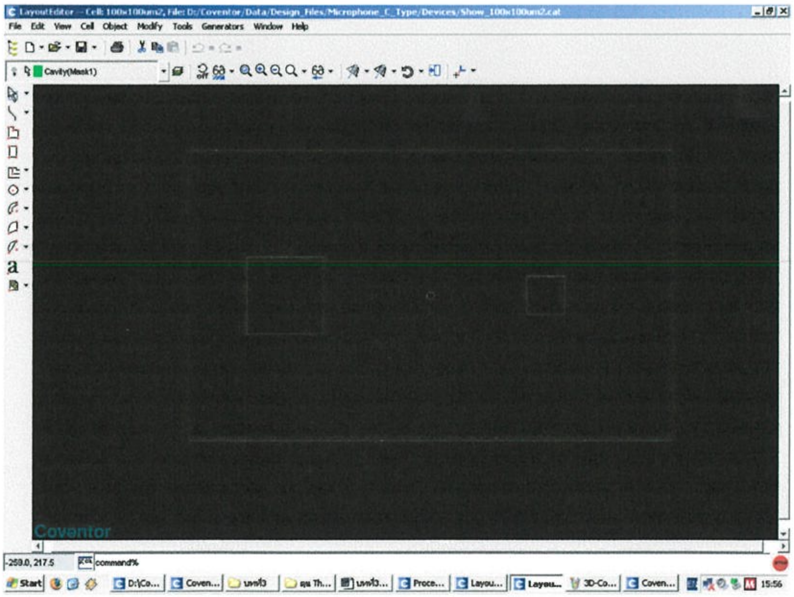


**รูปที่ 3.29** มาส์กที่ห้าใช้ในการเปิดขั้วไฟฟ้ากับฐานรอง

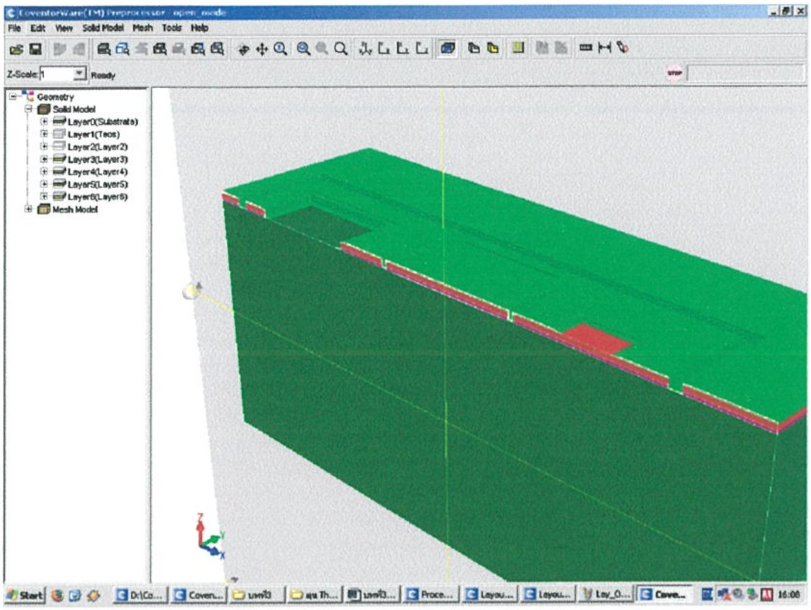


**รูปที่ 3.30** โครงสร้าง 3 มิติหลังจากเปิดขั้วไฟฟ้าบริเวณฐานรองแล้ว

หลังจากนั้นเราจะสร้างชั้นออกไซด์หนา 0.5 μm เพื่อกันการลัดวงจรของขั้วไฟฟ้าที่ชั้นของโพลีซิลิคอน หลังจากนั้นจะทำการเปิดออกไซด์บริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านด้วยมาส์กที่หกดังในรูปที่ 3.31 ซึ่งภาพโครงสร้าง 3มิติหลังจากขั้นตอนนี้จะแสดงในภาพที่ 3.32

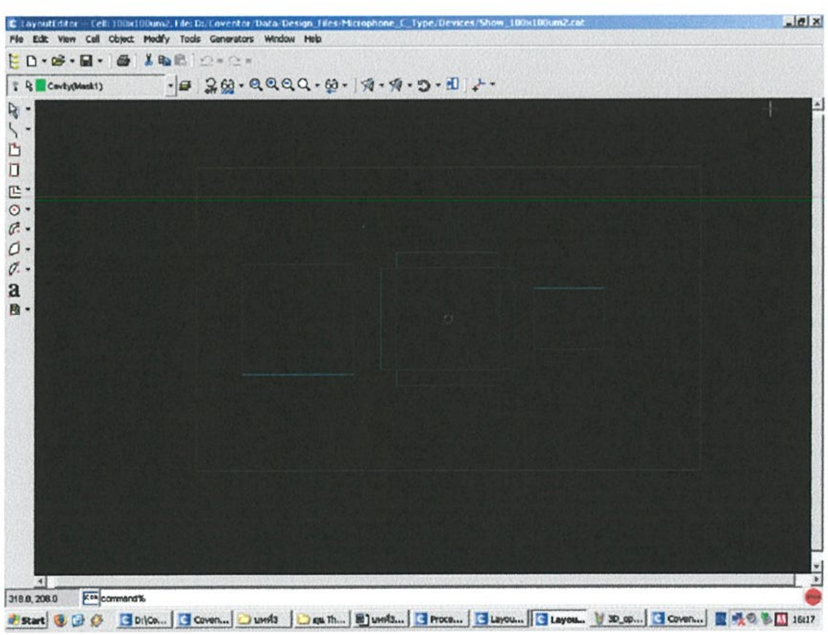


**รูปที่ 3.31** มาส์กที่หกใช้สำหรับเปิดชั้นออกไซด์ที่บริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน

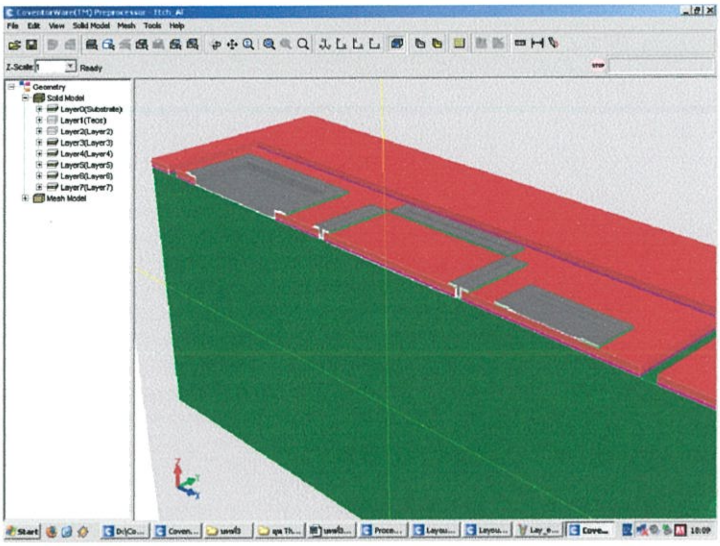


**รูปที่ 3.32** ภาพโครงสร้าง 3มิติ หลังจากกัดชั้นออกไซด์เพื่อเปิดขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน

เมื่อเปิดบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านแล้ว เราจะทำการสร้างชั้นอลูมิเนียมหนา 0.5 μm หลังจากนั้นจะทำการกัดชั้นอลูมิเนียมและชั้นออกไซด์ออกเหลือไว้ แต่บริเวณที่เราจะสร้างเป็นขั้วไฟฟ้า โดยเราจะใช้มาส์กที่เจ็ดดังในรูปที่ 3.33 ในการกัดขั้วไฟฟ้าตามที่เราต้องการ ซึ่งโครงสร้าง 3 มิติ จะแสดงอยู่ในรูป ที่ 3.34

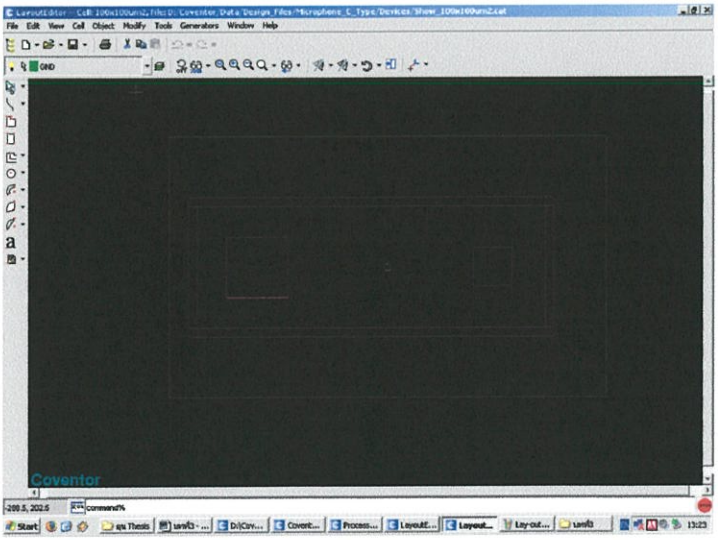


**รูปที่ 3.33** มาส์กที่เจ็ดใช้สำหรับกัดอลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าบริเวณที่เราต้องการ

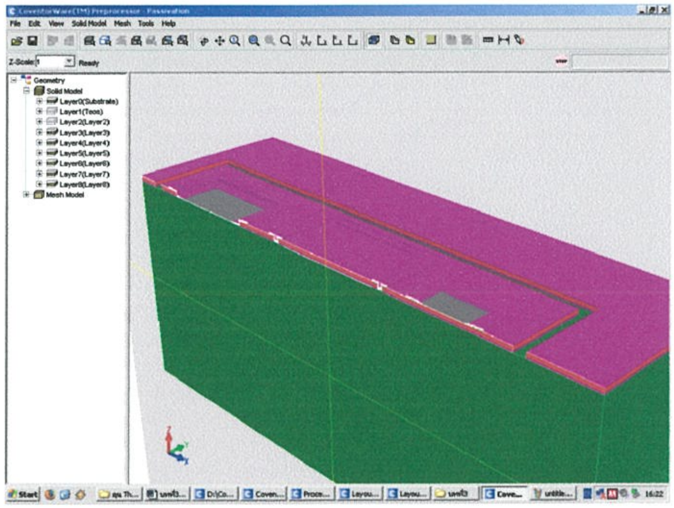


**รูปที่ 3.34** ภาพโครงสร้าง 3 มิติ แสดงโครงสร้างที่มีขั้วไฟฟ้าแล้ว

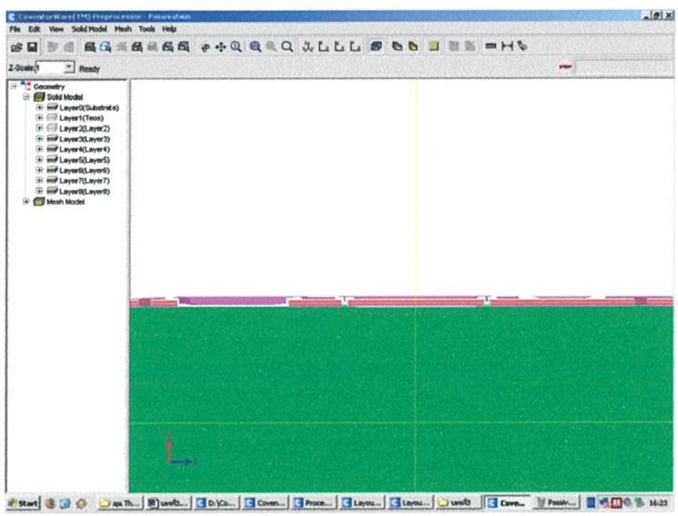
ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าแล้วก็จะถึงกระบวนการ Passivation เพื่อป้องกันตัวทรานสดิวเซอร์จากสิ่งปนเปื้อนภายนอกต่างๆ เช่น ความชื้น ฝุ่นละออง เป็นต้น โดยเราจะทำการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่ความหนา 0.65 μm หลังจากนั้นจะทำการเปิดชั้น ซิลิคอนไนไตรด์บริเวณขั้วไฟฟ้าด้วยมาส์กที่แปด (รูปที่ 3.35) นอกจากนั้นยังทำการกัดซิลิกอนไนไตรด์ในส่วนที่เราต้องการแบ่งแยกเซลล์ด้วยซึ่งภาพโครงสร้าง 3 มิติ แสดงได้ดังในรูปที่ 3.36 ซึ่งหลังจากขั้นตอนนี้เราก็จะได้โครงสร้าง 3 มิติที่สมบูรณ์ที่ ความหนาโพลีซิลิคอน 0.5 μm และขนาดพื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$




**รูปที่ 3.35** มาส์กที่แปดใช้สำหรับกัดชั้น Passivation ออกบริเวณขั้วไฟฟ้า



(ก)



(ข)

**รูปที่ 3.36** โครงสร้าง 3 มิติที่ผ่านกระบวนการ Passivation แล้ว

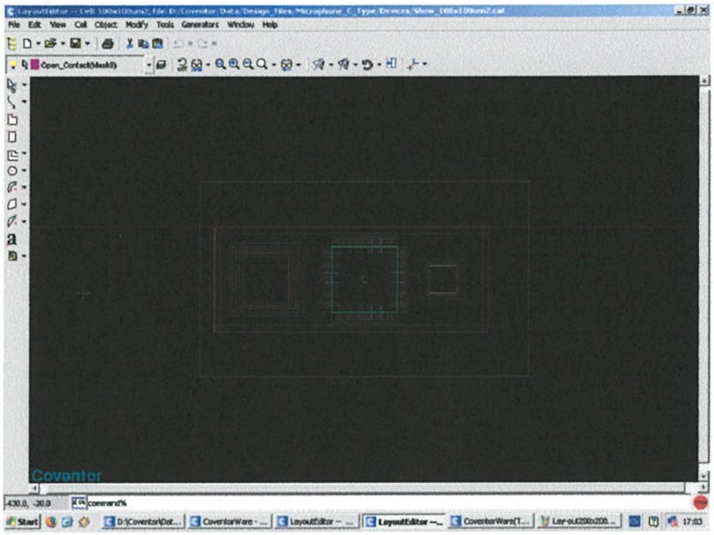
(ก) ภาพโครงสร้าง 3 มิติเมื่อผ่านการ Passivation

(ข) ภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์ที่สมบูรณ์

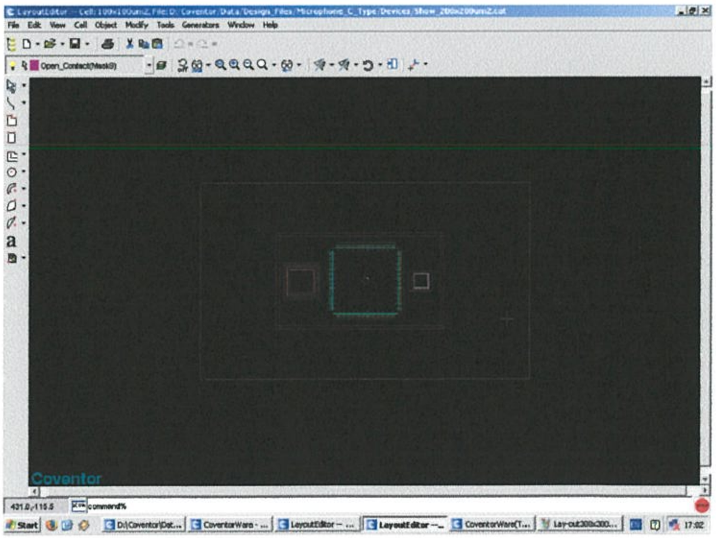
ซึ่งจากรูปที่ 3.36 (ก) คือโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์โดยจากในรูป จะมีความหนาโพลีซิลิคอนเท่ากับ 0.5 μm ซึ่งความหนาโพลีซิลิคอนเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่เราจะทำการศึกษาโดยเราจะทำการศึกษาความหนาของโพลีซิลิคอนที่0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm ซึ่งเราสามารถเปลี่ยนความหนาของโพลีซิลิคอนได้ใน Process Flow ดังในรูปที่ 3.37

**3.4 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่พื้นที่หน้าตัดไดอะแฟรมค่าต่างๆด้วยโปรแกรม Coventorware™**

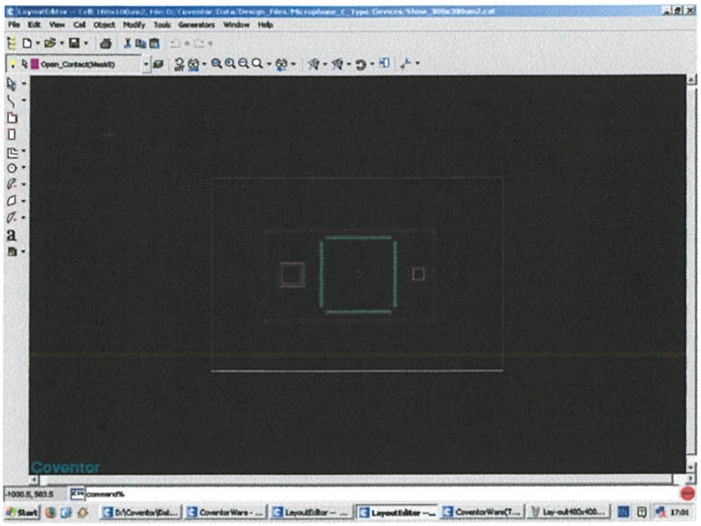
หลังจากที่เราทำการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ขนาดของไดอะแฟรมส่วนโพลีซิลิคอนว่ามีผลอย่างไรต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ ในส่วนนี้เราจะทำการออกแบบเพื่อศึกษาถึงพารามิเตอร์พื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมโดยเราจะสนใจขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ค่า 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ โดยเราสามารถจำลองโครงสร้างสามมิติด้วยเลย์เอ้าดังในรูปที่ 23



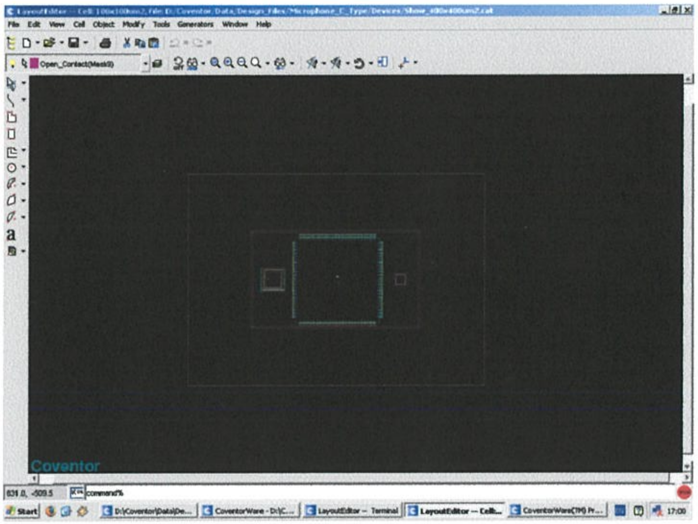

(ก) 100x100 $\mu m^2$




(ข) 200x200 $\mu m^2$



(ค) 300x300 $\mu m^2$

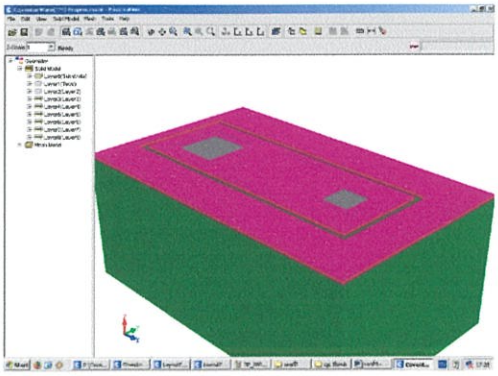


(ง) 400x400 $\mu m^2$

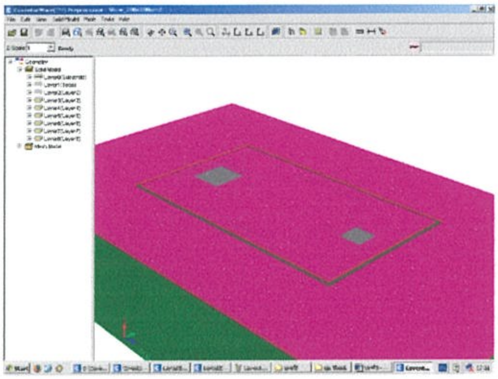
**รูปที่ 3.37** เลย์เอ้าท์ที่ใช้ในการจำลองโครงสร้าง 3มิติเพื่อศึกษาถึงพารามิเตอร์ขนาดพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรม

(ก) 100x100 $\mu m^2$ (ข) 200x200 $\mu m^2$ (ค) 300x300 $\mu m^2$ (ง) 400x400 $\mu m^2$

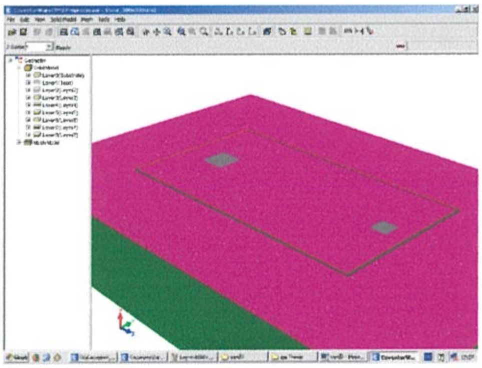
ซึ่งภาพจำลองโครงสร้าง 3 มิติที่สมบูรณ์จะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.38 โดยเราจะกำหนดค่าความหนาของไดอะแฟรมส่วนโพลีซิลิคอนเป็น 1.0 μm เพื่อศึกษาถึงผลของขนาดพื้นที่หน้าตัดว่ามีผลอย่างไรกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ



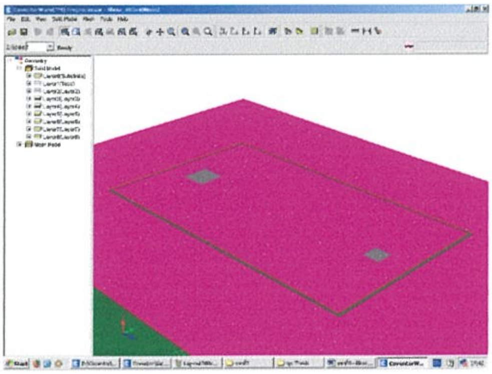
(ก) 100x100 $\mu m^2$



(ข) 200x200 $\mu m^2$



(ค) 300x300 $\mu m^2$



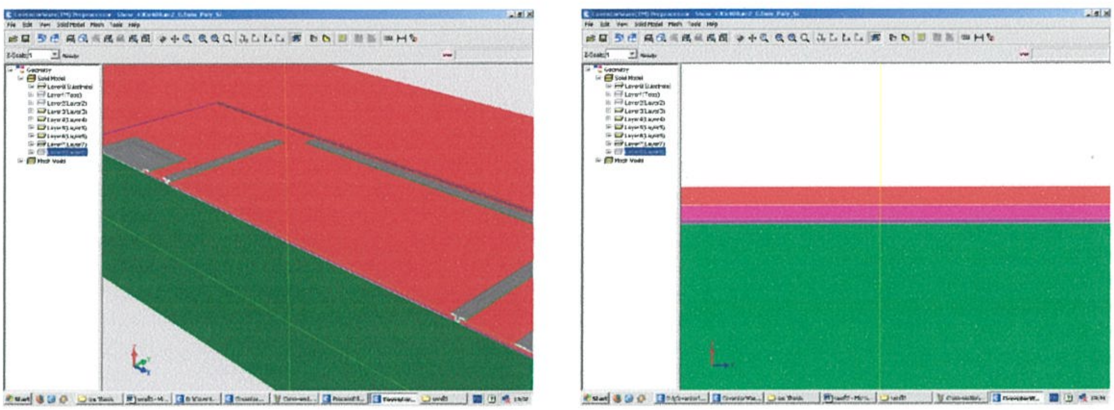
(ง) 400x400 $\mu m^2$

**รูปที่ 3.38** ภาพจำลองโครงสร้าง 3 มิติที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ

(ก) 100x100 $\mu m^2$ (ข) 200x200 $\mu m^2$ (ค) 300x300 $\mu m^2$ (ง) 400x400 $\mu m^2$

