

ตัวตรวจวัดอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ

PIEZORESISTIVE DIAMOND THIN FILM ACCELEROMETER

วีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์

WERASAK TECHAKITTITROJ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ดำเนินการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๔๖

ISBN 974-324-877-3

ตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ

PIEZORESISTIVE DIAMOND THIN FILM ACCELEROMETER



วีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์

WERASAK TECHAKITTIROJ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974 - 324 - 877 - 3

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**48951**
วัน, เดือน, ปี.....**13 ส.ค. 2547**

.b.....
.i.....

PIEZORESISTIVE DIAMOND THIN FILM ACCELEROMETER

WERASAK TECHAKITTIROJ

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

2003

ISBN 974 – 324 – 877 - 3

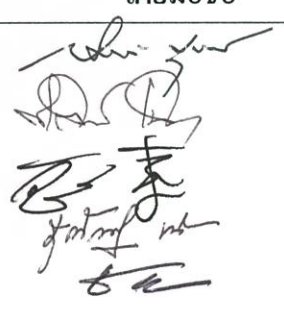
COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ
PIEZORESISTIVE DIAMOND THIN FILM ACCELEROMETER
ชื่อนักศึกษา นายวีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์
รหัสประจำตัว 41061187
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
ผศ.ดร.เต็มพงษ์	เพชรกุล	
รศ.ดร.วิสุทธิ	จิตรุ่งเรือง	
ผศ.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
รศ.สมศักดิ์	เชียร์ศิริกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 27 ตุลาคม 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 3 (E12-301)



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 24 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2546

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ
นักศึกษา	นายวีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์
รหัสประจำตัว	41061187
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ ซึ่งระบบของมวล และคานาอยู่บนชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งซึ่งมีขนาด 6×6 ตารางมิลลิเมตร โดยวิธีการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกด้วยสารละลาย TMAH ซึ่งตัวตรวจจับอัตราเร่งที่ได้สร้างขึ้น สามารถให้มีคานากว้าง 440 ไมครอน ยาว 440 ไมครอน หนา 10 ไมครอน และมีขนาดของมวลตรวจสอบเท่ากับ 1.238 มิลลิกรัม ทำให้อุปกรณ์มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 45.8 kHz เมื่อนำมาทดสอบความไวต่ออัตราเร่งที่มากกระทำพบว่ามีควมไวต่ออัตราเร่งเท่ากับ 9.71 mV/g และมีระยะเหน้อยที่สุดของมวลตรวจสอบเท่ากับ 0.0223 ไมครอน ซึ่งสัญญาณอัตราเร่งต่ำสุดที่สามารถวัดได้เท่ากับ 4.39 g และมีช่วงเชิงเส้นจนถึง 45.55 g

Thesis Title	Piezoresistive Diamond Thin Film Accelerometer
Student	Mr. Werusak Techakittiroj
Student ID.	41061187
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Associate Professor Somsak Cheersirikul

ABSTRACT

This thesis presents the formation of piezoresistive diamond thin film accelerometer. System of a cantilever and proof mass carved from bulk silicon utilizing anisotropic etch with TMAH solution and has an area of a $6 \times 6 \text{ mm}^2$. The acceleration sensor has a $440 \text{ }\mu\text{m}$ width, $440 \text{ }\mu\text{m}$ length and $10 \text{ }\mu\text{m}$ thick cantilever beam with a 1.238 mg proof mass. The devices has a natural frequency of 45.8 kHz . The device has a sensitivity to acceleration of 9.71 mV/g and the linear detection range from minimum acceleration of 4.39 g to 45.55 g

กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ประกอบขึ้นด้วยความอนุเคราะห์และการช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆ มากมายซึ่งผู้เขียนขอกล่าวคำขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. สมศักดิ์ เข็ยศิริกุล สำหรับแนวคิด คำปรึกษา เทคนิคและวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สำหรับคำแนะนำและคำปรึกษาและขอขอบพระคุณ ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและการแก้ปัญหาต่าง ๆ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณชาญเดช หรุอนันต์ คุณการนต์ แซ่จอก และคุณลัดไท ไทโยธิน นักวิจัยงานวิจัยกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาการ และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณอภิษฎา ฤกษ์รัตน์ นักวิจัยประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการวัดผลการทดลอง คุณเอกกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์ คุณศรีเมษ รัตนชัย ที่ช่วยแนะนำวิธีและขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ และขอขอบพระคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และนักศึกษาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่อนุเคราะห์ทุนในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อและแม่ ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในการศึกษาที่ดีตลอดมา