## 3.5 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยเปลี่ยนชนิดสารที่ใช้ทำไดอะแฟรมด้วยโปรแกรม Coventorware™

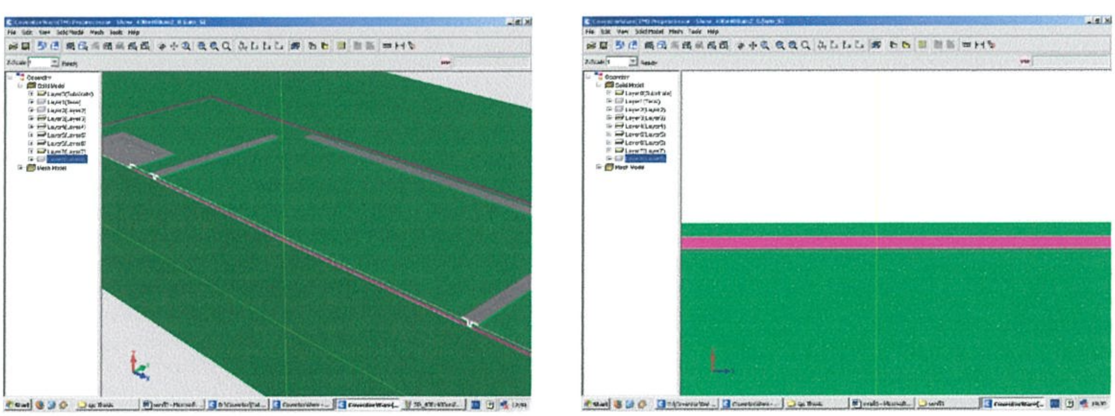
หลังจากเราทำการศึกษาพารามิเตอร์ของความหนาและขนาดพื้นที่หน้าตัดแล้ว ต่อไปเราจะมาทำการศึกษาถึงชนิดของสารที่นำมาใช้เป็นไดอะแฟรม ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ซิงเกิลคริสตัลซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งเราจะทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับโพลีซิลิคอน โดยเราจะทำการศึกษาที่ความหนาของไดอะแฟรมที่ 0.5 μm และขนาดพื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ ซึ่งชนิดของสารสามารถเปลี่ยนได้ใน Process Flow ดังที่ได้อธิบายไปแล้ว โดยภาพจำลองโครงสร้าง 3 มิติ ที่ใช้ในการทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 3.39-3.40



(ก) (ข)

**รูปที่ 3.39** โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม

(ก) ภาพเต็ม (ข) ภาพตัดขวาง



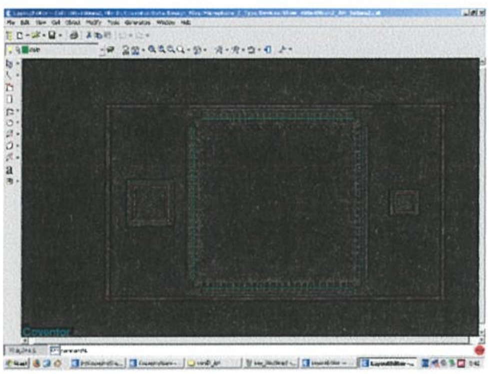
(ก) (ข)

**รูปที่ 3.40** โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ใช้ซิงเกิลคริสตัลซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม

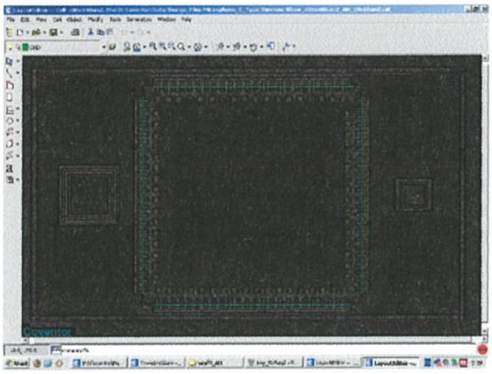
(ก) ภาพเต็ม (ข) ภาพตัดขวาง

### 3.6 การออกแบบอะคูสติคโฮลบนไดอะแฟรมในทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุด้วยโปรแกรม Coventorware™

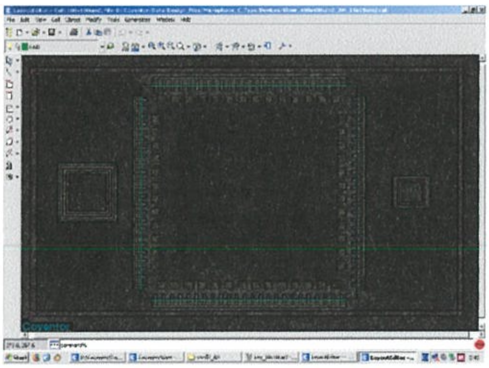
หลังจากที่เราทำการศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว ในส่วนนี้เราจะมาทำการศึกษาถึงอคูสติคโฮลซึ่งมีส่วนช่วยในการลดสัญญาณรบกวน และยังช่วยเพิ่มความไวในการทำงานอีกด้วย โดยเราจะทำการศึกษาอคูสติดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ โดยเราจะใช้เลย์เอ้าดังในรูปที่ 3.41 ในการสร้างอคูสติคโฮล ซึ่งไดอะแฟรมจะสร้างจากโพลีซิลิคอน โดยภาพโครงสร้าง 3 มิติของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลแสดงอยู่ในรูปที่ 3.42-3.45



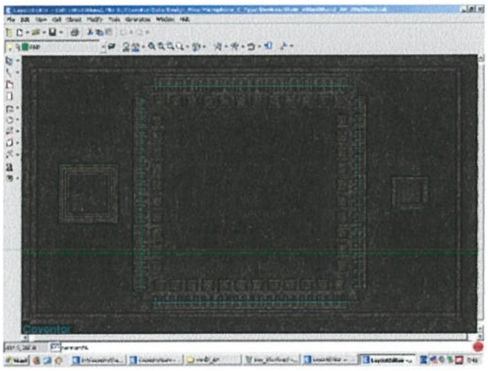
(ก)



(ข)



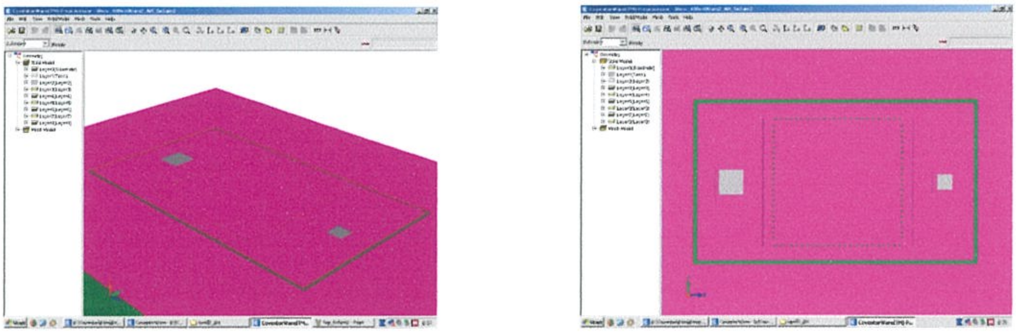
(ค)



(ง)

**รูปที่ 3.41** เลย์เอ้าที่ใช้ในการสร้างอคูสติคโฮลที่ขนาดต่างๆ

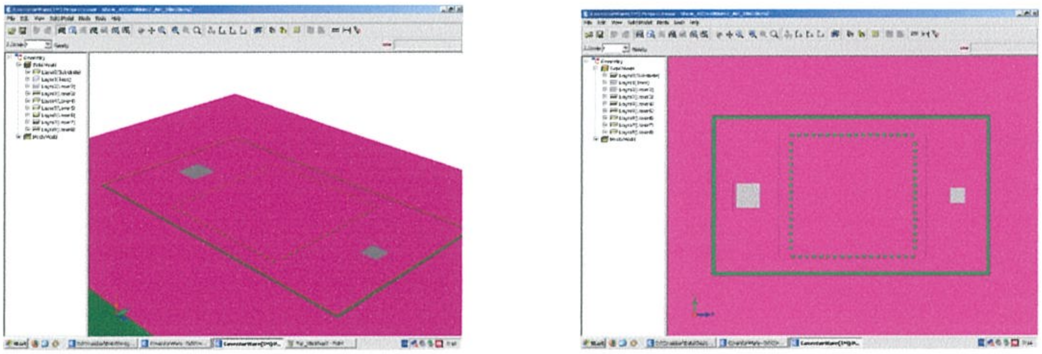
(ก) 5x5 $\mu m^2$ (ข) 10x10 $\mu m^2$ (ค) 15x15 $\mu m^2$ (ง) 20x20 $\mu m^2$



(ก) (ข)

**รูปที่ 3.42** ภาพโครงสร้าง 3 มิติของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาด 5x5 $\mu m^2$

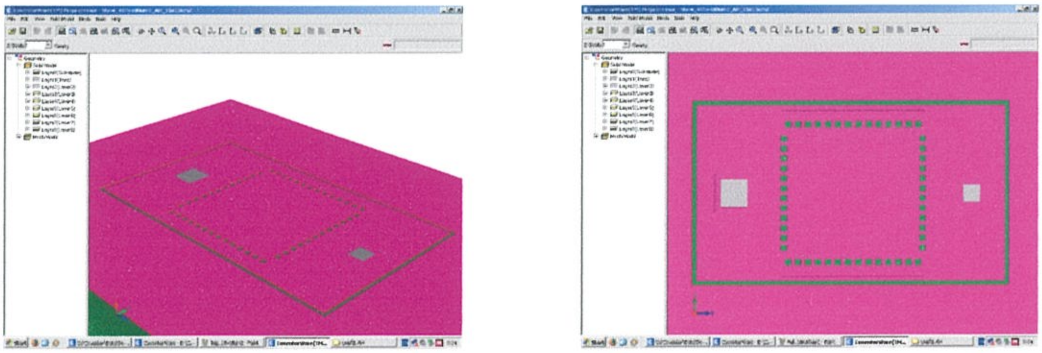
(ก) ภาพเต็ม (ข) ภาพมุมบน



(ก) (ข)

**รูปที่ 3.43** ภาพโครงสร้าง 3 มิติของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาด 10x10 $\mu m^2$

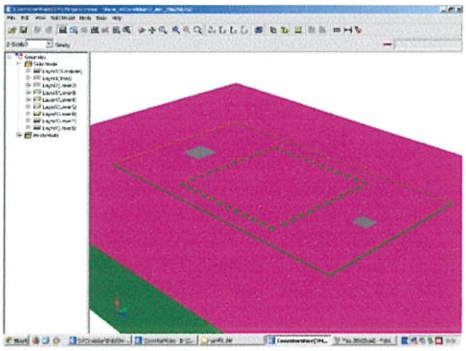
(ก) ภาพเต็ม (ข) ภาพมุมบน



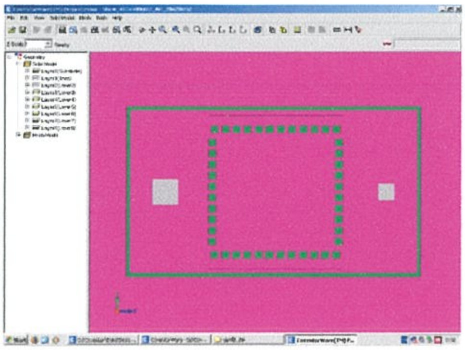
(ก) (ข)

**รูปที่ 3.44** ภาพโครงสร้าง 3 มิติของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาด 15x15 $\mu m^2$

(ก) ภาพเต็ม (ข) ภาพมุมบน



(ก)



(ข)

**รูปที่ 3.45** ภาพโครงสร้าง 3 มิติของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$

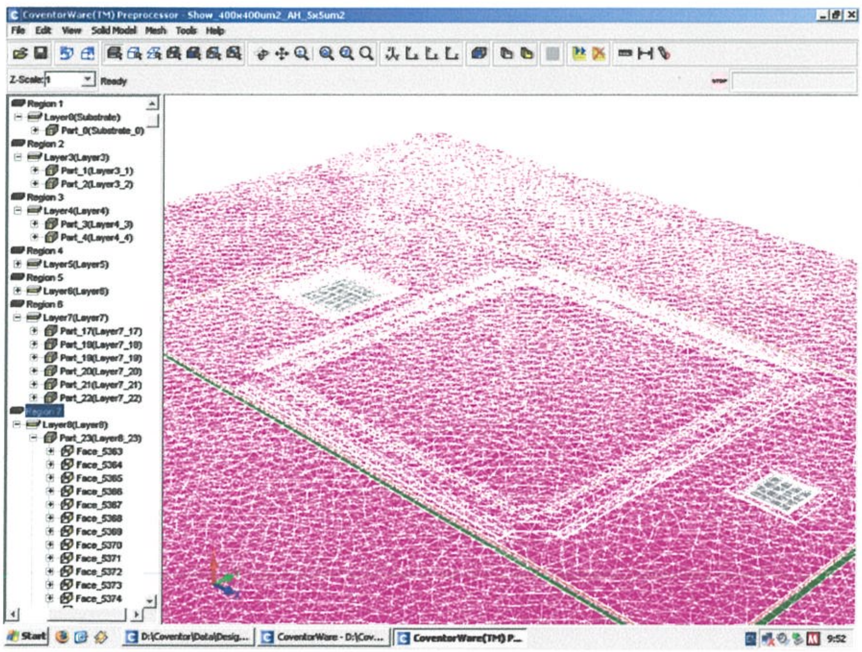
(ก) ภาพเต็ม (ข) ภาพมุมบน

# บทที่ 4

# การทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Coventorware$^{tm}$

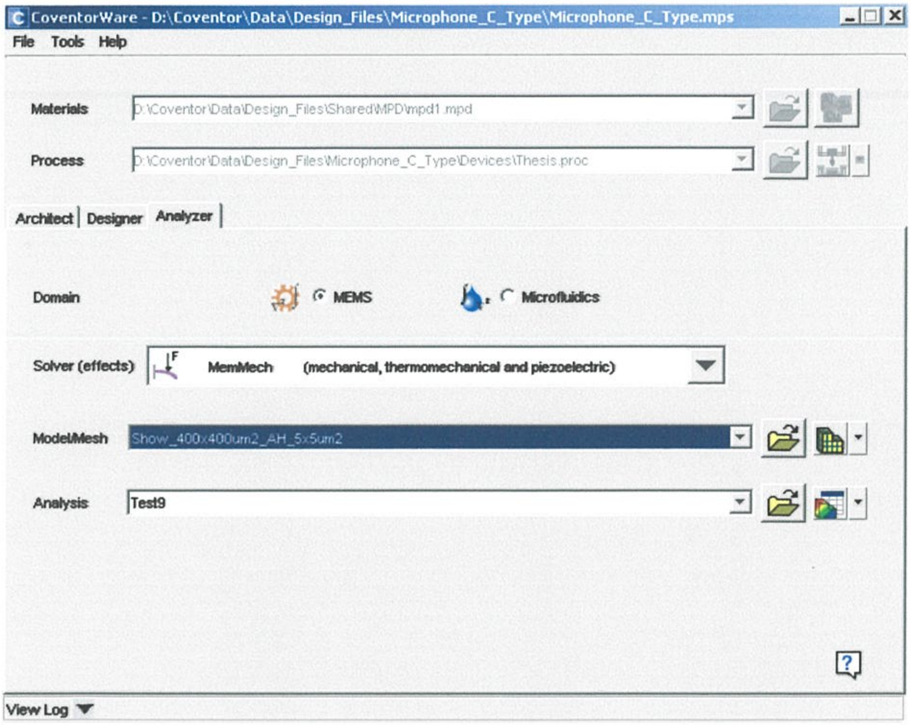
## 4.1 วิธีการใช้งานโปรแกรม Coventorware$^{tm}$ เบื้องต้น

เมื่อเราได้ภาพจำลองโครงสร้าง 3 มิติตามพารามิเตอร์ต่างๆที่เราได้ทำการออกแบบมาแล้ว หลังจากนั้นเราจะต้องทำการกำหนดค่า Finite Element ให้กับส่วนต่างๆในโครงสร้างของเราซึ่งค่า Finite Element จะมีผลต่อความแม่นยำในการจำลองการทำงาน ซึ่งยิ่งถ้าค่า Finite Element มีความละเอียดสูงการคำนวณก็จะมีผลออกมาถูกต้องแม่นยำมากแต่จะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน ดังนั้นเราจึงต้องหาค่า Finite Element ให้เหมาะสม โดยตัวอย่างภาพโครงสร้าง 3 มิติที่ได้ทำการ Finite Element แล้วแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1



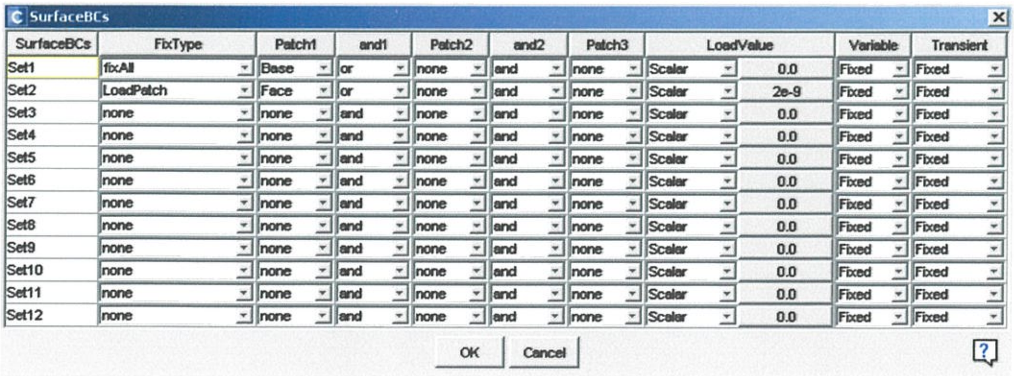
**รูปที่ 4.1** โครงสร้าง 3 มิติที่ได้ทำการ Finite Element แล้ว

จากนั้นนำภาพ 3 มิติที่ทำการกำหนดค่า finite element แล้วจากกระบวนการ Preprocessor ไปเข้าสู่กระบวนการจำลองการทำงานต่อไป ซึ่งเราจะใช้งานในส่วนของ Memmech ซึ่งจะใช้ในการจำลองงานทางกล โดยเราจะใช้หาค่าระยะขจัด (Displacement) เพื่อจะนำไปใช้หาค่าความไวในการทำงานซึ่งจะอยู่ในส่วนต่อไป ในรูปที่ 4.2 แสดงการใช้งานในส่วนของ Memmech



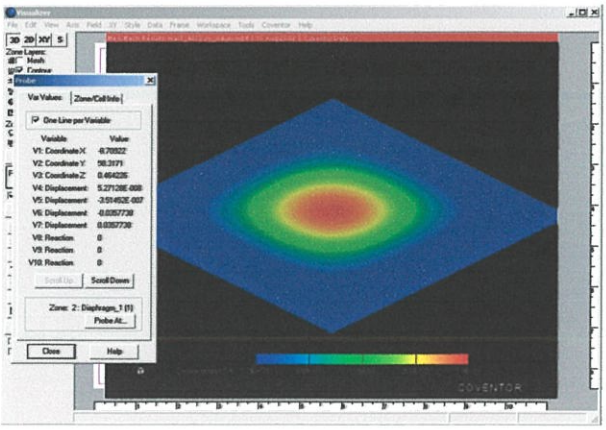

**รูปที่ 4.2** การใช้งานในส่วนของ Memmech

โดยเราจะต้องทำการตั้งค่าในหน้าของ Surface Boundary Condition Setting (SurfaceBCs) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเป็นการตั้งค่าทางกลต่างๆ เช่น จุดยึดของชั้นสารต่างๆ และจุดที่แรงดันตกกระทบ รวมถึงค่าสเกลล่าของแรงดัน เป็นต้น หลังจากตั้งค่าต่างๆเรียบร้อยแล้วก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการประมวลผลซึ่งผลการทดลองนั้นจะแสดงออกมาในรูปของตาราง กราฟ และ ภาพ 3 มิติดังแสดงในรูปที่ 4.4

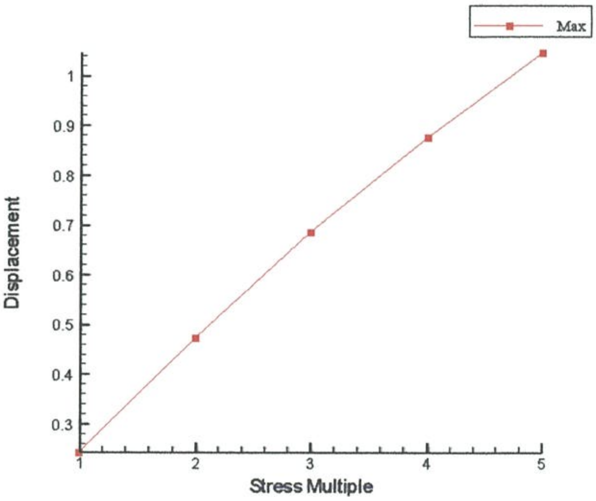


| SurfaceBCs | FixType | Patch1 | and1 | Patch2 | and2 | Patch3 | LoadValue | | Variable | Transient |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Set1 | fixAll | Base | or | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set2 | LoadPatch | Face | or | none | and | none | Scalar | 2e-9 | Fixed | Fixed |
| Set3 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set4 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set5 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set6 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set7 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set8 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set9 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set10 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set11 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |
| Set12 | none | none | and | none | and | none | Scalar | 0.0 | Fixed | Fixed |

**รูปที่ 4.3** Surface Boundary Condition Setting



(ก)




(ข)

mechDomain

| mechDomain | Maximum | Minimum |
|---|---|---|
| Node Displacement | 1.027271E-07 | 0.0 |
| Node X Displacement | 8.268830E-10 | -8.268831E-10 |
| Node Y Displacement | 8.268831E-10 | -8.268831E-10 |
| Node Z Displacement | 1.967625E-12 | -1.027271E-07 |

Close

(ค)

**รูปที่ 4.4** ผลจากการจำลองการทำงาน

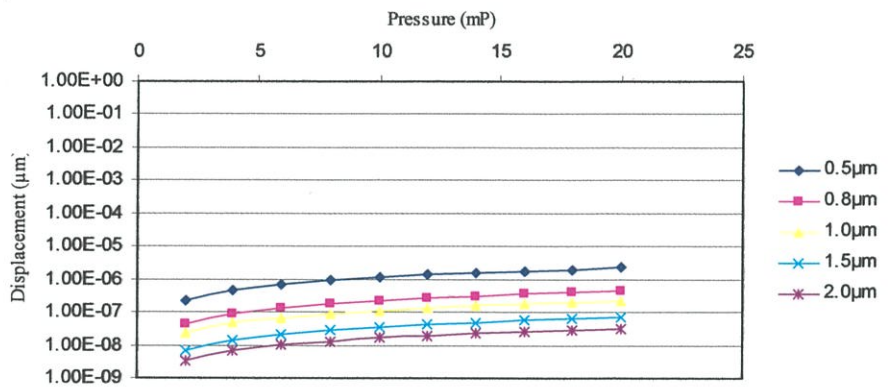
(ก) ภาพ 3 มิติ

(ข) กราฟ

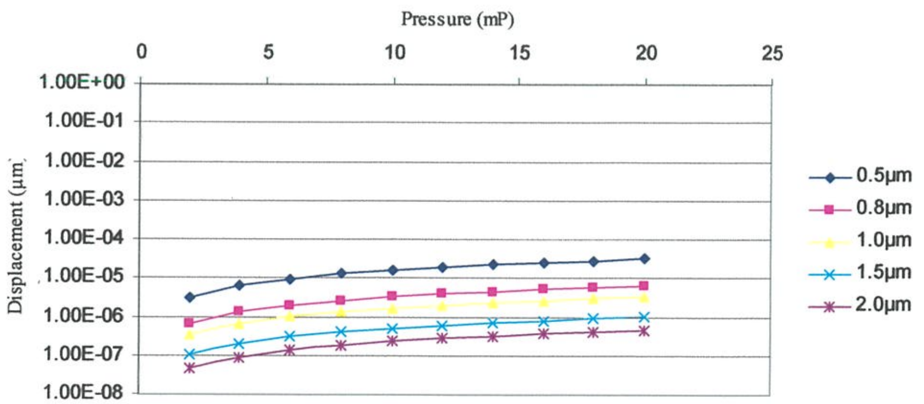
(ค) ตาราง

**4.2 ผลของความหนาไดอะแฟรมที่มีผลต่อค่าความไว**

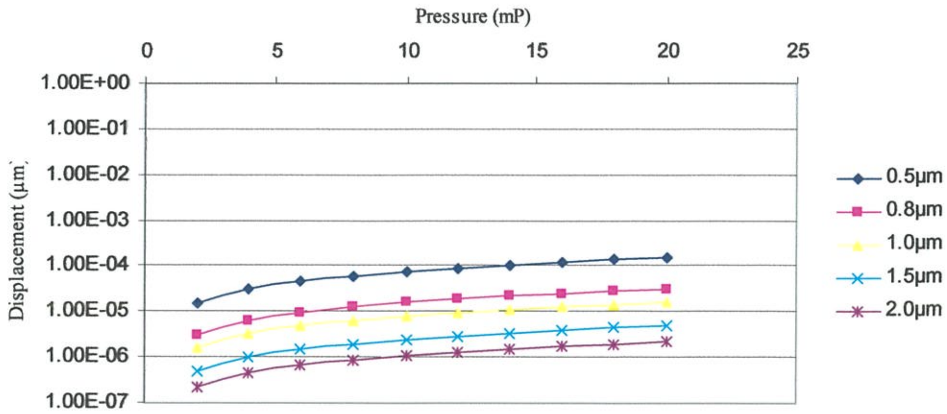
ในการทดลองเรื่องผลของความหนาที่มีผลต่อค่าความไวในการทำงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาที่ความหนาดังนี้ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm ซึ่งความหนาทั้ง 5 ค่านี้เป็นความหนาที่ TMEC สามารถสร้างได้จริง ซึ่งพิจารณาที่พื้นที่หน้าตัดต่างๆ โดยจะทำการทดสอบค่าระยะขจัดที่ความดัน 2-20 mPA ซึ่งเป็นช่วงความดันของเสียง โดยค่าระยะขจัดที่ได้จะนำไปใช้ในการคำนวนค่าความจุไฟฟ้าและค่าความไวในการทำงานต่อไป โดยผลการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปที่ 4.5-4.8 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความหนามีค่ามากขึ้นระยะขจัดจะมีค่าลดลงเนื่องจากไดอะแฟรมมีความหนามากขึ้นจึงทำให้มีค่าความแข็งแรงสูงขึ้น



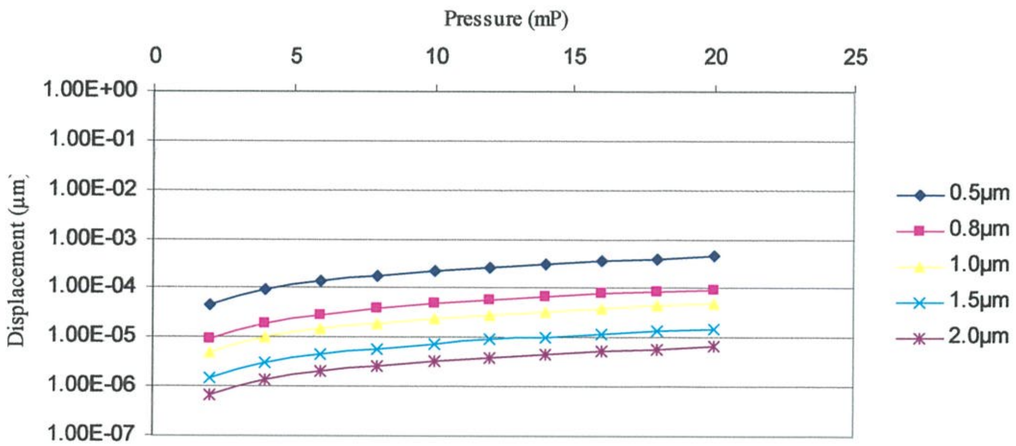

**รูปที่ 4.5** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด $100 \times 100\ \mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm




**รูปที่ 4.6** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด $200 \times 200\ \mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm




**รูปที่ 4.7** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 $\mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm

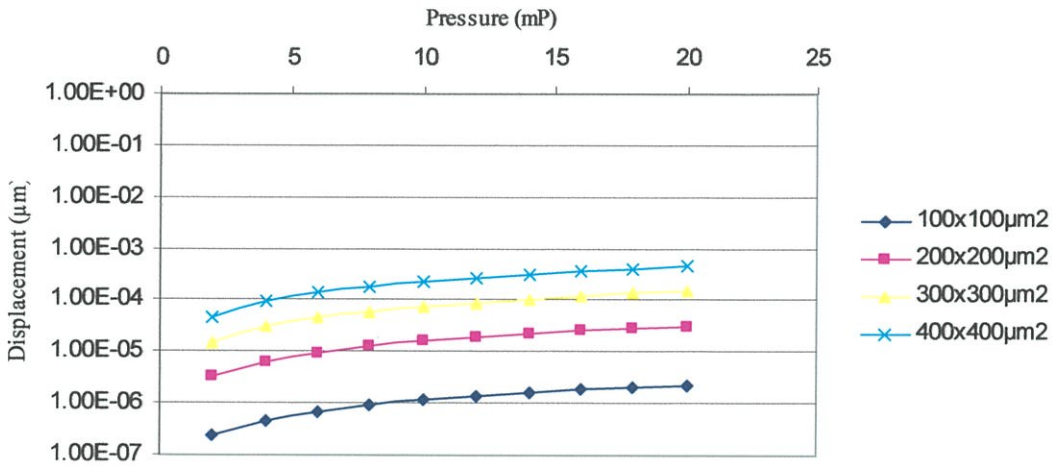



**รูปที่ 4.8** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm

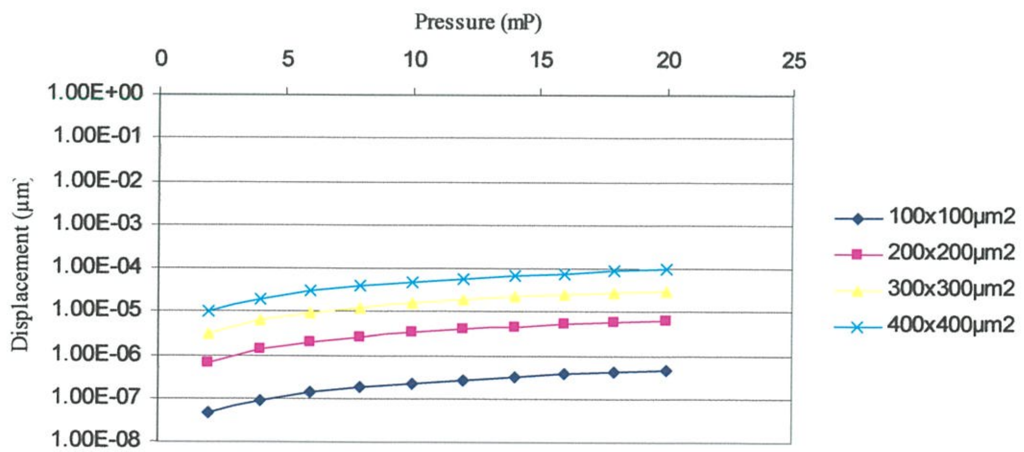
เมื่อพิจารณาจากกราฟแล้วจะพบว่า เมื่อมีค่าความดันเพิ่มสูงขึ้นระยะขจัดของไดอะแฟรมจะเพิ่มขึ้น ซึ่งที่ความหนา 0.5 μm จะมีค่าระยะขจัดสูงที่สุดในทุกๆพื้นที่หนาตัด และ ที่ทุกๆความดัน ในทางตรงกันข้ามที่ความหนา 2.0 μm จะมีค่าระยะขจัดสูงที่สุดในทุกๆพื้นที่หนาตัด และ ที่ทุกๆความดัน ซึ่งค่าระยะขจัดนี้จะมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าและความไวในการทำงาน ซึ่งจะได้นำเสนอต่อไป

### 4.3 ผลของพื้นที่หน้าตัดไดอะแฟรมที่มีผลต่อค่าความไว

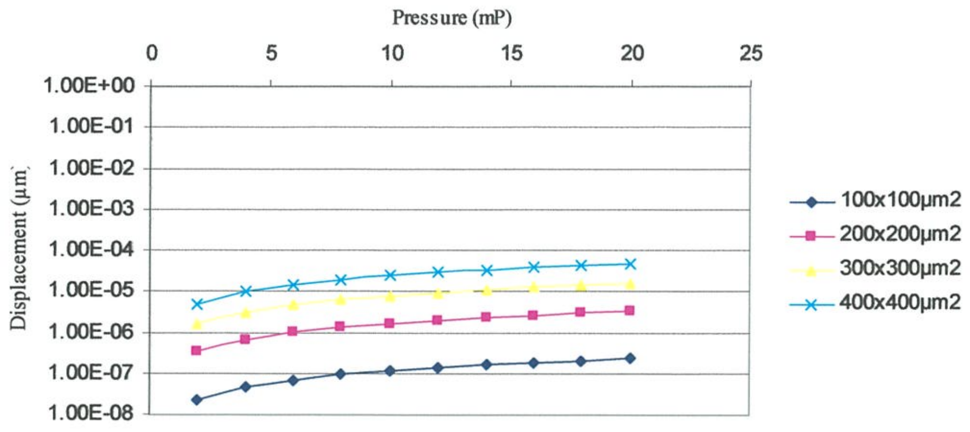
หลังจากที่ได้ศึกษาผลของความหนาที่มีผลต่อระยะขจัดแล้ว ในส่วนนี้จะได้ทำการศึกษาผลของพื้นที่หน้าตัดที่มีผลต่อค่าความไว โดยจะทำการศึกษาที่พื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ ที่ความหนาค่าต่างๆ โดยจะทดสอบที่ความดัน 2-20 mPa โดยผลการทดลองที่ได้จะแสดงดังในรูปที่ 4.9-4.13



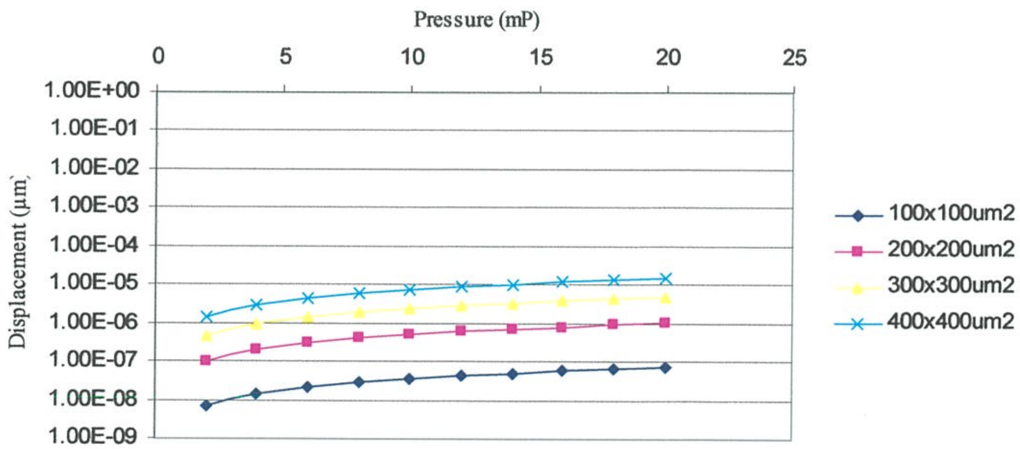

**รูปที่ 4.9** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่ความหนา 0.5µm และพื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$



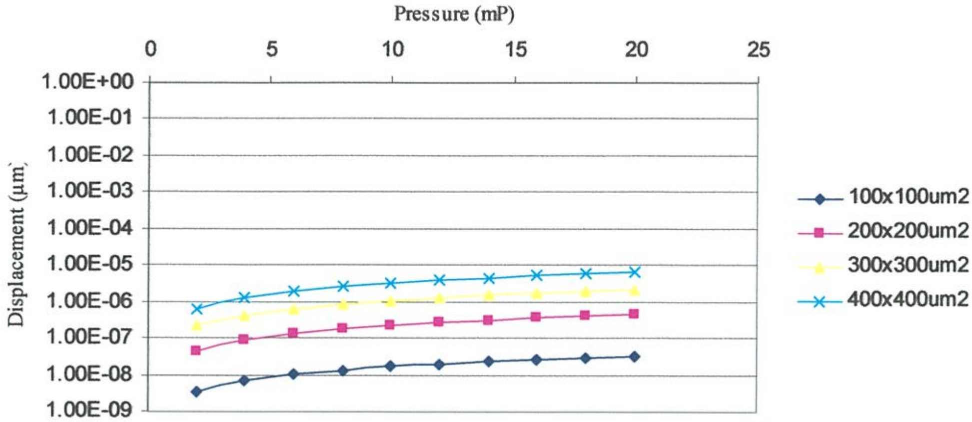

**รูปที่ 4.10** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่ความหนา 0.8µm และพื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$




**รูปที่ 4.11** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่ความหนา 1.0μm และพื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$




**รูปที่ 4.12** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่ความหนา 1.5μm และพื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$




**รูปที่ 4.13** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่ความหนา 2.0μm และพื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดมีค่ามากขึ้น ระยะขจัดจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ในการรับความดันมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ จะมีค่าระยะขจัดสูงที่สุดในทุกๆความหนา และ ที่ทุกๆความดัน ในทางตรงกันข้ามที่ความหนา 2.0 μm จะมีค่าระยะขจัดสูงที่สุดในทุกๆความหนา และ ที่ทุกๆความดัน ซึ่งค่าระยะขจัดนี้จะมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าและความไวในการทำงาน ซึ่งสามารถคำนวนค่าความจุไฟฟ้าและความไวได้

จากสมการที่ใช้หาค่าความจุไฟฟ้าคือ[5]

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \tag{4.1}$$

โดยที่ C คือค่าความจุไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดัน (F)
$\varepsilon_0$ คือค่าเพอร์มิตติวิตี้ของสูญญากาศ (F/m)
$\varepsilon_r$ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นฉนวน
A คือพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรม (m2)
d คือระยะห่างระหว่างเพลท (m)

ซึ่งจากสมการที่ (4.1) จะเห็นได้ว่าเราสามารถคำนวนค่าความจุไฟฟ้าออกมาได้ซึ่งจากการจำลองการทำงานจะทำให้ทราบค่า d และค่า A และค่า $\epsilon_0$ ซึ่งเป็นค่าคงตัวส่วนค่า $\epsilon_r$ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นฉนวนซึ่งจากโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบชั้นฉนวนก็คือ ซิลิคอนไนไตรด์และ

อากาศซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริค 7.5 และ 1 ตามลำดับ ส่วนค่า d ก็จะคือ 0.5 μm(ระยะห่างระหว่างก่อนได้รับแรงดัน) ลบด้วยระยะขจัดของไดอะแฟรม ก็จะได้ค่า d ออกมา ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าได้แสดงตามตารางที่ 4.1 โดยเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าพื้นที่หน้าตัดจะส่งผลค่า C มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากแต่ไมโครโฟนที่ต้องการนั้นจะตองมีขนาดเล็กดังนั้นจึงต้องหาค่าพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดพอเหมาะที่สามารถเริ่มทำงานได้ที่ความดันค่าต่ำๆ เมื่อมาพิจารณาถึงค่าความหนานั้นจะส่งผลกระทบน้อยมากแต่ค่าความหนานั้นจะมีผลต่อความคงทนของตัวไมโครโฟนเนื่องจากถ้ามีขนาดไดอะแฟรมที่บางมากก็จะทำให้ไดอะแฟรมเกิดการแตกหักได้ฉะนั้นจะต้องหาความหนาที่เหมาะสม โดยจากกราฟระยะขจัด และ ความดัน ยังสามารถใช้หาค่าความไวจาก

$$V = \frac{\Delta Q}{\Delta C} \tag{4.2}$$

โดยที่ V คือค่าศักย์ไฟฟ้า (V)

$\Delta$Q คือผลต่างของประจุ (C)

$\Delta$C คือผลต่างความจุไฟฟ้า (F)

จากสมการที่ (4.2) ค่าของ Q จะเป็นค่าคงที่เนื่องจากเป็นการแพร่สารเจือคงที่ดังนั้นค่าขอ V จะแปรผกผันกับค่า C และจากสมการ

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta P} \tag{4.3}$$

โดยที่ S คือค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน (V/Pascal)

$\Delta$V คือผลต่างของศักย์ไฟฟ้า (V)

$\Delta$P คือผลต่างของแรงดัน (Pascal)

จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 โดยที่ค่า Q คงที่จะได้ว่า $S = \dfrac{Q}{\Delta C \Delta P}$ แต่จากสมการที่ 4.1 จะได้ว่า

$$S = \frac{Q \Delta d}{\in_0 \in_r A \Delta P} \tag{4.4}$$

โดยค่าความไว ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 1 ซึ่งจากการพิจารณาจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อมีพื้นที่หน้าตัดมาก ค่าความไวจะยิ่งมีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าความหนามากขึ้นก็จะทำให้ค่าความไว มีค่าลดลงโดยจะสอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 μm$^2$ จะมีค่าความไวดีที่สุด ส่วนพื้นที่ 100x100 μm$^2$ จะมีค่าความไวต่ำที่สุด ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือที่ 400x400 μm$^2$

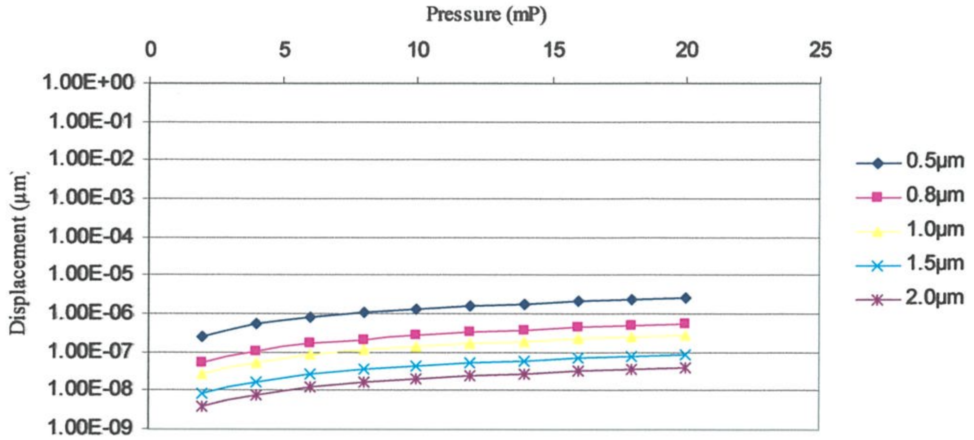
เมื่อพิจาณาถึงเรื่องความหนาจะเห็นว่าที่ความหนา 0.5 μm จะมีค่า sensitivity สูงที่สุด ในขณะที่ความหนา 2.0 μm จะมีค่า sensitivity ต่ำที่สุด แต่ในกะบวนการสร้างจริงถ้าความหนาของไดอะแฟรมยิ่งน้อยจะยิ่งสร้างได้ยากและความทนทานของอุปกรณ์จะต่ำซึ่งเมื่อพิจารณาตามนี้จึงควรเลือกความหนา 0.8 μm ในการนำไปสร้างจริงเนื่องจากค่าความไว ของความหนา 0.8 μm อยู่ในเกณฑ์ทีเหมาะสมและความหนา 0.8 μm ง่ายต่อกระบวนการสร้าง ซึ่งเงื่อนไขความหนา 0.8 μm และพื้นที่หน้าตัด 400*400 μm$^2$ จะถูกนำไปใช้พิจารณาต่อไป

**ตารางที่ 4.1** ตารางแสดงค่าควมจุไฟฟ้าและความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่พื้นที่หน้าตัดและความหนาค่าต่างๆ

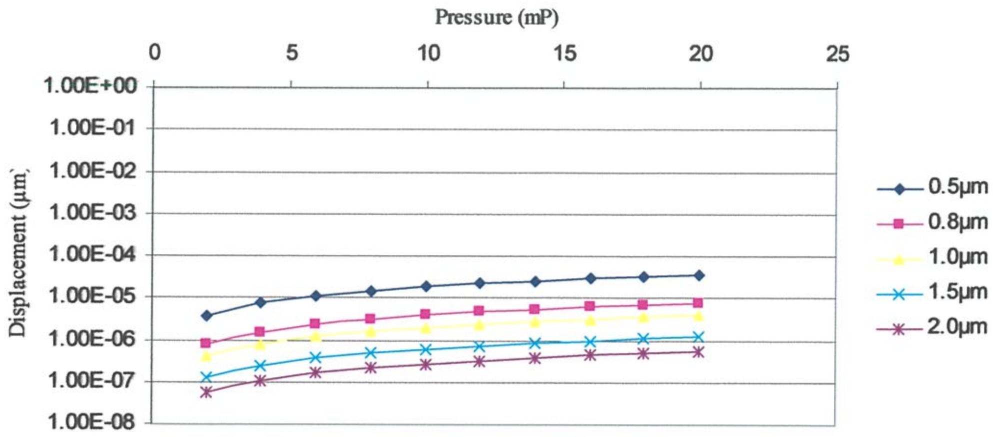
| พื้นที่หน้าตัด (μm$^2$) | ความหนา (μm) | ช่วงของค่าแนวโน้มของความจุไฟฟ้า (F) | ค่าความไวในการทำงาน(V/Pas) |
|---|---|---|---|
| 100x100 | 0.5 | 1.562471227E-13 - 1.562476978E-13 | 2.093921E-09 |
| | 0.8 | 1.562470716E-13 - 1.562471865E-13 | 4.182399E-10 |
| | 1.0 | 1.562470653E-13 - 1.562471236E-13 | 2.123713E-10 |
| | 1.5 | 1.562470609E-13 - 1.562470791E-13 | 6.650624E-11 |
| | 2.0 | 1.562470598E-13 - 1.562470682E-13 | 3.072382E-11 |
| 200x200 | 0.5 | 6.249918037E-13 - 6.250239219E-13 | 7.308490E-09 |
| | 0.8 | 6.249889614E-13- 6.249954960E-13 | 1.487038E-09 |
| | 1.0 | 6.249919301E-13 - 6.249886048E-13 | 7.567150E-10 |
| | 1.5 | 6.249883488E-13 - 6.249893702E-13 | 2.324403E-10 |
| | 2.0 | 6.249882866E-13 - 6.249887487E-13 | 1.051467E-10 |
| 300x300 | 0.5 | 1.406261482E-12 - 1.406603181E-12 | 1.535514E-08 |
| | 0.8 | 1.406231424E-12 - 1.406302483E-12 | 3.193949E-09 |
| | 1.0 | 1.406227553E-12 - 1.406263764E-12 | 1.627681E-09 |
| | 1.5 | 1.406224754E-12 - 1.406235778E-12 | 4.955265E-10 |
| | 2.0 | 1.406224076E-12 - 1.406229000E-12 | 2.213014E-10 |
| 400x400 | 0.5 | 2.500157085E-12 - 2.501996312E-12 | 2.613537E-08 |
| | 0.8 | 2.499996210E-12 - 2.500385702E-12 | 5.538586E-09 |
| | 1.0 | 2.499975012E-12 - 2.500173665E-12 | 2.825126E-09 |
| | 1.5 | 2.499959624E-12 - 2.500019775E-12 | 8.554868E-10 |
| | 2.0 | 2.499955899E-12 - 2.499982524E-12 | 3.786678E-10 |

**4.4 ผลของชนิดสารที่ใช้ทำไดอะแฟรมที่มีผลต่อค่าความไว**

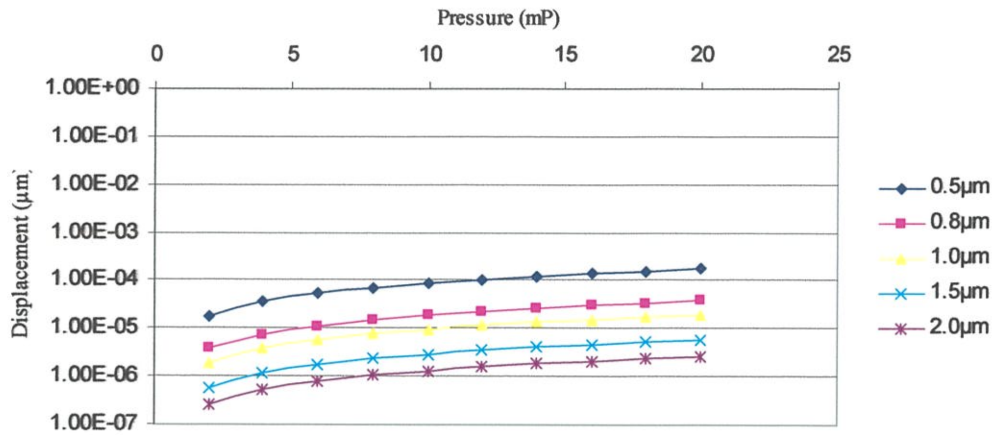
หลังจากที่ได้ทำการศึกษาผลของความหนาและพื้นที่หน้าตัดทีมีผลต่อค่าความไวแล้ว ต่อไปจะทำการศึกษาถึงผลของชนิดสารที่ใช้ทำไดอะแฟรมที่มีผลต่อค่าความไว ซึ่งในปัจจุบันซิลิคอนไมโครโฟนนิยมสร้างจากซิลิคอน ดังนั้นจึงเลือกซิลิคอนมาทำการเปรียบเทียบค่าความไวกับโพลีซิลิคอน โดยจะใช้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมที่ 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ และความหนาที่ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm โดยศึกษาที่ความดัน 2-20 mPa ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดและแรงดัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.14-4.17