วีระศักดิ์ เศษะกิตติโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของตัวตรวจจับ.....	1
1.2 วิวัฒนาการของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	3
1.2.1 ทฤษฎีของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบมวลและสปริง.....	2
1.3 วิวัฒนาการของฟิล์มเพชร.....	5
1.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	5
1.3.2 กระบวนการในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	5
1.3.2.1 กระบวนการของก๊าซเฟส.....	5
1.3.2.2 การนิวเคลียชันและการเกิดฟิล์มเพชร.....	6
1.3.3 คุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	10
1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎี	13
2.1 ทฤษฎีตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ	13
2.1.1 โครงสร้างของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	13
2.1.2 พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	14
2.1.2.1 การหาค่าระยะเห (Beam deflection , $y(x)$)ของคาน.....	14
2.1.3 การตอบสนองของตัวตรวจจับอัตราเร่งเมื่อมีแรงกระทำไม่คงที่.....	17
2.1.3.1 การวัดการสั่นภายใต้การหน่วง.....	18
2.1.3.2 การสั่นแบบหน่วงภายใต้แรงบังคับแบบคลื่นไซน์.....	19
2.2 ปรากฏการณ์สภาพต้านทานเพียโซ (Piezoresistive effect).....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1	สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซกับความเค้น.....	20
2.2.2	สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามยาวและตามขวาง.....	21
2.2.3	เพียโซรีซีฟที่ปเกจแฟคเตอร์.....	23
2.2.3.1	วัสดุที่เป็น Isotropic.....	23
2.2.3.2	วัสดุที่เป็น Anisotropic Homogeneous Polycrystalline.....	23
2.2.3.3	วัสดุที่เป็น Random Polycrystalline.....	24
2.3	วงจรวีรชโตนบริดจ์และความไว.....	24
2.4	การกัคชิลิคอนแบบแอนไอโซโทรปิก.....	26
2.4.1	การหาค่าของมวล.....	26
2.4.2	ปฏิกิริยาการกัคชิลิคอน.....	27
2.4.3	อัตราการกัคชิลิคอน.....	28
2.4.3.1	อัตราการกัคชิลิคอนระนาบ (100) ในสารล่าย EPD	28
2.4.3.2	อัตราการกัคชิลิคอนระนาบ (100) ในสารล่าย KOH.....	29
2.4.4	การชดเชยมุม.....	30
2.4.4.1	การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	30
2.4.4.2	การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา.....	30
2.4.4.3	การชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยม.....	31
บทที่ 3	การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	33
3.1	การออกแบบตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	33
3.2	การออกแบบตัวต้านทาน.....	33
3.3	วัสดุและลำดับการสร้าง.....	34
3.3.1	วัสดุ.....	35
3.3.2	ลำดับการสร้าง.....	37
3.3.2.1	การทำความสะอาดและเตรียมแผ่นเบื้องต้น.....	37
3.3.2.2	การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรบนฐานรองซิลิคอน.....	39
3.3.2.3	กระบวนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชร.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	48
4.1 การทดลองการกักซัลไฟคอนด้วยสารละลาย TMAH.....	48
4.1.1 อัตราการกักซัลไฟคอนในสารละลาย TMAH.....	48
4.1.2 อัตราการกักซัลไฟคอนไดออกไซด์ในสารละลาย TMAH.....	50
4.1.3 อัตราการกักคลอมีเนียมในสารละลาย TMAH.....	51
4.1.4 ความสามารถในการชดเชยมุมของการออกแบบมุมชดเชยแบบต่างๆ.....	53
4.2 การวัดและปรับเทียบลักษณะทางไฟฟ้าของตัวตรวจจับอัตราเร่ง	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	62
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	66
ประวัติผู้เขียน	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เทคนิคการตรวจวัดเซ็นเซอร์ทางกล	1
1.2 การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับอัตราเร่ง	4
1.3 เทคนิคและเงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ	8
1.4 คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ	9
1.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ	10
1.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเพชรกับวัสดุอื่น ๆ	11
3.1 เงื่อนไขการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง PECVD	40
3.2 เงื่อนไขการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE	41
3.3 เงื่อนไขการกัดโครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p	41
4.1 อัตราการกัดซิลิคอนในทิศทางต่างๆสำหรับสารละลายทั้ง 3 ชนิด	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบของมวลและสปริง	2
1.2 การจัดของระบบมวลและสปริงเมื่อมีแรงกระทำ	3
1.3 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	6
1.4 กระบวนการเกิดเกรไฟต์และเพชรขณะสังเคราะห์ภายในระบบ	7
2.1 โครงสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบสะพานชนิดฟิล์มเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ	13
2.2 พฤติกรรมของคานเมื่อมีแรง F มากระทำที่ปลายสุดของคาน	14
2.3 คานยื่น	15
2.4 โมเมนต์ในคานยื่น	16
2.5 การตอบสนองของระบบสั้นอิสระภายใต้การหน่วง	18
2.6 ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุที่ประกอบด้วย (ก) แรงดึงตามแนวยาว (ข) แรงดึงตามแนวขวาง	21
2.7 วงจรบริดจ์	25
2.8 ลักษณะของมวลที่ได้จากการกัดซิลิคอนด้วยสารละลายแบบแอนไอโซโทรปิก	27
2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิของสารละลาย EPD ในอัตราส่วน 50 : 8 : 16	28
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิของสารละลาย KOH เข้มข้น 4 โมลาร์	29
2.11 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส	30
2.12 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยม	31
2.13 การชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยม	31
2.14 (ก) การหาค่าของมุมสามเหลี่ยมทั้ง 4 (ข) อัตราการเข้ามุมตามข้อมูลของ Beam	32
3.1 การออกแบบมวลและคาน	33
3.2 การออกแบบตัวต้านทาน	34
3.3 ลำดับกระบวนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ	47
4.1 อัตราการกัดซิลิคอนในสารละลาย TMAH	49
4.2 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิต่างๆ	50
4.3 อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ในสารละลาย TMAH	51
4.4 อัตราการกัดออกซิเจนเมื่อเติมซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH	51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ลักษณะของพื้นผิวอลูมิเนียมเมื่อเติมซัลฟอนลงในสารละลาย TMAH	52
4.6 ค่าของ pH เมื่อเติมผลึกซัลฟอนลงในสารละลาย TMAH	52
4.7 ลักษณะพื้นผิวซัลฟอนเมื่อเติมผลึกซัลฟอนลงในสารละลาย TMAH	53
4.8 การกัดแพทเทิร์นทดสอบด้วยสารละลายชนิดต่างๆเป็นเวลา 120 นาที	54
4.9 ลักษณะของตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างได้	55
4.10 วงจรขยายแรงดันเอาต์พุท	55
4.11 ภาพถ่ายตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างได้กับ ADXL 190 ขณะติดตั้งบนลำโพง	56
4.12 การวิเคราะห์สัญญาณการตอบสนองต่ออัตราเร่ง	57
4.13 ค่ายอดคลื่นสูงสุดของ ADXL 190 เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ต่างๆ ให้กับลำโพง	59
4.14 ค่าอัตราเร่งของ ADXL 190 เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ต่างๆ ให้กับลำโพง	59
4.15 ค่ายอดคลื่นสูงสุดของอุปกรณ์ที่สร้างเมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ต่างๆ ให้กับลำโพง	60
4.16 ค่า $\Delta R/R$ ของอุปกรณ์เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ต่างๆ ให้กับลำโพง	60
4.17 ค่าความไวในการตอบสนองต่ออัตราเร่ง	61