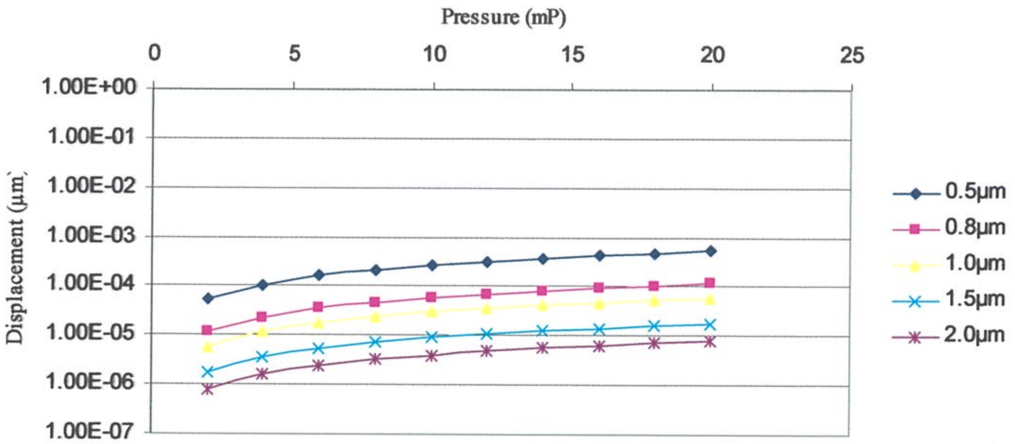

**รูปที่ 4.14** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm โดยใช้ซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม




**รูปที่ 4.15** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 200x200 $\mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm โดยใช้ซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม




**รูปที่ 4.16** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 $\mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm โดยใช้ซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม




**รูปที่ 4.17** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm โดยใช้ซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นระยะขจัดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของความหนาถ้าความหนามีค่าเพิ่มขึ้นระยะขจัดก็จะลดลง ซึ่งความสัมพันธ์จะเหมือนับโพลีซิลิคอนแต่ซิลิคอนจะมีค่าระยะขจัดสูงกว่าโพลีซิลิคอนเมื่อเปรียบเทียบกันที่พื้นที่หน้าตัดและความหนาค่าเดียวกัน แสดงว่าซิลิคอนมีความยืดหยุ่นที่ดีกว่าโพลีซิลิคอนซึ่งค่าความจุไฟฟ้าและความไวของซิลิคอนแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ตารางแสดงค่าควมจุไฟฟ้าและความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้ซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่พื้นที่หน้าตัดและความหนาค่าต่างๆ

| พื้นที่หน้าตัด ($\mu m^2$) | ความหนา ($\mu m$) | ช่วงของค่าแนวโน้มของความจุไฟฟ้า (F) | ค่าความไว (V/Pascal) |
|---|---|---|---|
| 100x100 | 0.5 | 1.562471322E-13 - 1.562477925E-13 | 2.404043E-09 |
| | 0.8 | 1.562470740E-13 - 1.562472108E-13 | 4.979112E-10 |
| | 1.0 | 1.562470666E-13 - 1.562471362E-13 | 2.536704E-10 |
| | 1.5 | 1.562470612E-13 - 1.562470830E-13 | 7.937927E-11 |
| | 2.0 | 1.562470599E-13 - 1.562470700E-13 | 3.651757E-11 |
| 200x200 | 0.5 | 6.249923444E-13 - 6.250293297E-13 | 8.415920E-09 |
| | 0.8 | 6.249891049E-13 - 6.249969312E-13 | 1.780964E-09 |
| | 1.0 | 6.249886788E-13 - 6.249926704E-13 | 9.083416E-10 |
| | 1.5 | 6.249883715E-13 - 6.249895972E-13 | 2.789203E-10 |
| | 2.0 | 6.249882967E-13 - 6.249888495E-13 | 1.257934E-10 |
| 300x300 | 0.5 | 1.406267413E-12 - 1.406662517E-12 | 1.775419E-08 |
| | 0.8 | 1.406233009E-12 - 1.406318327E-12 | 3.834841E-09 |
| | 1.0 | 1.406228368E-12 - 1.406271920E-12 | 1.957601E-09 |
| | 1.5 | 1.406225002E-12 - 1.406238258E-12 | 5.958333E-10 |
| | 2.0 | 1.406224186E-12 - 1.406230092E-12 | 2.654795E-10 |
| 400x400 | 0.5 | 2.500189918E-12 - 2.502325109E-12 | 3.033664E-08 |
| | 0.8 | 2.500004965E-12 - 2.500473274E-12 | 6.659129E-09 |
| | 1.0 | 2.499979513E-12 - 2.500218684E-12 | 3.401279E-09 |
| | 1.5 | 2.499960986E-12 - 2.500033393E-12 | 1.029784E-09 |
| | 2.0 | 2.499956495E-12 - 2.499988484E-12 | 4.549579E-10 |

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีพื้นที่หน้าตัดมาก ค่าความไวจะยิ่งมีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าความหนามากขึ้นก็จะทำให้ค่าความไว มีค่าลดลงโดยจะสอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งจากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ จะมีค่าความไวดีที่สุด ส่วนพื้นที่ 100x100 $\mu m^2$ จะมีค่าความไวต่ำที่สุด

เมื่อพิจาณาถึงเรื่องความหนาจะเห็นว่าที่ความหนา 0.5 $\mu m$ จะมีค่า sensitivity สูงที่สุด ในขณะที่ความหนา 2.0 $\mu m$ จะมีค่า sensitivity ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะมีแนวโน้มเดียวกับโพลีซิลิคอนแต่ค่าความจุไฟฟ้าและความไวของซิลิคอนจะมีค่าสูงกว่าโพลีซิลิคอนซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.3

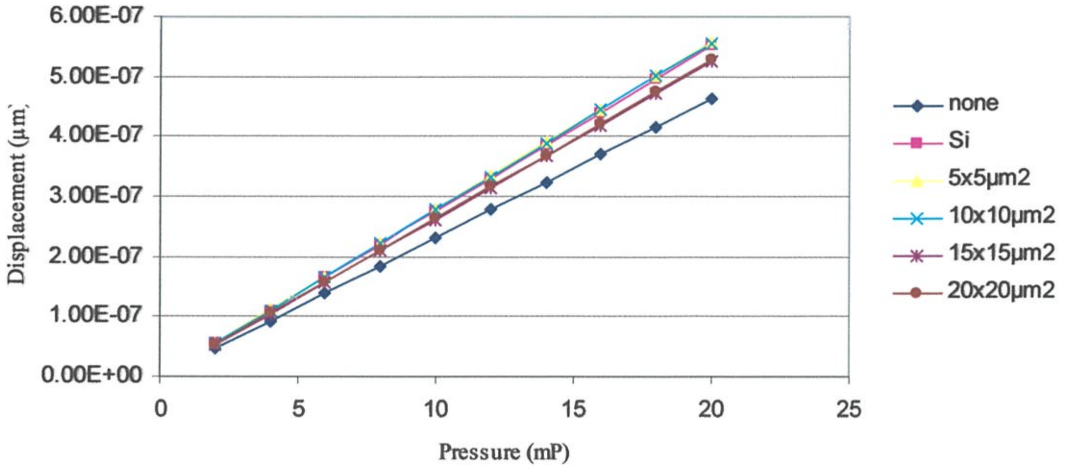
**ตารางที่ 4.3** ตารางเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าระหว่างซิลิคอนและโพลีซิลิคอนที่ความหนา 0.8 μm และพื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ

| พื้นที่หน้าตัด ($\mu m^2$) | ค่าความจุไฟฟ้า (F) | | ค่าความไว (V/Pas) | |
|---|---|---|---|---|
| | ซิลิคอน | โพลีซิลิคอน | ซิลิคอน | โพลีซิลิคอน |
| 100x100 | 1.562471322E-13 ถึง 1.562477925E-13 | 1.562470716E-13 ถึง 1.562471865E-13 | 4.979112E-10 | 4.182399E-10 |
| 200x200 | 6.249891049E-13 ถึง 6.249969312E-13 | 6.249889614E-13 ถึง 6.249954960E-13 | 1.780964E-09 | 1.487038E-09 |
| 300x300 | 1.406233009E-12 ถึง 1.406318327E-12 | 1.406231424E-12 ถึง 1.406302483E-12 | 3.834841E-09 | 3.193949E-09 |
| 400x400 | 2.500004965E-12 ถึง 2.500473274E-12 | 2.499996210E-12 ถึง 2.500385702E-12 | 6.659129E-09 | 5.538586E-09 |

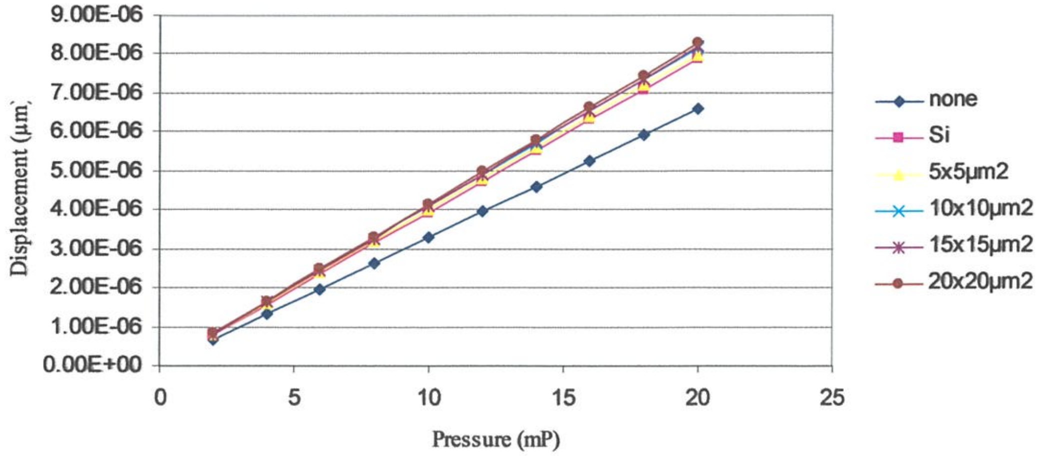
จากตารางที่ 4.3 จะพบว่าค่าความไวของซิลิคอนและโพลีซิลิคอนที่ความหนา 0.8 μm และที่พื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ ค่าความไวของซิลิคอนจะมีค่าสูงกว่าค่าความไวของโพลีซิลิคอน เช่นเดียวกับค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งความจุไฟฟ้าของซิลิคอนจะมีค่าสูงกว่าโพลีซิลิคอนที่พื้นที่หน้าตัดค่าเดียวกัน ซึ่งจากตารางที่ 4.3 นี้จะเห็นได้ว่าโพลีซิลิคอนยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้อยกว่าซิลิคอน ดังนั้นจึงต้องหาแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างเพื่อทำให้โพลีซิลิคอนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้มีค่าสูงกว่า หรือ ทัดเทียมกับซิลิคอน ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

### 4.5 ผลของอะคูสติคโฮลที่มีผลต่อค่าความไว

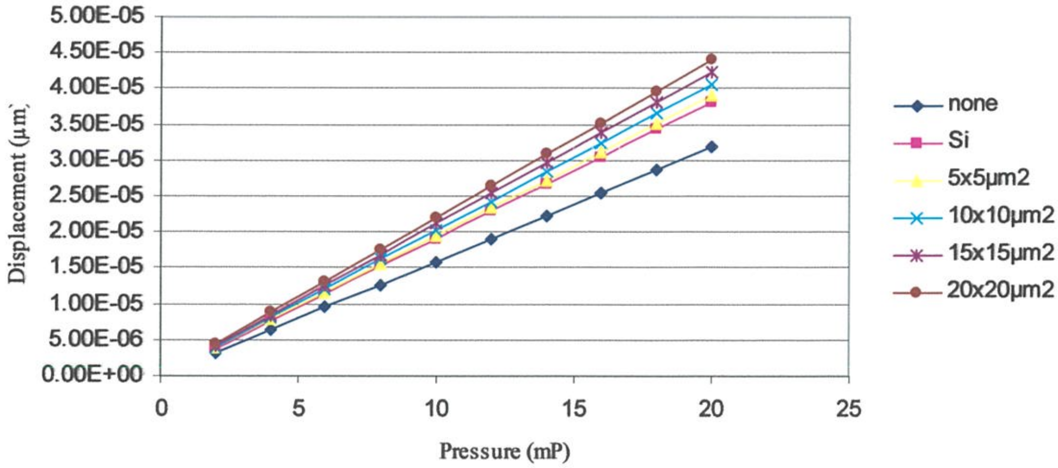
จากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนจะดีกว่าโพลีซิลิคอน ดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะพัฒนาโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไดอะแฟรมทำจากซิลิคอนให้มีคุณสมบัติไฟฟ้าที่ดีกว่าหรือทัดเทียมกับโพลีซิลิคอน โดยในการทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของอคูสติคโฮลที่มีผลต่อค่าความไว โดยได้ทำการออกแบบอคูสติคโฮลเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ โดยใช้ความหนา 0.8 μm เนื่องจากเป็นความหนาที่มีความเหมาะสมที่สุดในการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุเพื่อใช้เป็นไมโครโฟน ซึ่งจะได้ทำการศึกษาที่ค่าพื้นที่หน้าตัดต่างๆ เปรียบเทียบกับทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอคูสติคโฮลและไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอนและซิลิคอน โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.18-4.21



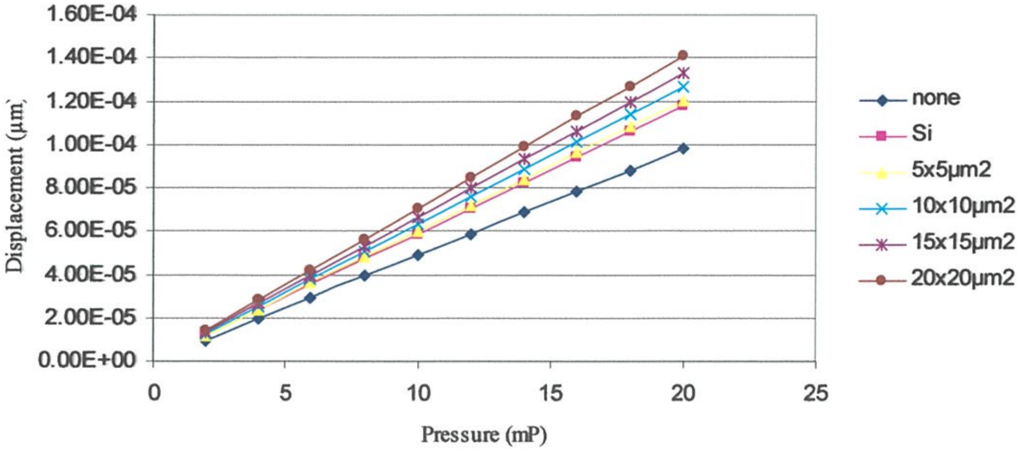

**รูปที่ 4.18** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ และความหนา 0.8 μm โดยมีอคูสติคโฮลขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$




**รูปที่ 4.19** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 200x200 $\mu m^2$ และความหนา 0.8 μm โดยมีคูสติคโฮลขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$




**รูปที่ 4.20** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 $\mu m^2$ และความหนา 0.8 μm โดยมีคูสติคโฮลขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$




**รูปที่ 4.21** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ และความหนา 0.8 µm โดยมีอูสติคโฮลขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$

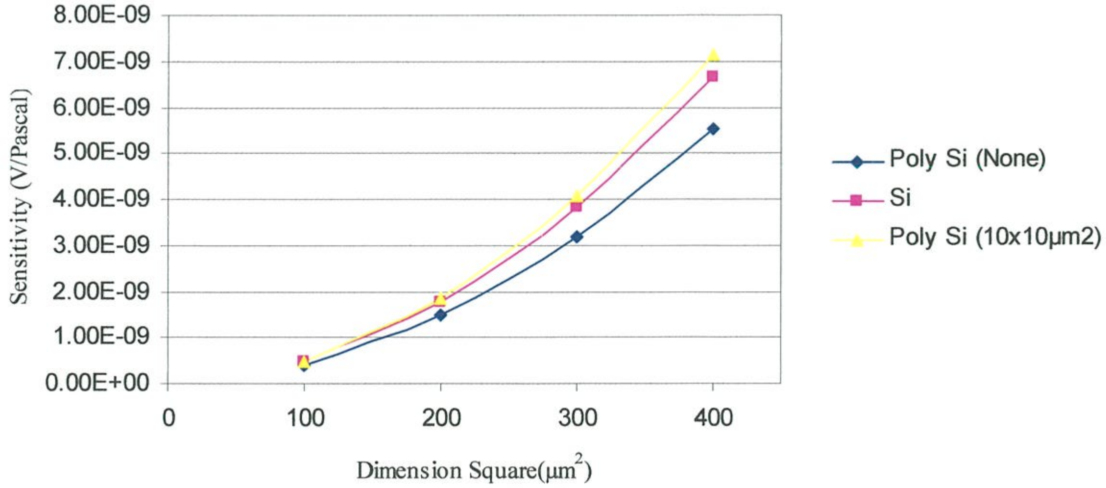
จากผลการทดลองดังในรูปที่ 4.18-4.21 ได้ทำการเปรียบเทียบระยะขจัดกับความดันที่ 2-20 mPa โดยได้ทำการเปรียบเทียบโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอน และทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอนและโพลีซิลิคอน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าระยะขจัดของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอน จะมีค่าสูงกว่าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอนที่ความหนาค่าเดียวกันแต่เมื่อเปรียบเทียบกับทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอน ระยะขจัดจะมีค่าต่ำกว่าซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมา จะเห็นว่าระยะขจัดแปรผันตรงกับความจุไฟฟ้าและความไวแสดงว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น

ในส่วนของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอนที่อูสติคโฮลขนาดต่างๆจะพบว่า เมื่ออูสติคโฮลมีขนาดมากขึ้นก็จะทำให้ระยะขจัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดค่าเดียวกัน และจะพบอีกว่าถ้าไดอะแฟรมมีพื้นที่มากขึ้นขนาดของอูสติคโฮลจะมีผลต่อการยุบตัวได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบจากความแตกต่างของระยะขจัดที่อูสติคโฮลขนาดต่างๆในขนาดพื้นที่ค่าเดียวกัน ยกเว้นที่ 100x100 $\mu m^2$ เนื่องจากไดอะแฟรมมีขนาดเล็กเกินไปถ้าอูสติคโฮลมีขนาดใหญ่เกินไปก็จะทำให้ความดันลอดผ่านอูสติคโฮลทำให้ไดอะแฟรมมีการยุบตัวได้ต่ำ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาขนาดของอูสติคโฮลให้เหมาะสมกับขนาดของไดอะแฟรม

**ตารางที่ 4.4** ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้าและความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่พื้นที่ความหนา 0.8 μm ที่พื้นที่หน้าตัดและขนาดอคูสติคโฮลค่าต่างๆ

| พื้นที่หน้าตัด ($\mu m^2$) | ขนาดอคูสติคโฮล ($\mu m^2$) | ความจุไฟฟ้า (F) | ค่าความไว (V/Pa) |
|---|---|---|---|
| 100x100 | None | 1.5624707159E-13 - 1.5624718646E-13 | 4.182399E-10 |
| | Si | 1.5624707402E-13 - 1.5624721077E-13 | 4.979112E-10 |
| | 5x5 | 1.5624707422E-13 - 1.5624721283E-13 | 5.046555E-10 |
| | 10x10 | 1.5624707416E-13 - 1.5624721217E-13 | 5.025183E-10 |
| | 15x15 | 1.5624707331E-13 - 1.5624720367E-13 | 4.746366E-10 |
| | 20x20 | 1.5624707336E-13 - 1.5624720422E-13 | 4.764517E-10 |
| 200x200 | None | 1.5624724034E-13 - 1.5624887401E-13 | 1.487038E-09 |
| | Si | 1.5624727622E-13 - 1.5624923280E-13 | 1.780964E-09 |
| | 5x5 | 1.5624727928E-13 - 1.5624926344E-13 | 1.806063E-09 |
| | 10x10 | 1.5624728383E-13 - 1.5624930889E-13 | 1.843294E-09 |
| | 15x15 | 1.5624728455E-13 - 1.5624931609E-13 | 1.849192E-09 |
| | 20x20 | 1.5624728713E-13 - 1.5624934195E-13 | 1.870381E-09 |
| 300x300 | None | 1.5624793604E-13 - 1.5625583143E-13 | 3.193949E-09 |
| | Si | 1.5624811206E-13 - 1.5625759184E-13 | 3.834841E-09 |
| | 5x5 | 1.5624813486E-13 - 1.5625781987E-13 | 3.917857E-09 |
| | 10x10 | 1.5624817843E-13 - 1.5625825563E-13 | 4.076494E-09 |
| | 15x15 | 1.5624822610E-13 - 1.5625873241E-13 | 4.250066E-09 |
| | 20x20 | 1.5624827406E-13 - 1.5625921209E-13 | 4.424690E-09 |
| 400x400 | None | 1.5624976314E-13 - 1.5627410635E-13 | 5.538586E-09 |
| | Si | 1.5625031028E-13 - 1.5627957963E-13 | 6.659129E-09 |
| | 5x5 | 1.5625038135E-13 - 1.5628029065E-13 | 6.804691E-09 |
| | 10x10 | 1.5625054672E-13 - 1.5628194484E-13 | 7.143331E-09 |
| | 15x15 | 1.5625072901E-13 - 1.5628376842E-13 | 7.516642E-09 |
| | 20x20 | 1.5625094917E-13 - 1.5628597105E-13 | 7.967540E-09 |

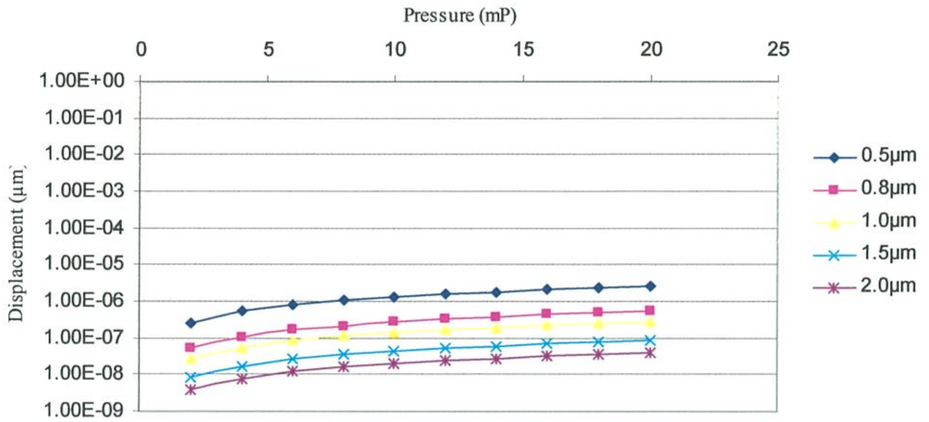
ซึ่งจากระยะขจัดที่ได้ทำการทดลองสามารถนำมาคำนวนหาค่าความจุไฟฟ้าและความไวได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจะพบว่าค่าความไวและค่าความจุไฟฟ้าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอนจะมีค่าสูงกว่าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอนและโพลีซิลิคอน โดยค่าความไวจะมีค่าสูงสุดที่อูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ ในทางตรงกันข้ามค่าความไวจะต่ำที่สุดที่ขนาดอูสติคโฮล 5x5 $\mu m^2$ แต่เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขพื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ ค่าความไวจะสูงที่สุดที่ขนาดอูสติคโฮล 5x5 $\mu m^2$ และต่ำที่สุดที่อูสติคโฮลขนาด 15x15 $\mu m^2$ ดังนั้นในการเลือกใช้ขนาดของอูสติคโฮลจะต้องพิจารณาถึงขนาดของไดอะแฟรมด้วย โดยจากการทดลองนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมกับความไวเปรียบเทียบกันระหว่าง ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอูสติคโฮลขนาด 10x10 $\mu m^2$ ที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอน, ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอน และทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอน ได้ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจะพบว่า ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอูสติคโฮลขนาด 10x10 $\mu m^2$ ที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอน จะมีค่าความไวสูงกว่า ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอนและโพลีซิลิคอนที่ทุกๆขนาดพื้นที่หน้าตัดดังนั้นอูสติคโฮลขนาด 10x10 $\mu m^2$ จึงมีความเหมาะสมที่สุดในกระบวนสร้างที่ทุกขนาดของไดอะแฟรม



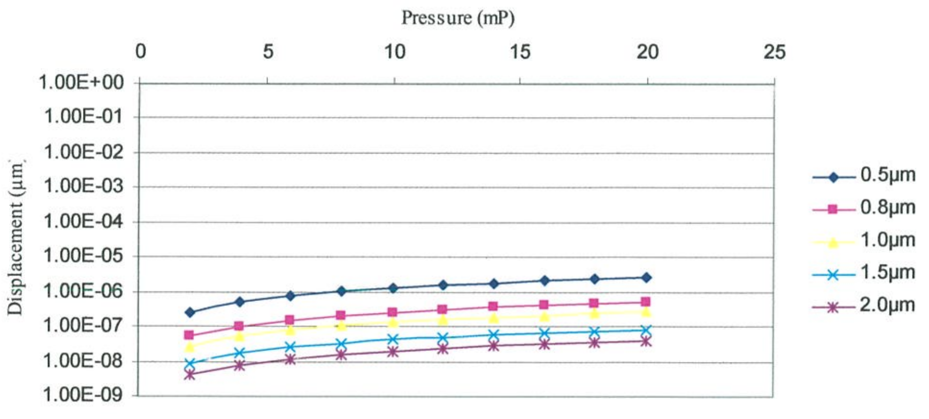

**รูปที่ 4.22** ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมกับความไวเปรียบเทียบกันระหว่าง ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอูสติคโฮลขนาด 10x10 $\mu m^2$ ที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอน, ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอนและโพลีซิลิคอน

**4.6 ผลของอคูติคโฮลที่มีต่อระยะขจัดของไดอะแฟรมที่ความหนาค่าต่างๆ**

จากการที่ได้ทำการศึกษาผลของอคูสติคโฮลที่มีต่อพื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ ในการทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของอคูสติคโฮลที่มีผลต่อระยะขจัดที่ความหนาค่าต่างโดยจะทำการเปรียบเทียบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ กับ ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอคูสติคโฮลโดยจะทำการเปรียบเทียบที่พื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมขนาด 100x100 $\mu m^2$ และ 400x400 $\mu m^2$ ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.23-4.24




(ก) ไม่มีอคูสติคโฮล

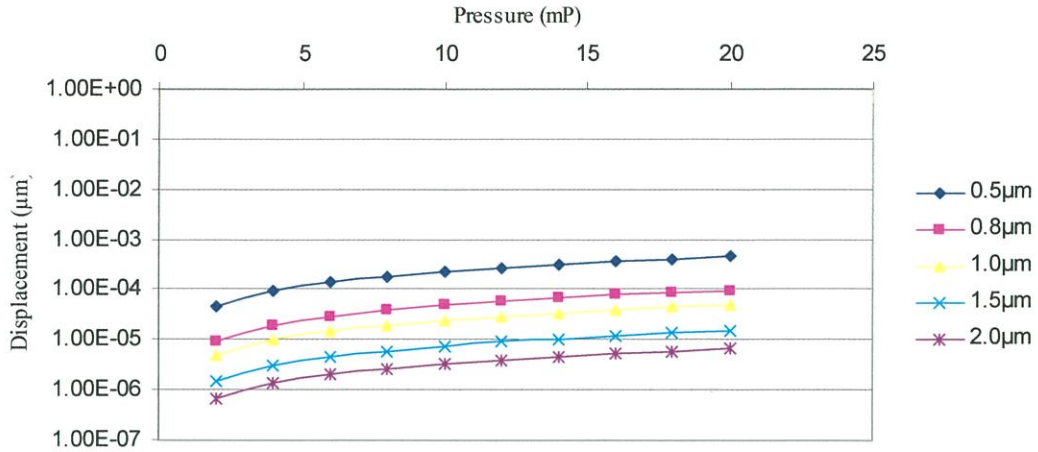



(ข) อคูสติคโฮลขนาด 5x5 $\mu m^2$

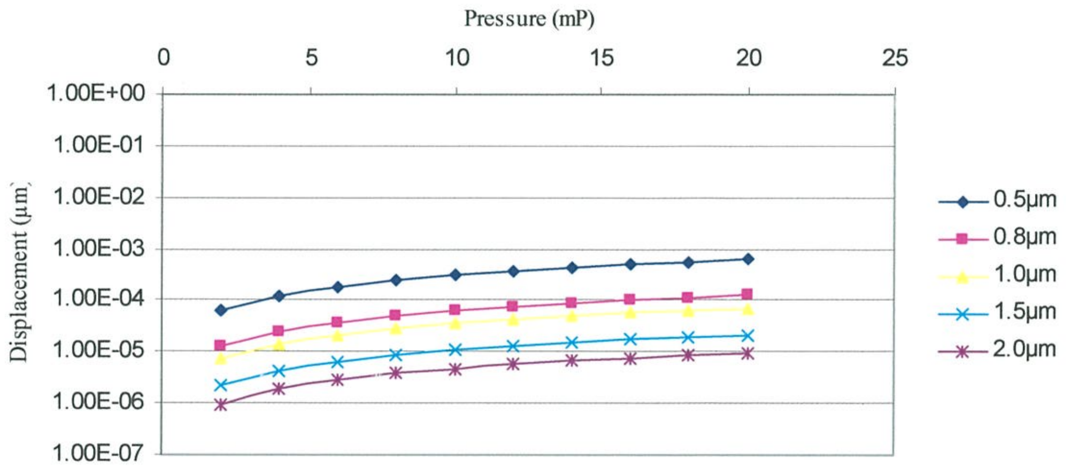
**รูปที่ 4.23** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 $\mu m$ โดยมีอคูสติคโฮลขนาด 5x5 $\mu m^2$ กับที่ไม่มีอคูสติคโฮล

(ก) ไม่มีอคูสติคโฮล

(ข) อคูสติคโฮลขนาด 5x5 $\mu m^2$




(ก) ไม่มีอคูสติคโฮล




(ข) อคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$

**รูปที่ 4.24** กราฟแสดงค่า Displacement เทียบกับความดันค่าต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ และความหนา 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm โดยมีอคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ กับที่ไม่มีอคูสติคโฮล

(ก) ไม่มีอคูสติคโฮล

(ข) อคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$

จากผลการทดลองจะพบว่าค่าระยะขจัดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนามีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเหมือนกันทั้งทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ และ ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอคูสติคโฮล ส่วนเมื่อมาพิจารณาถึงระยะขจัดของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาด 20x20

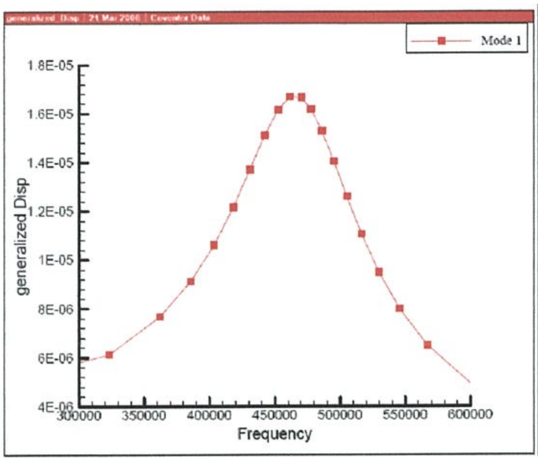
$\mu m^2$ กับ ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอูสติคโฮล ที่ความหนาค่าเดียวกันจะเห็นได้ว่าระยะขจัดของโครงสร้างที่มีอูสติคโฮลจะมีค่าสูงกว่าโครงสร้างที่ไม่มีอูสติคโฮลที่ความหนาและพื้นที่หนาตัดค่าเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ในการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอูสติคโฮล จะสามารถสร้างได้ที่ความหนามากกว่า ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีไม่อูสติคโฮลที่ความไวค่าเดียวกัน ซึ่งความหนานั้นจะมีผลต่อค่าความทนทานของทรานสดิวเซอร์ แสดงว่าถ้าต้องการเพิ่มความหนาของไดอะแฟรมเพื่อเพิ่มความทนทาน โดยที่ต้องการความไวเท่าเดิมก็สามารถที่จะใช้อูสติคโฮลเป็นตัวเพิ่มค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันโครงสร้างนี้ได้

## 4.7 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ

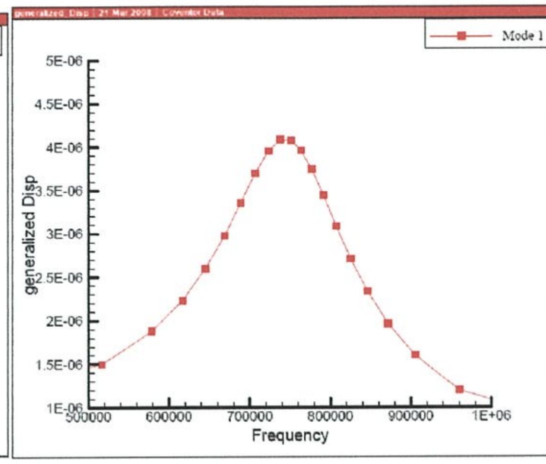
หลังจากที่ได้ศึกษาถึงผลของความไวซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของไมโครโฟนมาแล้ว ในส่วนนี้จะได้ทำการศึกษาถึงผลการตอบสนองทางความถี่ซึ่งไมโครโฟนที่ดีนั้นจะต้องตอบสนองในช่วงความถี่ 20-2000Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่หูมนุษย์ได้ยิน โดยในการทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ โดยจะใช้ความหนา 5 ค่าดังนี้ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 $\mu m$ ในส่วนของพื้นที่หน้าตัดจะทำการศึกษาที่ 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$

### 4.7.1 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่ 100x100 $\mu m^2$

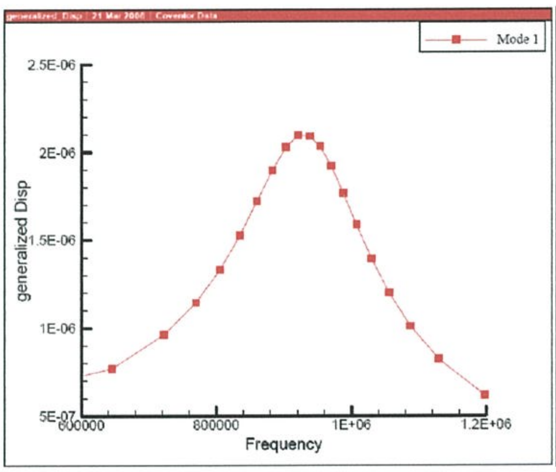
การทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ โดยจะใช้ความหนา 5 ค่าดังนี้ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 $\mu m$ ที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.25



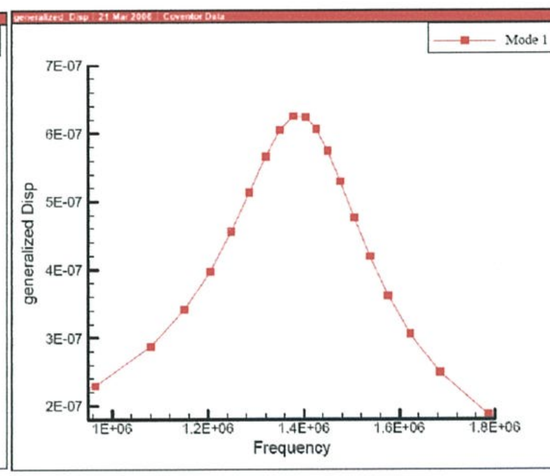

(ก) 0.5 μm



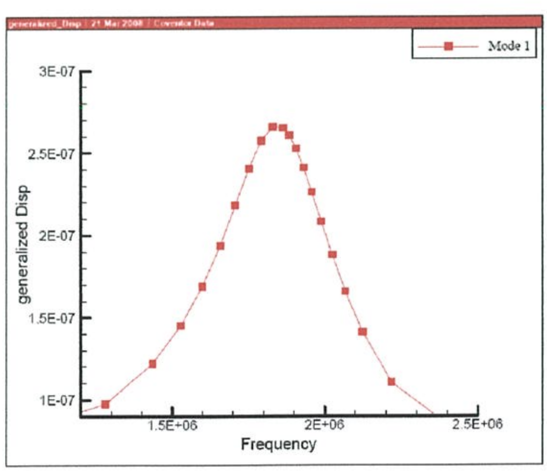

(ข) 0.8 μm




(ค) 1.0 μm




(ง) 1.5 μm



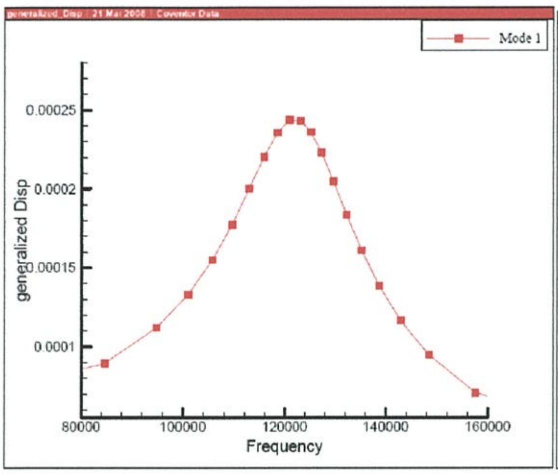

(จ) 2.0 μm

**รูปที่ 4.25** กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม ที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ และความหนาค่าต่างๆ

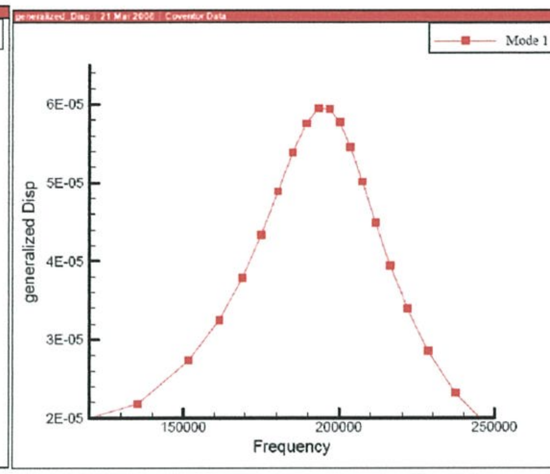
(ก) 0.5 μm (ข) 0.8 μm (ค) 1.0 μm (ง) 1.5 μm (จ) 2.0 μm

### 4.7.2 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่ 200x200 μm$^2$

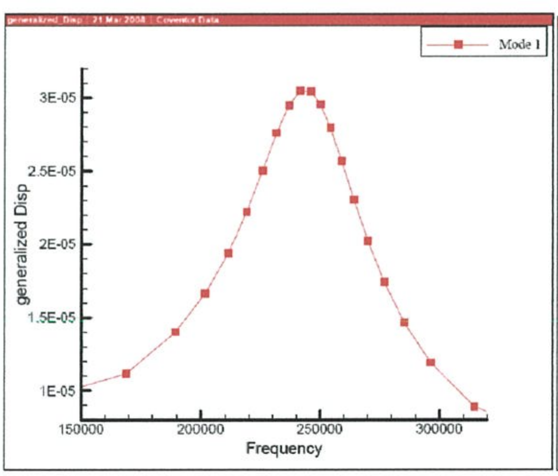
การทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ โดยจะใช้ความหนา 5 ค่าดังนี้ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm ที่พื้นที่หน้าตัด 200x200 μm$^2$ โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.26



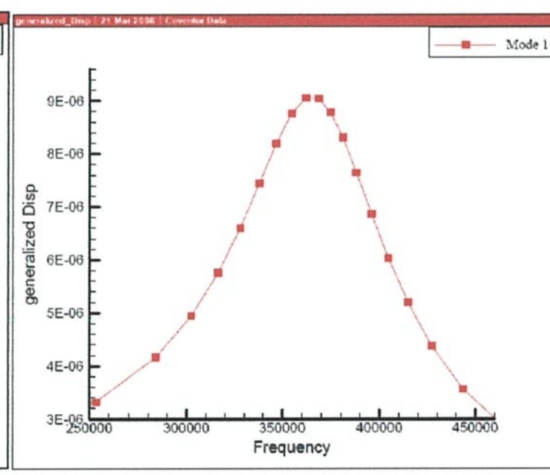

(ก) 0.5 μm




(ข) 0.8 μm



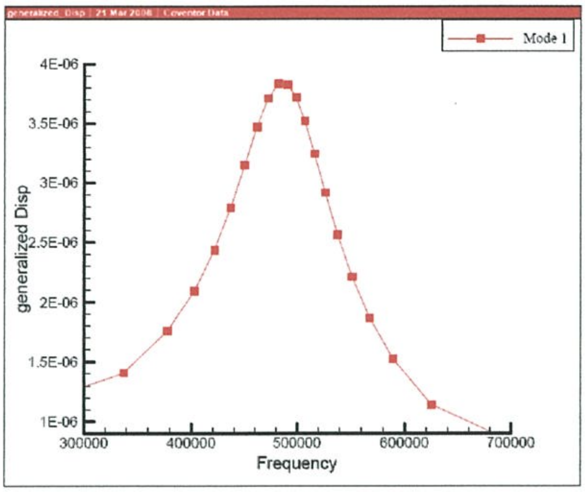

(ค) 1.0 μm




(ง) 1.5 μm

**รูปที่ 4.26** กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม ที่พื้นที่หน้าตัด 200x200 μm$^2$ และความหนาค่าต่างๆ

(ก) 0.5 μm (ข) 0.8 μm (ค) 1.0 μm (ง) 1.5 μm

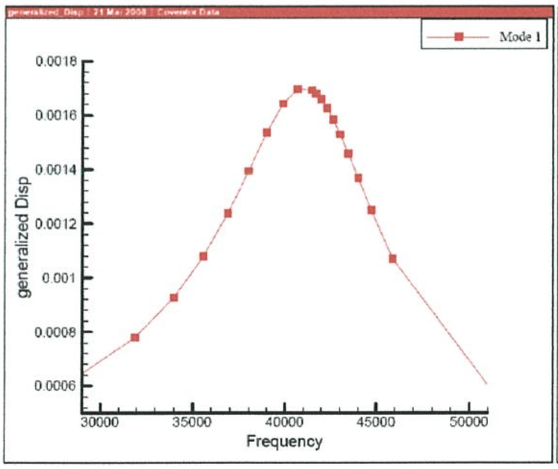



(จ) 2.0 µm

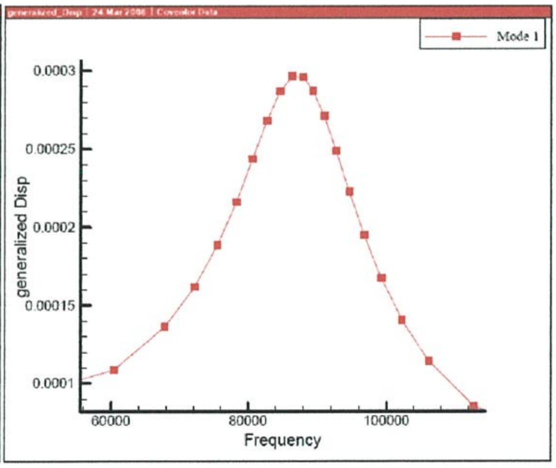
**รูปที่ 4.26(ต่อ)** (จ) 2.0 µm

### 4.7.3 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่ 300x300 $\mu m^2$

การทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ โดยจะใช้ความหนา 5 ค่าดังนี้ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 µm ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 $\mu m^2$ โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.27



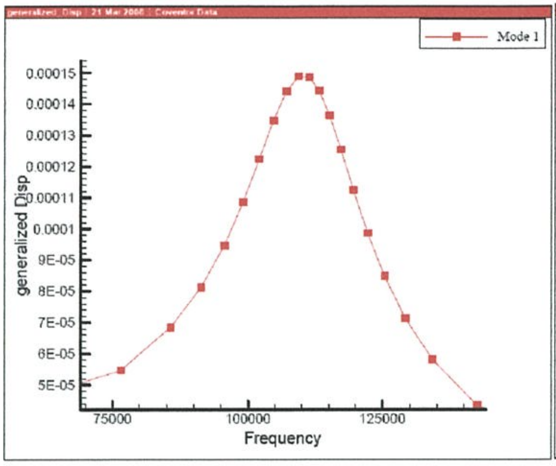

(ก) 0.5 µm



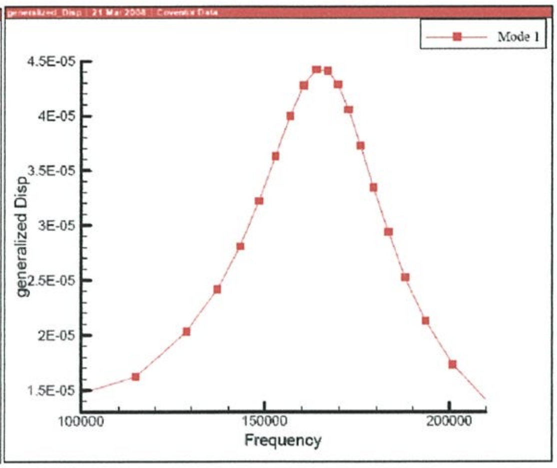

(ข) 0.8 µm

**รูปที่ 4.27** กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 $\mu m^2$ และความหนาค่าต่างๆ

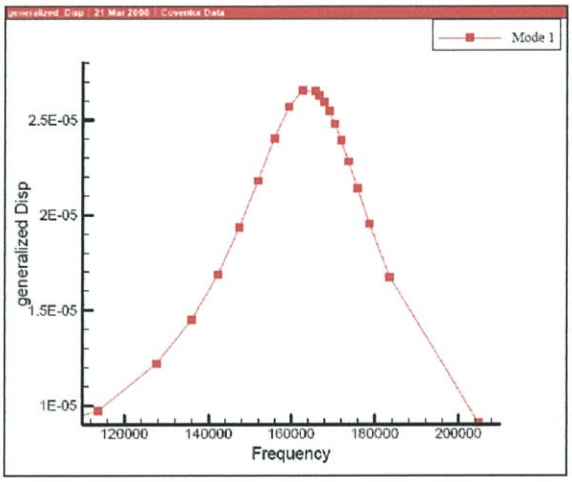
(ก) 0.5 µm (ข) 0.8 µm




(ค) 1.0 μm




(ง) 1.5 μm

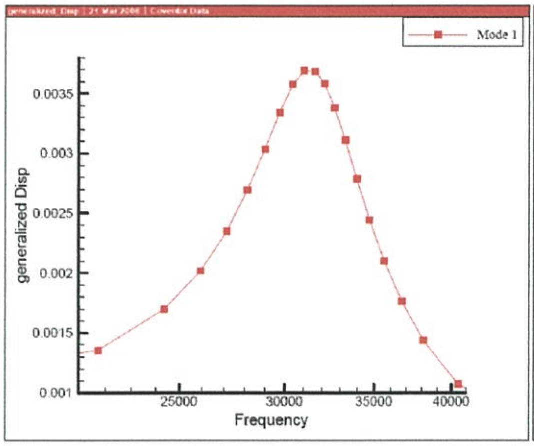



(จ) 2.0 μm

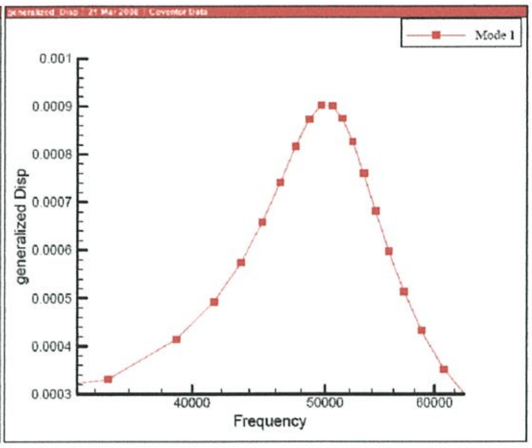
**รูปที่ 4.27(ต่อ)** (ค) 1.0 μm (ง) 1.5 μm (จ) 2.0 μm

**4.7.4 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่ 400x400 μm²**

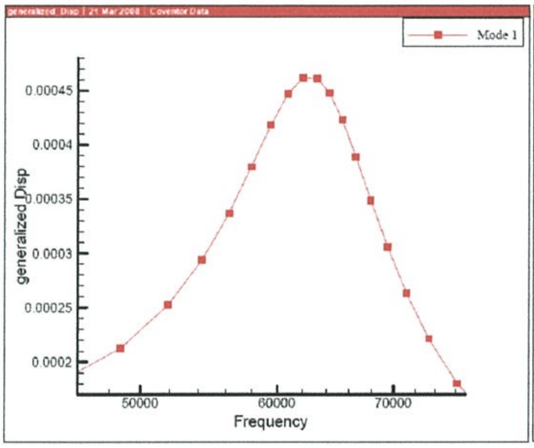
การทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ โดยจะใช้ความหนา 5 ค่าดังนี้ 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 μm² โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.28



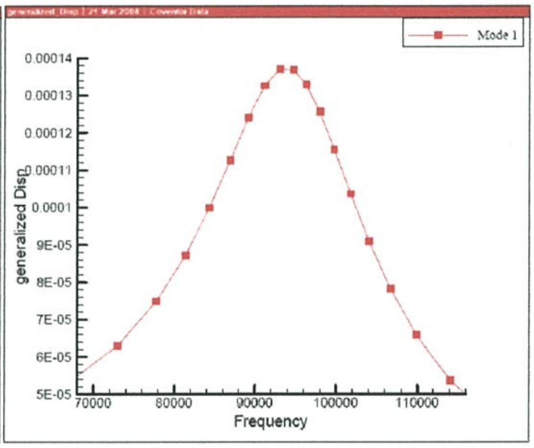

(ก) 0.5 μm



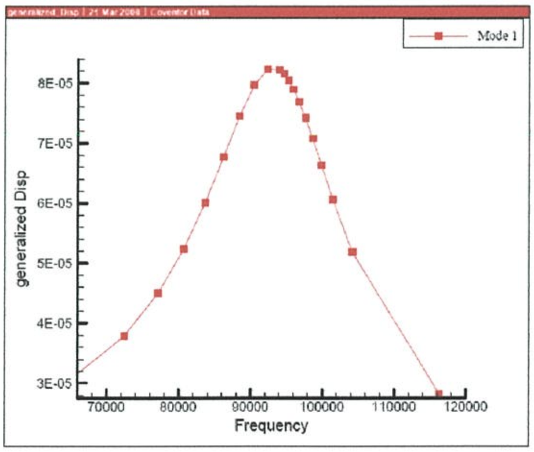

(ข) 0.8 μm




(ค) 1.0 μm




(ง) 1.5 μm




(จ) 2.0 μm

**รูปที่ 4.2**8 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม **ที่พื้นที่หน้าตัด** 400x400 $\mu m^2$ และความหนาค่าต่างๆ

(ก) 0.5 μm (ข) 0.8 μm (ค) 1.0 μm (ง) 1.5 μm (จ) 2.0 μm

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถนำมาสรุปผลการตอบสนองทางความถี่ได้ดังตารางที่ 4.5 โดยจะพิจารณาจากความถี่ที่ให้ผลของแอมปลิจูดสูงสุด

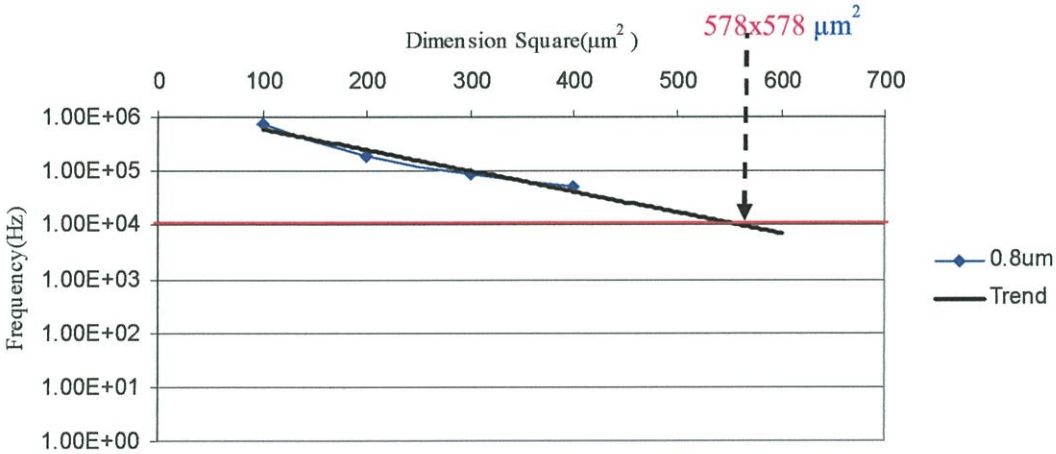
**ตารางที่ 4.5** แสดงผลการตอบสนองกับความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่พื้นที่หน้าตัดและความหนาค่าต่างๆ

| พื้นที่หน้าตัด ($\mu m^2$) | ความหนา (μm) | ความถี่ (Hz) |
|---|---|---|
| 100x100 | 0.5 | 4.62E+05 |
| | 0.8 | 7.38E+05 |
| | 1.0 | 9.22E+05 |
| | 1.5 | 1.38E+06 |
| | 2.0 | 1.83E+06 |
| 200x200 | 0.5 | 1.21E+05 |
| | 0.8 | 1.93E+05 |
| | 1.0 | 2.42E+05 |
| | 1.5 | 3.62E+05 |
| | 2.0 | 4.82E+05 |
| 300x300 | 0.5 | 4.07E+04 |
| | 0.8 | 8.69E+04 |
| | 1.0 | 1.09E+05 |
| | 1.5 | 1.64E+05 |
| | 2.0 | 2.21E+05 |
| 400x400 | 0.5 | 3.10E+04 |
| | 0.8 | 4.97E+04 |
| | 1.0 | 6.21E+04 |
| | 1.5 | 9.31E+04 |
| | 2.0 | 1.20E+05 |

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความถี่ที่ตอบสนองจะมีค่าสูงขึ้นโดยจะมีความถี่ที่ตอบสนองสูงที่สุดที่ความหนา 2.0 μm และต่ำสุดที่ความหนา 0.5 μm ที่พื้นที่หน้าตัดค่าเดียวกัน ซึ่งความถี่เสียงจะอยู่ในช่วง 20-20,000Hz โดยค่ากลางของความถี่เสียงก็คือ 10,000Hz ซึ่งความหนาที่ให้ค่าผลตอบสนองกับค่ากลางของความถี่เสียงได้ดีที่สุดคือที่ความหนา 0.5 μm แต่ความทนทานจะต่ำดังนั้นเมื่อพิจารณาด้วยเหตุผลนี้แล้วความหนา 0.8 μm จะมีความเหมาะสมที่สุดแต่ก็ยังไม่สามารถตอบสนองต่อความถี่เสียงได้

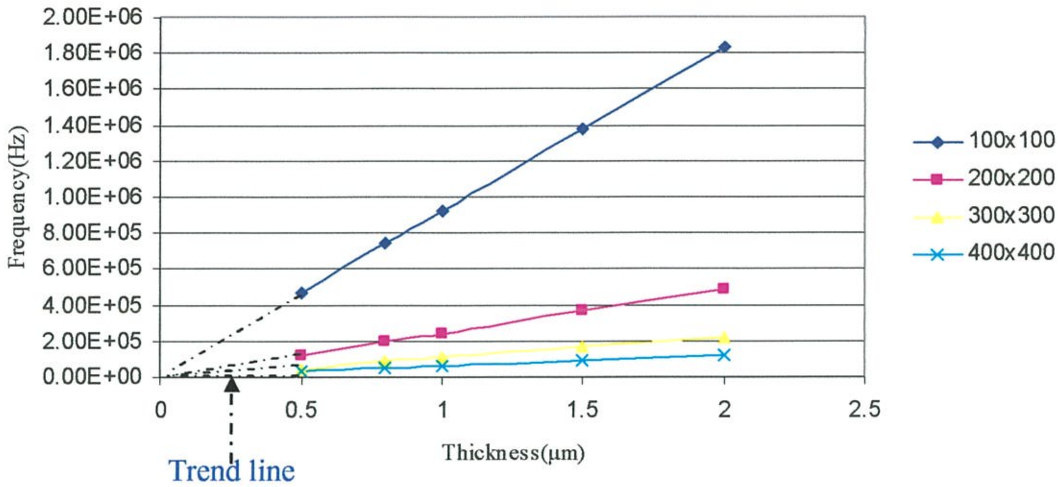
ส่วนเมื่อพิจารณาถึงผลของพื้นที่หน้าตัด จะเห็นได้ว่าจะเห็นได้ว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น ความถี่ที่ตอบสนองจะมีค่าลดลง โดยจะมีความถี่ที่ตอบสนองสูงที่สุดที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ และต่ำสุดที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ ที่ความหนาค่าเดียวกัน ซึ่งความหนาที่ให้ค่าผลตอบสนองกับบความถี่เสียงได้ดีที่สุดคือที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ แต่ที่เงื่อนไขนี้ก็ยังไม่สามมารถตอบสนองต่อความถี่เสียงได้

จากที่ได้พิจารณาเงื่อนไขของความหนาและพื้นที่หน้าตัดที่ไม่สามารถตอบสนองต่อความถี่เสียงได้แล้ว ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าแนวโน้ม เพื่อหาค่าพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมกับความหนา 0.8 μm และหาค่าความหนาที่เหมาะสมกับพื้นที่ค่าต่างๆ ที่เหมาะสมกับการสร้างไมโครโฟนในอนาคต ซึ่งสามารถพิจารณาพื้นที่ที่เหมาะกับความหนาได้จากรูปที่ 4.29 โดยพื้นที่ที่เหมาะสมกับความหนา 0.8 μm คือ 578x578 $\mu m^2$




**รูปที่ 4.29** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับความถี่ที่ความหนา 0.8 μm เพื่อใช้หาค่าความหนาที่เหมาะสม

ส่วนการหาค่าหาค่าความหนาที่เหมาะสมกับพื้นที่ค่าต่างๆ สามารถหาได้จากรูปที่ 4.30 ซึ่งสามารถสรุปค่าความหนาที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 4.6 เพื่อจะได้พารามิเตอร์ความหนาที่เหมาะสมกับพื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ สำหรับเทคโนโลยีในอนาคต




**รูปที่ 4.30** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับความถี่ที่พื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ เพื่อใช้หาค่าความหนาที่เหมาะสมกับความถี่เสียง

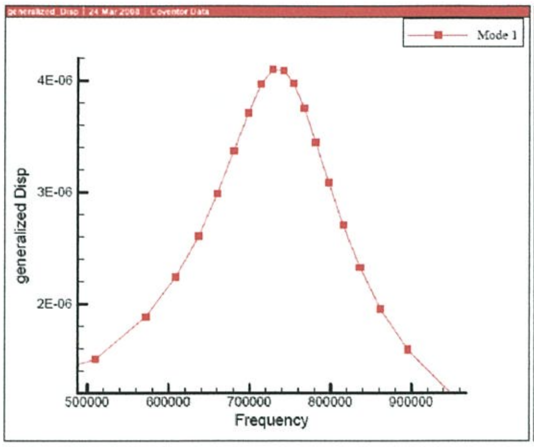
**ตารางที่ 4.6** แสดงความหนาที่เหมาะสมกับการตอบสนองความถี่เสียงที่ความหนาค่าต่างๆ

| พื้นที่หน้าตัด ($\mu m^2$) | ความหนาที่เหมาะสม (μm) |
|---|---|
| 100x100 | 0.0045 |
| 200x200 | 0.042 |
| 300x300 | 0.052 |
| 400x400 | 0.160 |

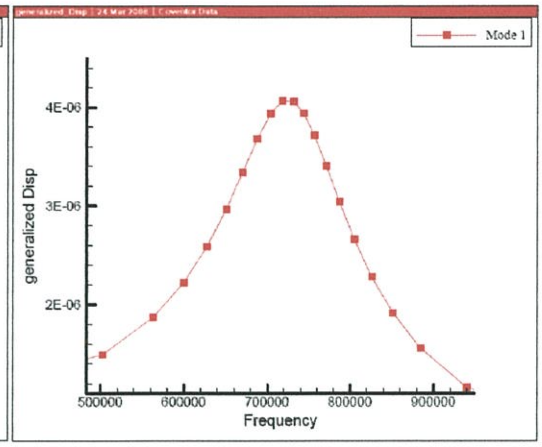
**4.8 ผลของขนาดอคูสติคโฮลที่มีผลต่อการตอบสนองทางความถี่ที่พื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ**

**4.8.1 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่ 100x100 $\mu m^2$**

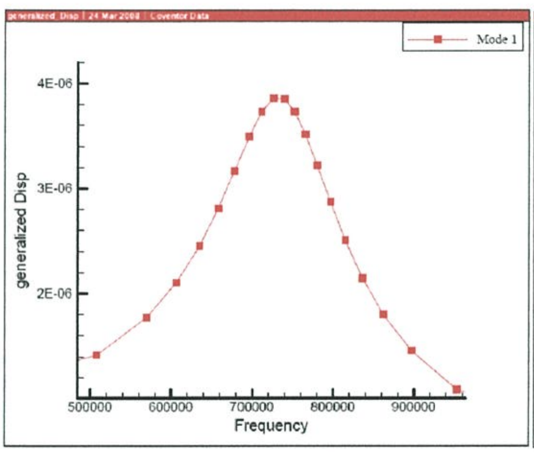
การทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของขนาดอคูสติคโฮลที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ ซึ่งจะกำหนดขนาดของอคูสติคโฮลดังนี้ คือ 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ โดยจะใช้ความหนาที่ 0.8 μm ที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.31



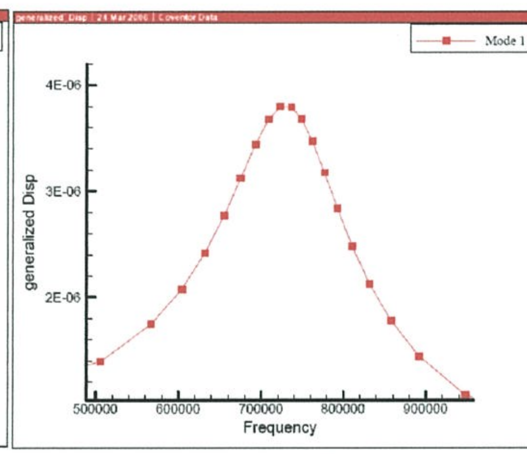

(ก) 5x5 $\mu m^2$




(ข) 10x10 $\mu m^2$




(ค) 15x15 $\mu m^2$

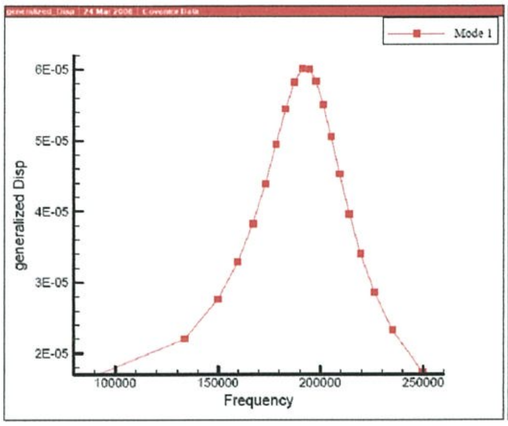



(ง) 20x20 $\mu m^2$

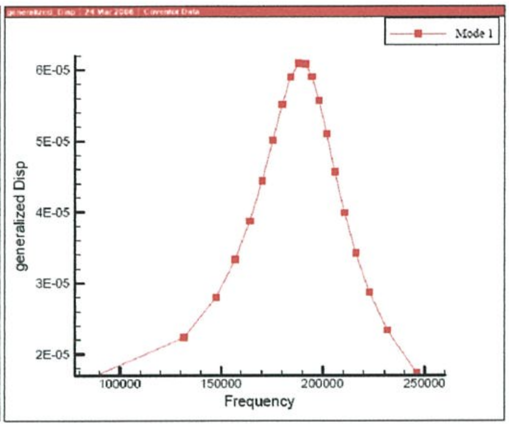
**รูปที่ 4.31** กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม ที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ และอคูสติคโฮลขนาดต่างๆ
(ก) 5x5 $\mu m^2$ (ข) 10x10 $\mu m^2$ (ค) 15x15 $\mu m^2$ (ง) 20x20 $\mu m^2$

### 4.8.2 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่ 200x200 $\mu m^2$

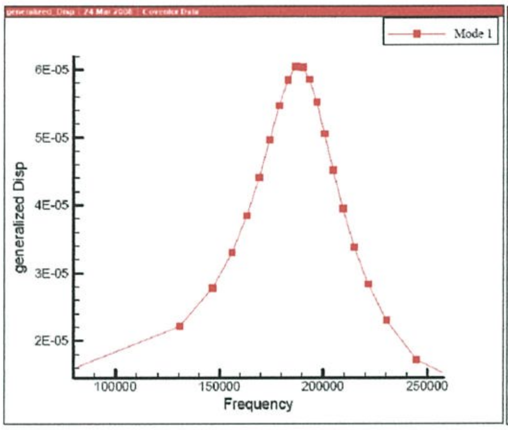
การทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของขนาดอคูสติคโฮลที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ ซึ่งจะกำหนดขนาดของอคูสติคโฮลดังนี้ คือ 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ โดยจะใช้ความหนาที่ 0.8 $\mu m$ ที่พื้นที่หน้าตัด 200x200 $\mu m^2$ โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.32



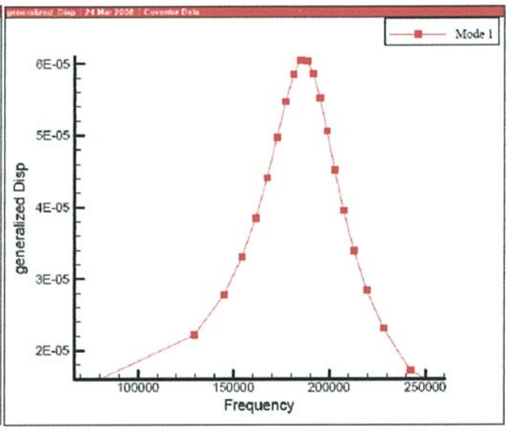

(ก) 5x5 $\mu m^2$




(ข) 10x10 $\mu m^2$




(ค) 15x15 $\mu m^2$



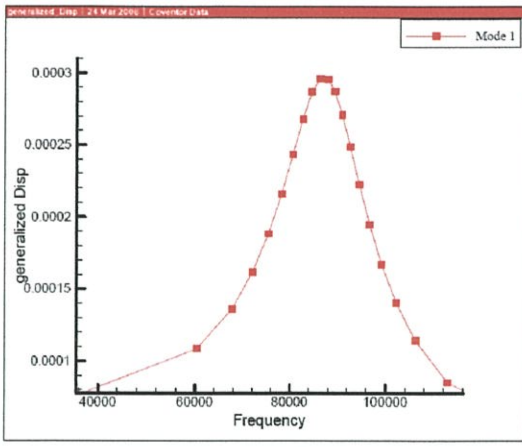

(ง) 20x20 $\mu m^2$

**รูปที่ 4.32** กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม ที่พื้นที่หน้าตัด 200x200 $\mu m^2$ และอคูสติคโฮลขนาดต่างๆ

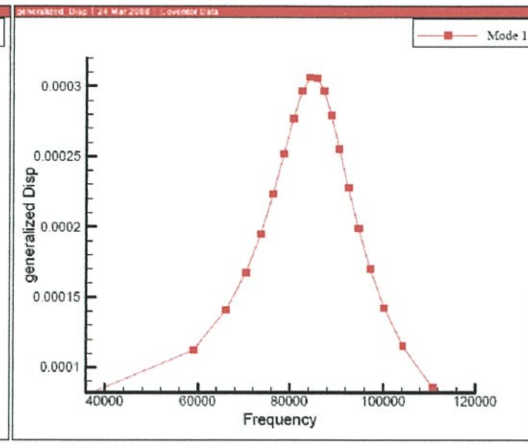
(ก) 5x5 $\mu m^2$ (ข) 10x10 $\mu m^2$ (ค) 15x15 $\mu m^2$ (ง) 20x20 $\mu m^2$

### 4.8.3 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่ 300x300 $\mu m^2$

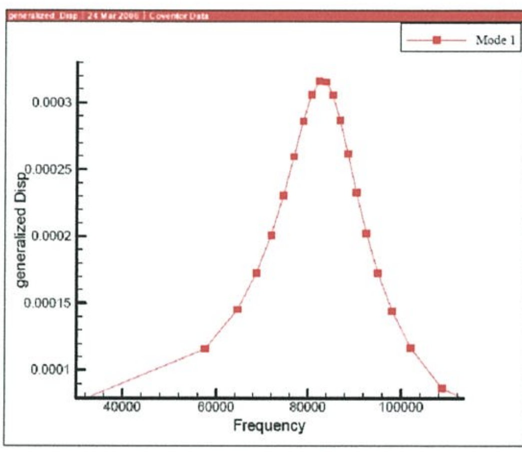
การทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของขนาดอคูสติคโฮลที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ ซึ่งจะกำหนดขนาดของอคูสติคโฮลดังนี้ คือ 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ โดยจะใช้ความหนาที่ 0.8 $\mu m$ ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 $\mu m^2$ โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.33



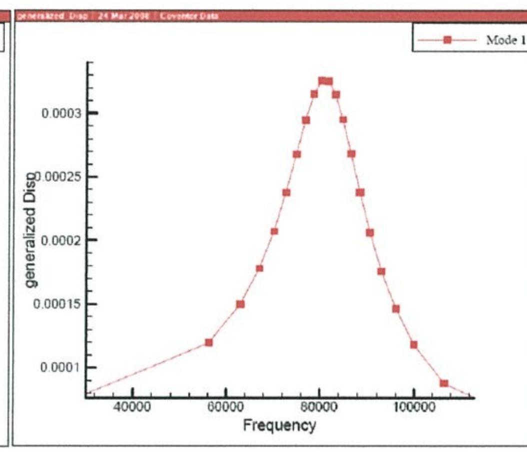

(ก) 5x5 $\mu m^2$




(ข) 10x10 $\mu m^2$




(ค) 15x15 $\mu m^2$



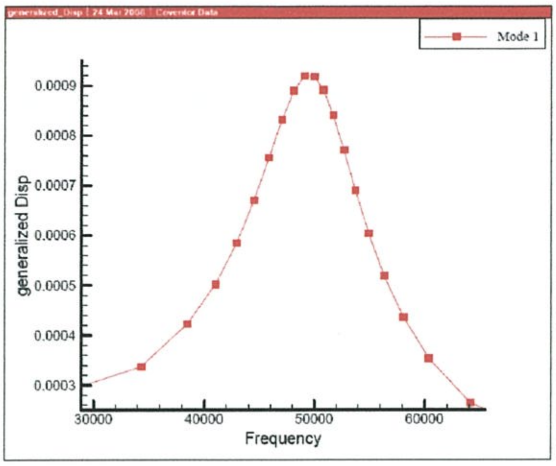

(ง) 20x20 $\mu m^2$

**รูปที่ 4.3**3 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 $\mu m^2$ และอคูสติคโฮลขนาดต่างๆ

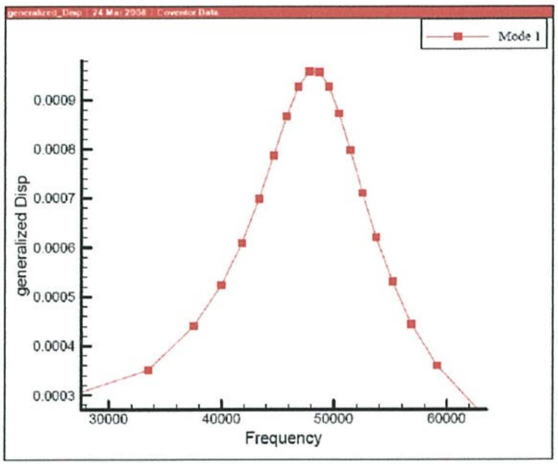
(ก) 5x5 $\mu m^2$ (ข) 10x10 $\mu m^2$ (ค) 15x15 $\mu m^2$ (ง) 20x20 $\mu m^2$

### 4.8.4 ผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นที่ 400x400 $\mu m^2$

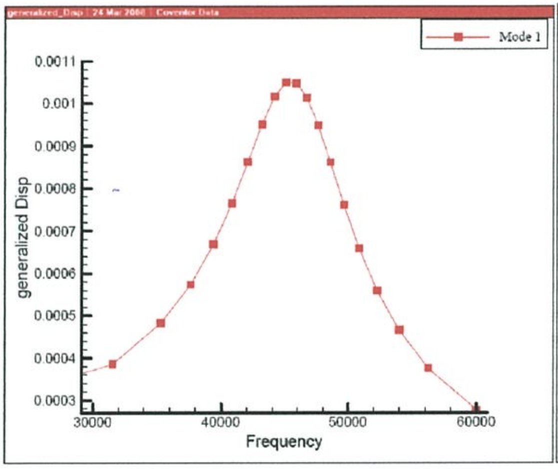
การทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาผลของขนาดอคูสติคโฮลที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆ ซึ่งจะกำหนดขนาดของอคูสติคโฮลดังนี้ คือ 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ โดยจะใช้ความหนาที่ 0.8 $\mu m$ ที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ โดยผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.34



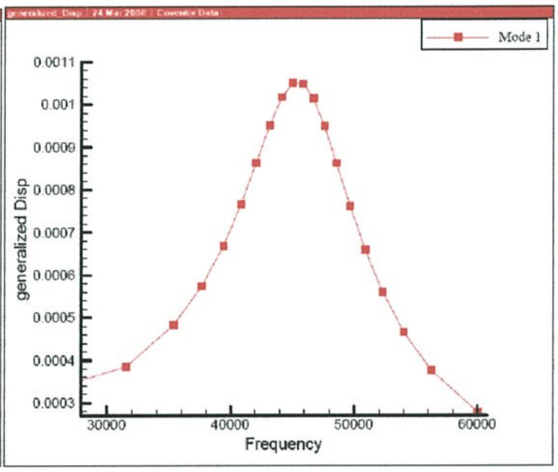

(ก) 5x5 $\mu m^2$




(ข) 10x10 $\mu m^2$




(ค) 15x15 $\mu m^2$




(ง) 20x20 $\mu m^2$

**รูปที่ 4.34** กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรม ที่พื้นที่หน้าตัด 300x300 $\mu m^2$ และอคูสติคโฮลขนาดต่างๆ

(ก) 5x5 $\mu m^2$ (ข) 10x10 $\mu m^2$ (ค) 15x15 $\mu m^2$ (ง) 20x20 $\mu m^2$

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถนำมาสรุปผลการตอบสนองทางความถี่ได้ดังตารางที่ 4.7 โดยจะพิจารณาจากความถี่ที่ให้ผลของแอมปลิจูดสูงสุด

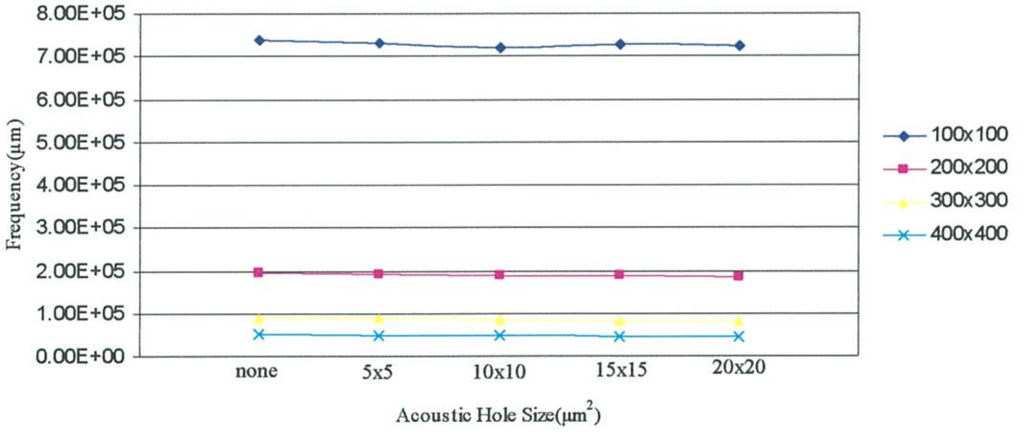
**ตารางที่ 4.7** แสดงผลการตอบสนองกับความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมที่พื้นที่หน้าตัดและอคูสติกโฮลขนาดต่างๆ โดยใช้ความหนาของไดอะแฟรม 0.8 μm

| พื้นที่หน้าตัด ($\mu m^2$) | ขนาดอคูสติกโฮล ($\mu m^2$) | ความถี่ (Hz) |
|---|---|---|
| 100x100 | none | 7.38E+05 |
| | 5x5 | 7.29E+05 |
| | 10x10 | 7.18E+05 |
| | 15x15 | 7.26E+05 |
| | 20x20 | 7.23E+05 |
| 200x200 | none | 1.93E+05 |
| | 5x5 | 1.91E+05 |
| | 10x10 | 1.88E+05 |
| | 15x15 | 1.87E+05 |
| | 20x20 | 1.85E+05 |
| 300x300 | none | 8.69E+04 |
| | 5x5 | 8.64E+04 |
| | 10x10 | 8.43E+04 |
| | 15x15 | 8.23E+04 |
| | 20x20 | 8.03E+04 |
| 400x400 | none | 4.97E+04 |
| | 5x5 | 4.91E+04 |
| | 10x10 | 4.78E+04 |
| | 15x15 | 4.51E+04 |
| | 20x20 | 4.34E+04 |

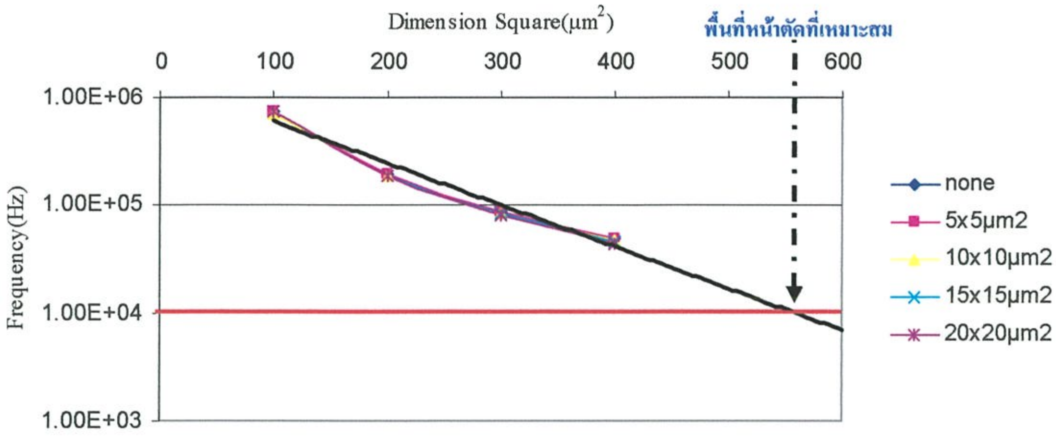
จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบความถี่ที่ตอบสนองระหว่างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติกโฮลที่ไดอะแฟรมจะมีค่าความถี่ที่ตอบสนองต่ำกว่าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอคูสติกโฮลที่ทุกๆพื้นที่หน้าตัดค่าเดียวกันแสดงว่าอคูสติกโฮลมีส่วนช่วยในการลดค่าความถี่ที่ตอบสนอง

ส่วนเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ตอบสนองกับขนาดของอคูสติคโฮลจะสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.34 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าขนาดของอคูสติคโฮลมีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะทำให้มีค่าความถี่ตอบสนองลดลง ซึ่งจะพบค่าความถี่ตอบสนองต่ำที่สุดที่อคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ และพบค่าความถี่สูงสุดที่อคูสติคโฮลขนาด 5x5 $\mu m^2$ ยกเว้นที่พื้นที่หน้าตัดขนาด 100x100 $\mu m^2$ จะพบค่าความถี่ตอบสนองต่ำที่สุดที่อคูสติคโฮลขนาด 10x10 $\mu m^2$ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากไดอะแฟรมมีขนาดเล็กเกินไป ถ้าอคูสติคโฮลมีขนาดใหญ่เกินไปก็จะทำให้มีผลจากการตอบสนองต่อความถี่ต่ำได้ไม่ดี ดังนั้นจึงต้องพิจารณาขนาดของอคูสติคโฮลให้เหมาะสมกับขนาดของไดอะแฟรม

แต่เมื่อพิจารณาจากความถี่ที่ตอบสนองแล้วจะพบว่าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาดต่างๆก็ไม่สามารถตอบสนองต่อความถี่เสียงได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าแนวโน้มเช่นเดียวกับทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอคูสติค เพื่อหาค่าพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมกับความหนา 0.8 μm โดยใช้อคูสติคโฮลขนาดต่างๆ ที่เหมาะสมกับการสร้างไมโครโฟนในอนาคต ซึ่งสามารถพิจารณาพื้นที่ที่เหมาะกับความหนาได้จากรูปที่ 4.35 โดยพื้นที่ที่เหมาะสมกับความหนา 0.8 μm โดยใช้อคูสติคโฮลขนาดต่างๆ แสดงไว้ดังในตารางที่ 4.8




**รูปที่ 4.35** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอคูสติคโฮลกับความถี่ที่พื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ

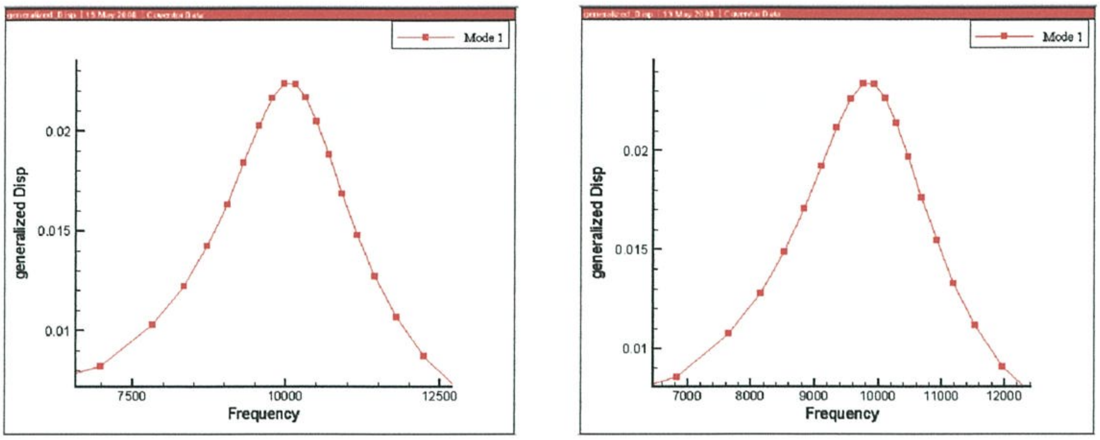



**รูปที่ 4.36** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดพื้นที่หน้าตัดกับความถี่ที่พื้นที่อคูสติคโฮลขนาดต่างๆ

**ตารางที่ 4.8** แสดงพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมกับการตอบสนองความถี่เสียงที่อคูสติคโฮลขนาดต่างๆ

| ขนาดของอคูสติคโฮล ($\mu m^2$) | พื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม ($\mu m^2$) |
|---|---|
| 5x5 | 575x575 |
| 10x10 | 573x573 |
| 15x15 | 565x565 |
| 20x20 | 555x555 |

ซึ่งหลังจากที่ได้คาดคะเนพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมแล้ว เราก็ได้นำค่าพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมไปทำการทดสอบด้วยโปรแกรม Coventorware™ ซึ่งความถี่ที่ได้แสดงดังในรูปที่ 4.37 โดยจากกราฟจะพบว่าความถี่ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ 10,000 Hz ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.9 โดยโครงสร้างที่ไม่มีอคูสติคโฮลที่ความหนา 0.8 μm และพื้นที่หน้าตัด 578x578 $\mu m^2$ จะตอบสนองต่อความถี่ที่ 1.03E+04 Hz ส่วนโครงสร้างที่มีอคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ ความหนา 0.8 μm และพื้นที่หน้าตัด 555x555 $\mu m^2$ จะตอบสนองต่อความถี่ที่ 1.01E+04 Hz ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเราสามารถที่จะใช้ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุมาประยุกต์ใช้เป็นไมโครโฟนได้




(ก) (ข)

**รูปที่ 4.37** กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมท่พารามิเตอร์ต่างๆ

(ก) ไม่มีอคูสติคโฮล พื้นที่หน้าตัด 578x578 $\mu m^2$

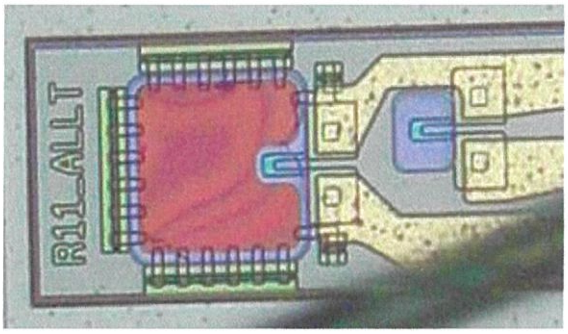
(ข) ขนาดอคูสติคโฮล 20x20 $\mu m^2$ พื้นที่หน้าตัด 555x555 $\mu m^2$

**ตารางที่ 4.9** แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบพื้นที่หน้าตัดที่ได้ทำการคาดคะเน ที่ความหนา 0.8 μm

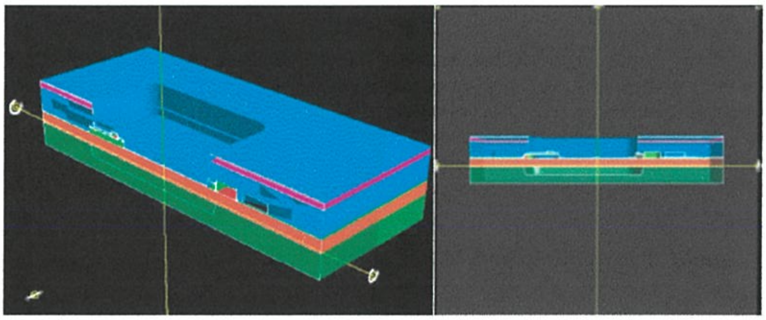
| ขนาดของอคูสติคโฮล ($\mu m^2$) | ขนาดพื้นที่หน้าตัด ($\mu m^2$) | ความถี่ (Hz) |
|---|---|---|
| None | 578x578 | 1.03E+04 |
| 20x20 | 555x555 | 1.01E+04 |

### 4.9 การทดสอบโปรแกรม Coventorware™

โดยโครงสร้างที่เราใช้ในการทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม Coventorware™ เราจะใช้โครงสร้างของ TMEC ซึ่งมีพารามิเตอร์ ซึ่งทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุของ TMEC แสดงดังในรูปที่ 4.38 ที่มีโพลีซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด $100 \times 100$ $\mu m^2$ และมีความหนา 1.5 $\mu m$ โดยภาพสามมิติที่ได้จากโปรแกรม Coventorware™ แสดงได้ดังในรูปที่ 4.39

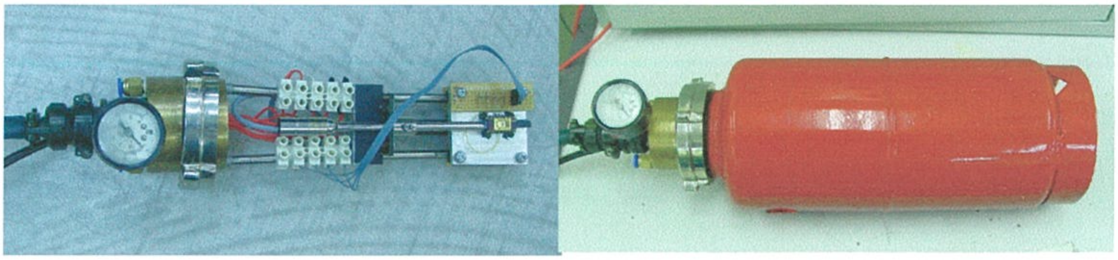



**รูปที่ 4.38** ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุของ TMEC



**รูปที่ 4.39** ภาพสามมิติที่ได้จากโปรแกรม Coventorware™ รานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุของ TMEC

โดยที่เราจะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวโครงสร้างจริงในอุปกรณ์วัดความดันดังแสดงในรูปที่ 4.40 ซึ่งเราจะใช้แรงดันที่ 2-20 mPas ซึ่งผลจากการวัดแสดงได้ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งจากตารางจะพบว่าค่าความไวในการทำงานของชุดทดสอบความดันกับที่ได้จากโปรแกม Coventorware™ มีความแตกต่างกันอยู่ 18.7% แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม Coventorware™ ก็มีความน่าเชื่อถือพอที่จะใช้ในการทดสอบได้



**รูปที่ 4.40** ชุดอุปกรณ์วัดความดัน

**ตารางที่ 4.10** แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากชุดทดสอบความดันเปรียบเทียบกับโปรแกรม CoventerWare™

| | ชุดทดสอบความดัน | CoventerWare™ |
|---|---|---|
| ช่วงของความจุไฟฟ้า(F) | 1.921838849E-13 - 1.921839072E-13 | 1.562470609E-13 - 1.562470791E-13 |
| ค่าความไว(V/Pas) | 8.180267E-11 | 6.841513E-11 |

# บทที่ 5
# สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยมีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้ถูกกำหนดไว้แต่แรก (ในบทที่1) คือ ทำการศึกษาและออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างคาปาซีฟทีปเพื่อใช้เป็นซิลิคอนไมโครโฟน เพื่อศึกษาถึงผลการออกแบบให้ใช้โพลีซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมซึ่งเป็นวัสดุที่สนใจเปรียบเทียบกับซิลิคอนผลึกเดี่ยว ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันในปัจจุบันโดยออกแบบเพื่อหาพารามิเตอร์ที่จะทำให้ไมโครโฟนที่ทำจากโพลีซิลิคอนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับซิลิคอนไมโครโฟนที่ใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งผลการวิจัยได้สรุปวาระสำคัญได้ดังนี้

ได้ทำการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ความหนาไดอะแฟรม 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 และ 2.0 μm และ พื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ และยังได้ออกแบบให้ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอนและโพลีซิลิคอนเพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และสุดท้ายได้ออกแบบอคูสติคโฮลแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$

ทำการศึกษาผลของความหนาไดอะแฟรมที่มีผลต่อค่าความไวที่พื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆ พบว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นค่าความไวจะมีค่าลดลง และพบค่าความไวสูงสุดอยู่ที่ เงื่อนไขความหนา 0.5 μm และค่าความไวต่ำสุดอยู่ท่เงื่อนไขความหนา 2.0 μm แต่จากการพิจารณาเรื่องความทนทานของตัวอุปกรณ์จะพบว่าค่าความหนา 0.8 μm จะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

ทำการศึกษาผลของพื้นที่หน้าตัดของไดอะแฟรมที่มีผลต่อค่าความไวความนาค่าต่างๆ พบว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นค่าความไวจะมีค่าเพิ่มขึ้น และพบค่าความไวสูงสุดอยู่ที่ เงื่อนไขพื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ และค่าความไวต่ำสุดอยู่ที่เงื่อนไขพื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ ดังนั้นพื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ จะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด และพบว่ามีค่าความไว 5.538586E-09 V/Pa ที่ความหนา 0.8 μm

ทำการศึกษาความแตกต่างของค่าความไวระหว่างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอนกับซิลิคอนพบว่าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอนจะมีค่าความไวสูงกว่าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอน ซึ่งพบว่าค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอนที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ และความหนา 0.8 μm จะมีค่าความไว 6.659129E-09 V/Pa

ทำการศึกษาผลของอะคูสติคโฮลที่มีผลต่อค่าความไวพบว่าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากโพลีซิลิคอนจะมีค่าสูงกว่าทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอคูสติคโฮลที่ไดอะแฟรมสร้างจากซิลิคอนและโพลีซิลิคอน โดยค่าความไวจะมีค่าสูงสุดที่อคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ ในทางตรงกันข้ามค่าความไวจะต่ำที่สุดที่ขนาดอคูสติคโฮล 5x5 $\mu m^2$ และจะพบค่าความไวสูงสุดที่เงื่อนไข พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ และความหนา 0.8 $\mu m$ ที่อคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ ซึ่งมีค่า 7.967540E-09 V/Pa

ทำการศึกษาผลของอคูติคโฮลที่มีผลต่อระยะขจัดของไดอะแฟรมที่ความหนาค่าต่างๆ พบว่าระยะขจัดของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีอคูสติคโฮลขนาด 20x20 $\mu m^2$ กับ ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ไม่มีอคูสติคโฮล ที่ความหนาค่าเดียวกันจะเห็นได้ว่าระยะขจัดของโครงสร้างที่มีอคูสติคโฮลจะมีค่าสูงกว่าโครงสร้างที่ไม่มีอคูสติคโฮลที่ความหนาและพื้นที่หนาตัดค่าเดียวกัน

ทำการศึกษาผลของความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อการตอบสนองกับความถี่ที่พื้นทีหน้าตัดค่าต่างๆความหนาเพิ่มขึ้นความถี่ที่ตอบสนองจะมีค่าสูงขึ้นโดยจะมีความถี่ที่ตอบสนองสูงที่สุดที่ความหนา 2.0 $\mu m$ และต่ำสุดที่ความหนา 0.5 $\mu m$ ที่พื้นที่หน้าตัดค่าเดียวกัน ซึ่งความหนาที่ให้ค่าผลตอบสนองกับค่ากลางของความถี่เสียงได้ดีที่สุดคือที่ความหนา 0.5 $\mu m$ แต่ความทนทานจะต่ำดังนั้นเมื่อพิจารณาด้วยเหตุผลนี้แล้วความหนา 0.8 $\mu m$ จะมีความเหมาะสมที่สุดแต่ก็ยังไม่สามารถตอบสนองต่อความถี่เสียงได้ ซึ่งได้หาค่าแนวโน้มของพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมกับความหนา 0.8 $\mu m$ คือ 578x578 $\mu m^2$ ส่วนเมื่อพิจารณาถึงผลของพื้นที่หน้าตัด จะเห็นได้ว่าจะเห็นได้ว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นความถี่ที่ตอบสนองจะมีค่าลดลง โดยจะมีความถี่ที่ตอบสนองสูงที่สุดที่พื้นที่หน้าตัด 100x100 $\mu m^2$ และต่ำสุดที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ ที่ความหนาค่าเดียวกัน ซึ่งความหนาที่ให้ค่าผลตอบสนองกับบความถี่เสียงได้ดีที่สุดคือที่พื้นที่หน้าตัด 400x400 $\mu m^2$ แต่ที่เงื่อนไขนี้ก็ยังไม่สามมารถตอบสนองต่อความถี่เสียงได้ ซึ่งได้หาค่าแนวโน้มของความหนาที่เหมาะสมกับพื้นที่หน้าตัด 100x100, 200x200, 300x300 และ 400x400 $\mu m^2$ คือ 0.0045, 0.042, 0.052 และ 0.160 $\mu m$ ตามลำดับ

ทำการศึกษาผลของขนาดอคูสติคโฮลที่มีผลต่อการตอบสนองทางความถี่ที่พื้นที่หน้าตัดค่าต่างๆพบว่า พื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมกับเงื่อนไขความหนา 0.8 $\mu m$ ที่อคูสติคโฮลขนาด 5x5, 10x10, 15x15 และ 20x20 $\mu m^2$ คือ 575x575, 573x573, 565x565 และ 555x555 $\mu m^2$ ตามลำดับ

# เอกสารอ้างอิง


[1] Julian W. Gardner. *Microsensors, MEMS and Smart Devices*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2001

[2] Wolf, S. and Tauber. *Silicon Processing For VLSI Vol. 1- Process Technology*. California: Lattice Press. 1986

[3] Wolf, S. and Tauber. *Silicon Processing For VLSI Vol. 3: The Submicron MOSFET*. California: Lattice Press. 1995

[4] Micheal Quirk and Julian Serda. *Semiconductor Manufacturing Technology*: Pretice-Hell Inc. Upper Saddle River, New Jersey .2001

[5] ธนภัทร ภูรีพิทักษ์. เครื่องเสียงภาคทฤษฎี. กรุงเทพฯ : ศูนย์หนังสือพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2548

[6] ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ. วิศวกรรมไฟฟ้าภาคทฤษฎี. กรุงเทพฯ : บริษัทสกายบุ๊กส์ จำกัด. 2549

[7] Torkkeli, A., Rusanen, O., Saarilahti, J., Seppa, H., Sipola, H. and Hietanen, J. **2000** Capacitive microphone with low-stress polysilicon membrane and high-stress polysilicon backplate, *Sensor and Actuators A*, vol. 85, pp.116-123.

[8] Schellin, R., Strecker, M., Nothelfer, U., Schuster, G. **1995** Low pressure acoustic sensors forairborne sound with pieroresistive monocrystalline silicon and electrochemically etched diaphragm, *Sensor and Actuator A*, vol. 46-47, pp.156-160.

[9] Tajima, T., Nichiguchi, T., Chiba, S., Morita, A., Abe, M., Tanioka, K., Saito, N. and Esashi, M. **2003** High-performance ultra-small single crystalline silicon microphone of an integrated structure, *Microelectronic Engineering*, vol. 67-68, pp. 508-519.

[10] www.coventorware.com, Analyzer reference guide MEMS and Microsystems design version 2003.1..

[11] Jones and Childers, **2001** Contemporary college physics third edition

[12] ธัญญะ ศักดิ์โสภิษฐ์. “ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิคอนแบบเปียโซรีซีสทีปบนไดอะแฟรมบาง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534

[13] Duane Tandeske. *Pressure Sensor Selection And Application*. New York: Marcel Dekker Inc.1991

[14] โรเบิร์ต เอฟ.ค๊อฟลินและเฟรเดอริก เอฟ. ดริสคอลล์. การใช้งานออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี. แปลโดยวิโรจน์ อัศวรังสี และคณะ. กรุงเทพฯ: บริษัท เอซ.เอ็น.กรุ๊ป จำกัด.2536

[15] เจน สงสมพันธุ์. ระบบเสียงและการมิกซ์เสียง : สถาบันอิเล็กทรอนิกส์กรุงเทพฯ.2536

[16] DESIGNER™ Reference Guide & Tutorials, MEMS & Microsystems Physical Design.

[17] 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

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

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

[20] วิน บรรจงปรุ, อนุชา เรืองพานิช, โอภาส ตรีทวีศักดิ์ และ อัมพร โพธิ์ใย. "การศึกษา Si-Precipitate บริเวณรอยต่อ AlSiCu/Si เพื่อลดค่าความต้านทานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำสำหรับกระบวนการผลิตระบบเครื่องกลไฟฟ้าระดับจุลภาค." การประชุมวิชา การทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, ปี 2548, หน้า 1173-1176

[21] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. "การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอรัสซิลิคอน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2544, หน้า 61-67

[22] Chien Chou, Hui-Kang Teng, Chih-Jen Yu and Hong-Sheng Huang. "Polarization modulation imaging ellipsometery for thin film thickness measurement" Optics Comunications, 2006, pp.032-042

[23] รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช. *เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร :แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2544

[24] 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

[25] E.Kalvesten, L.Smith, L.Tenerz and G.Stemme. " The First Surface Micromachined Pressure Sensor For Cardiovascular Pressure Measurements" IEEE, 1998, pp574-579

# ภาคผนวก

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

# SIMULATION OF LOW PRESSURE CAPACITIVE TRANSDUCER WITH POLYSILICON DIAPHRAGM ON THE SILICON SUBSTRATE FOR HEARING AIDS DEVICE

T. Arpautaipong*, A. Kaewcharoen *, E. Chaowicharat**, K. Saejok**, A. Poyai**, W. Titiroongruang*, S. Supadech*

*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

A capacitive single-chip silicon pressure transducer with polysilicon diaphragm has been simulated by using Coventorware™ software tool. The simulation was performed by varying surface dimension 500*500, 1000*1000, 2000*2000, 3000*3000, 4000*4000, 5000*5000 $\mu m^2$ and thickness of diaphragm in the range of 0.1-0.5 μm with initial pressure from 20 to 100 μPa. After applying simulated pressure, the displacement and surface area were collected for calculating trend of capacitance and sensitivity. Hence, the suitable condition can be used for low pressure capacitive microphone for hearing aids device fabrication in the future.

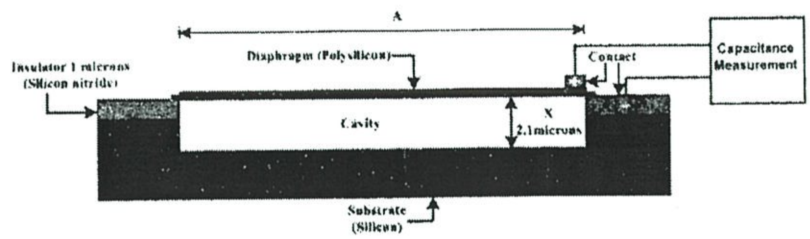
**KEYWORDS:** Capacitive pressure transducer, diaphragm, sensitivity, hearing aids

## 1. INTRODUCTION

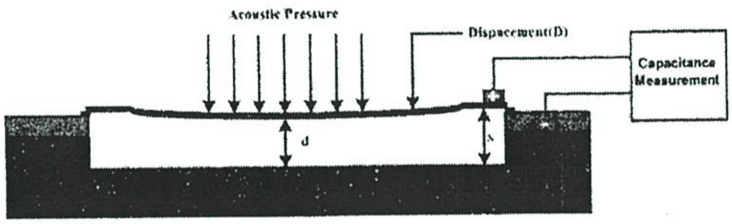
A transducer is a useful device that converts one type of energy (heat, light, magnetic, pressure, etc.) to electrical signal. Nowadays, transducers are used in wide range of applications, for example photodiode, thermocouple and microphone. Microphone is an acoustic to electric transducer. The microphone structures have mainly 3 types as capacitive, piezoresistive and piezoelectric. In this simulation, the low pressure capacitive pressure transducer was suggested for low pressure capacitive microphone [1], [2] with an application for hearing aids [3] device. The capacitive transducer structure is shown in Figure 1. The advantages of this structure are good sensitivity and less temperature dependence. However, the gap fabrication and controlling of diaphragm mechanical properties are necessary. The minimum acoustic pressure that human can hear is 20 μPa, therefore the appropriate diaphragm should have suitable mechanical properties for detecting very low pressure [4]. When the diaphragm was excited by acoustic pressure, it caused the capacitance to change. Therefore, the capacitance influence to electrical signal that was converted back to acoustic signal at a speaker. The equation, used for calculating the capacitance, is listed in the section on simulation results and discussion. The mechanical properties that affect to the capacitance

* Corresponding author. Tel: 662 321 4276, Fax: 6627390643, E-mail:olivertun@hotmail.com

are surface area and distance between plates. The diaphragm surface area and diaphragm thickness were studied by using Coventorware$^{TM}$ software tool.




(a)




(b)

**Figure 1.** Capacitive transducer (a) Capacitive transducer structure. (b) Capacitive transducer when pressure is applied.

## 2. MATERIALS AND METHODS

Coventorware$^{Tm}$ [5] software tool was used to simulate capacitive transducer mechanism. First step, fabrication processes are sequentially arranged into process steps. Then mask layouts are designed. After that, the 3-D model is constructed by software tool as shown in figure 2. In preprocessor process, the appropriate finite element sized are determined, because the finite element sizes influence the accuracy and simulation time. The obtained 3-D models are brought to simulation step.

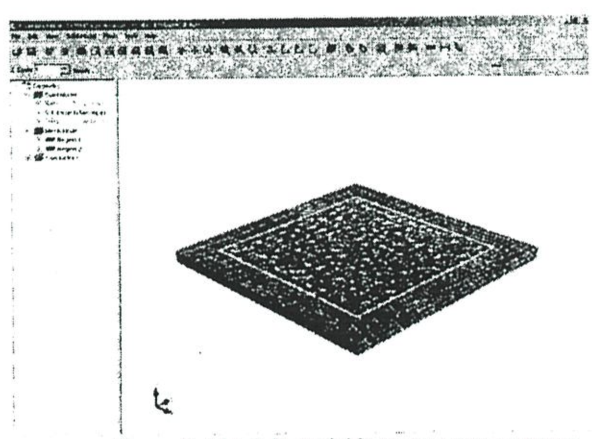


**Figure 2.** The 3-D model in preprocessor process

According to the simulation process, the initial pressure is 20μPascal. So the effect of surface area and thickness of diaphragm can be investigated after simulation as shown in Figure 3. The dimension of diaphragm is selected at 500*500, 1000*1000, 2000*2000, 3000*3000, 4000*4000, 5000*5000 $\mu m^2$ and the diaphragm thickness is 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 μm. After that, the displacement data is collected in each condition and then capacitance is calculated. In addition, sensitivity trend is also considered in order to study the impact of these factors. The simulated profiles will be compared with actual experimental profiles that will be left as future works.

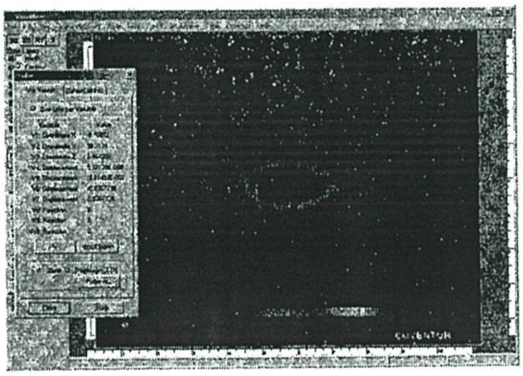
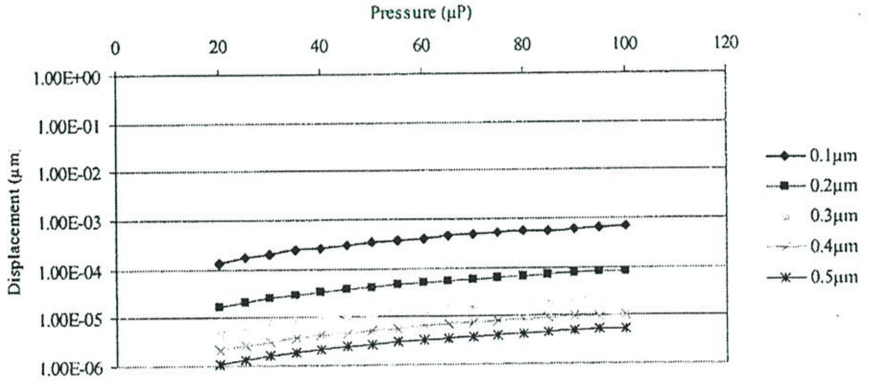


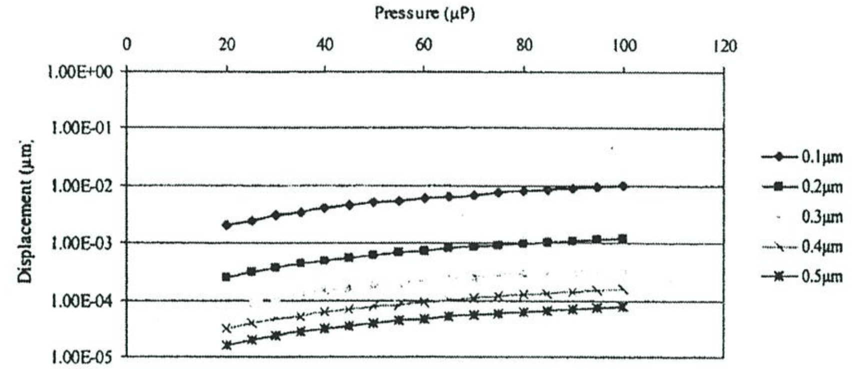
**Figure 3.** The result after simulation.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

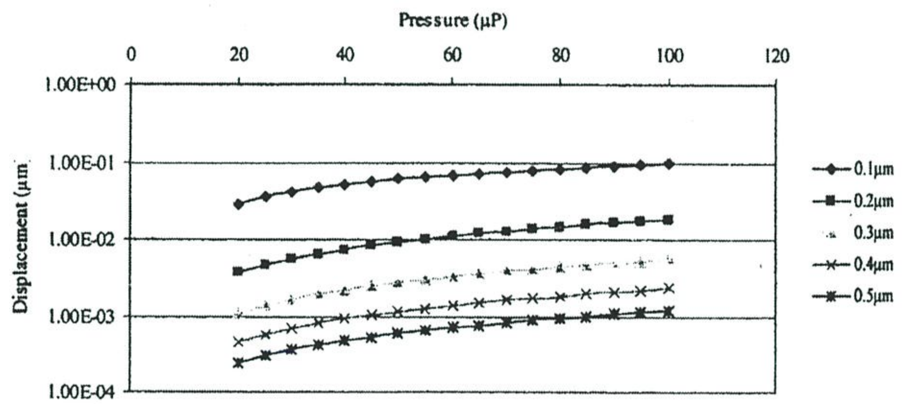
After simulation, the displacement values and calculated surface area of diaphragm were obtained to compute capacitance as following in equation (1). From Fig. 4(a) to 4(f), they illustrated the relationship between displacement and pressure for each surface dimension and thickness. We found that the diaphragm displacement increased with surface dimension because not only it have more area to receive pressure force but also larger dimension resulted in more flexible diaphragm. On the other hand, the diaphragm displacements also decrease with diaphragm thickness. As the results could be clearly found that the surface dimension is more influential to displacement than thickness.



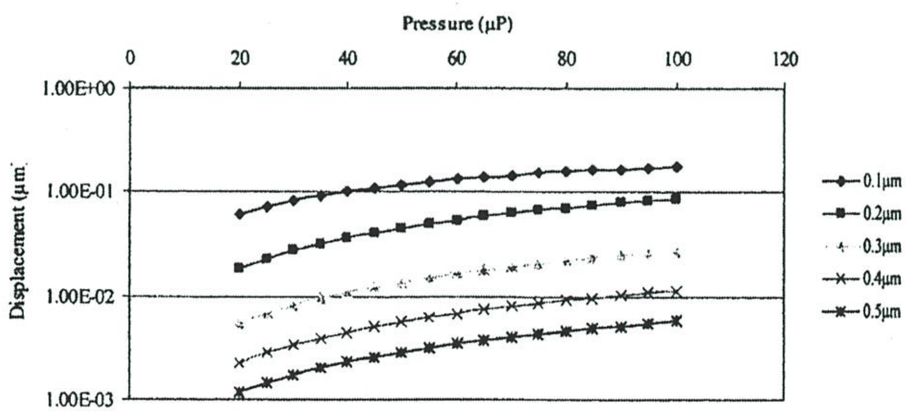

(a) 500*500 $\mu m^2$.



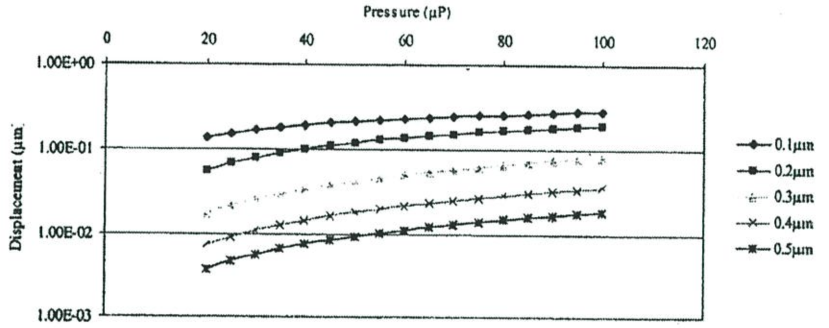

(b) 1000*1000 μm².



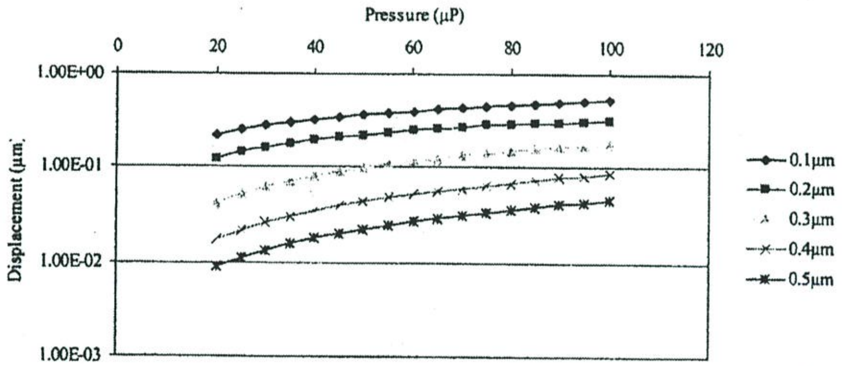

(c) 2000*2000 μm².




(d) 3000*3000 μm².




(e) 4000*4000 μm².




(f) 5000*5000 μm².

**Figure 4.** The displacement of diaphragm when various pressures are applied. The thickness of diaphragm is 0.1-0.5 μm and various surface dimensions (a) 500*500 μm². (b) 1000*1000 μm². (c) 2000*2000 μm². (d) 3000*3000 μm². (e) 4000*4000 μm². (f) 5000*5000 μm².

The capacitance is calculated according to the following equation [6];

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \qquad (1)$$

Where:
C is the capacitance of pressure transducer (F),
$\varepsilon_0$ is the permittivity of free space (F/m),
$\varepsilon_r$ is the dielectric constant of air,
A is the diaphragm surface area ($m^2$),
d is the separation between plates (m).

**Table 1**. The electrical capacitance and trend of sensitivity at various surface dimension and thickness.

| Surface Dimension ($\mu m^2$) | Thickness ($\mu m$) | Electrical capacitance (F) | Sensitivity $\Delta d/\Delta P$ (a.u.) |
|---|---|---|---|
| 500*500 | 0.1 | 1.054114E-12 - 1.054378E-12 | 2.629254E-11 |
| | 0.2 | 1.054056E-12 - 1.054089E-12 | 3.287661E-12 |
| | 0.3 | 1.054050E-12 - 1.054060E-12 | 9.746187E-13 |
| | 0.4 | 1.054049E-12 - 1.054053E-12 | 4.113919E-13 |
| | 0.5 | 1.054048E-12 - 1.054050E-12 | 2.107497E-13 |
| 1000*1000 | 0.1 | 4.220117E-12 - 4.235796E-12 | 9.707819E-11 |
| | 0.2 | 4.216681E-12 - 4.218643E-12 | 1.220923E-11 |
| | 0.3 | 4.216336E-12 - 4.216827E-12 | 3.055628E-12 |
| | 0.4 | 4.216252E-12 - 4.216497E-12 | 1.527007E-12 |
| | 0.5 | 4.216222E-12 - 4.216347E-12 | 7.820476E-13 |
| 2000*2000 | 0.1 | 1.709849E-11 - 1.768696E-11 | 2.153559E-10 |
| | 0.2 | 1.689412E-11 - 1.701222E-11 | 4.547710E-11 |
| | 0.3 | 1.687345E-11 - 1.690842E-11 | 1.356358E-11 |
| | 0.4 | 1.686844E-11 - 1.688316E-11 | 5.722638E-12 |
| | 0.5 | 1.686665E-11 - 1.686570E-11 | 3.663744E-13 |
| 3000*3000 | 0.1 | 3.906790E-11 - 4.135282E-11 | 1.565292E-10 |
| | 0.2 | 3.827800E-11 - 3.952824E-11 | 9.145028E-11 |
| | 0.3 | 3.804346E-11 - 3.843855E-11 | 2.990193E-11 |
| | 0.4 | 3.798698E-11 - 3.815296E-11 | 1.267422E-11 |
| | 0.5 | 3.796686E-11 - 3.805167E-11 | 6.497037E-12 |
| 4000*4000 | 0.1 | 7.212099E-11 - 7.811900E-11 | 1.178253E-10 |
| | 0.2 | 6.930469E-11 - 7.435107E-11 | 1.083876E-10 |
| | 0.3 | 6.801610E-11 - 7.023163E-11 | 5.133138E-11 |
| | 0.4 | 6.769171E-11 - 6.863249E-11 | 2.241159E-11 |
| | 0.5 | 6.757831E-11 - 6.751860E-11 | 1.448330E-12 |
| 5000*5000 | 0.1 | 1.175518E-10 - 1.400949E-10 | 1.515000E-10 |
| | 0.2 | 1.117628E-10 - 1.236484E-10 | 9.518830E-11 |
| | 0.3 | 1.074796E-10 - 1.149496E-10 | 6.691785E-11 |
| | 0.4 | 1.062608E-10 - 1.098288E-10 | 3.383619E-11 |
| | 0.5 | 1.058480E-10 - 1.076518E-10 | 1.751977E-11 |

* Arbitrary unit

Referring to Eq.1, it is found that electrical capacitance can be calculated from simulation result. Since d, A, $\varepsilon_0$ and $\varepsilon_r$ are constant value. According to Table 1, electrical capacitance increased with surface area directly. Since small-size microphone is needed, the suitable surface area should also response low pressure. Otherwise, diaphragm thickness only impacts capacitance slightly but the microphone durability depend on appropriate diaphragm thickness. If the diaphragm is excessively thin, it will be broken easily. From displacement and pressure plot, the trend of sensitivity exhibits the effectiveness of pressure transducer quality.

$$V = \frac{\Delta Q}{\Delta C} \tag{2}$$

Where:

V is the electrical potential (V),
$\Delta Q$ is the difference charge (C),
$\Delta C$ is the difference capacitance (F).

When we considered equation 2, $\Delta Q$ is a constant value because of uniform impurity doping. Since V is inversely proportion to C. The equation for sensitivity could be found below.

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta P} \tag{3}$$

Where:

S is sensitivity of pressure transducer (V/Pascal),
$\Delta V$ is difference electric potential (V),
$\Delta P$ is difference pressure (Pascal).

Referring to Eq.2 and Eq.3 by fixing Q, the sensitivity is shown as $S = \frac{Q}{\Delta C \Delta P}$. From Eq.1, Then sensitivity is given by

$$S = \frac{Q \Delta d}{\epsilon_0 \epsilon_r A \Delta P} \tag{4}$$

In term of $Q/(\epsilon_0 \epsilon_r)$, is considered as constant term. So, trend of sensitivity could be found by $\Delta d/(A\Delta P)$ which is shown in Table1. We found that trend of sensitivity increase with surface area, otherwise, sensitivity decrease with increased diaphragm thickness. From Table 1, The best sensitivity could be found at 5000*5000 $\mu m^2$, conversely, the worst sensitivity could be found at 500*500 $\mu m^2$. In the actual fabrication, small surface area is needed for high quantity production. As the same reason above, the 3000*3000$\mu m^2$ surface area is chosen to be the suitable condition for our fabrication.

Furthermore, the diaphragm thickness is also considered. The great sensitivity could be found at 0.1 μm and the worst sensitivity could be found at 0.5 μm. If diaphragm is very thin, it is difficult to fabricate and has low durability. So that 0.4 μm thickness is choose to be the appropriate condition.

## 4. CONCLUSIONS

The simulation of low pressure capacitive transducer with polysilicon diaphragm was proposed. The dependencies of thickness and surface area of diaphragm on displacement of diaphragm were studied via simulation work using commercially available coventorware™ simulation software. It concluded that trend of sensitivity increases with surface area and decreases with increased diaphragm thickness .However, the 3000*3000$\mu m^2$ surface area and 0.4 μm thickness are the appropriate condition for actual fabrication in the future.

## *5. ACKNOWLEDGEMENTS*

The authors would like to thank technical staffs of TMEC for special advice, ERC for special helps and MEMS for Coventorware™ simulation software. Financial support for this work from TGIST is greatly appreciated.

## REFERENCES


[1] Torkkeli, A., Rusanen, O., Saarilahti, J., Seppa, H., Sipola, H. and Hietanen, J. **2000** Capacitive microphone with low-stress polysilicon membrane and high-stress polysilicon backplate, Sensor and Actuators A, vol. 85, pp.116-123.

[2] Schellin, R., Strecker, M., Nothelfer, U., Schuster, G. **1995** Low pressure acoustic sensors forairborne sound with pieroresistive monocrystalline silicon and electrochemically etched diaphragm, Sensor and Actuator A, vol. 46-47, pp.156-160.

[3] Maj, J.B., Royackers, L., Wouters, J., and Moonen, M. **2006** Comparison of adaptive noise reduction algorithms in dual microphone hearing aids, Speech communication, vol. 48, pp.957-970.

[4] Tajima, T., Nichiguchi, T., Chiba, S., Morita, A., Abe, M., Tanioka, K., Saito, N. and Esashi, M. **2003** High-performance ultra-small single crystalline silicon microphone of an integrated structure, Microelectronic Engineering, vol. 67-68, pp. 508-519.

[5] www.http//www.coventorware.com, Analyzer reference guide MEMS and Microsystems design version 2003.1.

[6] Jones and Childers, **2001** Contemporary college physics third edition

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| **ชื่อ-นามสกุล** | นายตุลย์ อาภาอุทัยพงษ์ |
| **วัน เดือน ปีเกิด** | วันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2526 |
| **สถานที่เกิด** | จังหวัดกรุงเทพมหานคร |
| **วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี** | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (อิเล็กทรอนิกส์) |
| **สถานที่สำเร็จการศึกษา** | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร |

ลาดกระบัง

| | |
|---|---|
| **ปีที่สำเร็จการศึกษา** | ปีการศึกษา 2548 |