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
σ_l	ความเค้นตามยาว	dyne/cm ²
σ_r	ความเค้นตามขวาง	dyne/cm ²
π_l	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ปตามยาว	cm ² /dyne
π_r	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ปตามขวาง	cm ² /dyne
$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_L$	อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานใน แนวนานาน	---
$\sigma_{(x,y)}$	ตำแหน่งความเค้นบนไดอะแฟรม	---
$\bar{\sigma}_{(x,y)}$	ความเค้นโคเมนชั้นเลต	---
l	ขนาดความยาวของคาน	μm
h	ความหนาของคาน	μm
a	อัตราเร่ง	m/s
\bar{E}	สนามไฟฟ้า	V/m
J	ความหนาแน่นกระแส	A/m ²
ρ_0	พิกัดความต้านทานเริ่มต้น	Ω-cm
$\langle \pi_l \rangle$	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ปตามยาวเฉลี่ย	cm ² /dyne
$\langle \pi_r \rangle$	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ปตามขวางเฉลี่ย	cm ² /dyne
GF_l	เกจแฟคเตอร์ตามยาว	---
GF_r	เกจแฟคเตอร์ตามขวาง	---
$\langle Y \rangle$	ยัง โมดูลัสเฉลี่ย	dyne/cm ²
ε_l	ความเครียด	---
S	ความไวในการตอบสนองต่ออัตราเร่ง	mV/g
ΔV	การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาท์พุทของวงจรรบริดจ์	mV
Δa	การเปลี่ยนแปลงอัตราเร่ง	g
V_i	แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ของวงจรรบริดจ์	V
E_0	แรงดันเอาท์พุทจากวงจรรขยาย	mV
V_0	แรงดันเอาท์พุทจากวงจรรบริดจ์	mV
G	อัตราการขยายแรงดัน	---
a_1	ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางมวลถึงขอบมวล	μm

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a_2	ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางมวลถึงกึ่งกลางของคาน	μm
C_1	ความกว้างของสี่เหลี่ยมที่ฐานของมวล	μm
C_2	ความกว้างของสี่เหลี่ยมที่ยอดคของมวล	μm
M	มวลที่สร้างได้จากการกัศชิลิคอน	kg
ρ_{si}	ค่าความถ่วงจำเพาะของซิลิคอน	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
W	ความกว้างของคาน	μm
w	ความกว้างของมวล	μm

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของตัวตรวจจับ

การรับรู้สิ่งต่าง ๆ ที่อยู่รอบตัวมนุษย์นั้นจะใช้ระบบประสาทสัมผัสทั้ง 5 แต่การรับรู้ของมนุษย์มีขอบเขตที่จำกัด ซึ่งถ้าสิ่งที่ต้องการรับรู้มีขนาดหรือปริมาณที่มากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายได้แต่ถ้าน้อยเกินไปการรับรู้ก็ไม่สามารถรับรู้ได้ ดังนั้นมนุษย์จึงได้ทำการคิดค้นประดิษฐ์อุปกรณ์ต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อใช้ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงแทนการรับรู้จากประสาทสัมผัส โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกเรียกว่า ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น เพียโซรีซิสทีฟทรานสดิวเซอร์ (Piezoresistive Transducer) คาปาซิทีฟทรานสดิวเซอร์ (Capacitive Transducer) เป็นต้น ส่วนการนำทรานสดิวเซอร์เหล่านี้ไปใช้งานนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เทคนิคในการนำทรานสดิวเซอร์มาใช้ในการสร้างตัวตรวจจับต่าง ๆ [1]

ชนิดทรานสดิวเซอร์	ชนิดตัวตรวจจับ
เพียโซรีซิสทีฟ	ความดันและอัตราเร่ง
คาปาซิทีฟ	ความดันและอัตราเร่ง
เพียโซอิเล็กทริก	ความดันและอัตราเร่ง
ออปโตอิเล็กทโรนิกส์	ตำแหน่งและความเร็ว
แมกเนติกส์	ตำแหน่ง ความเร็วและสนามแม่เหล็ก

1.2 วิวัฒนาการของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

อัตราเร่งมีผลต่อการดำรงชีวิตอย่างกว้างขวาง เนื่องจากทุกสิ่งย่อมได้รับผลกระทบจากแรงภายนอกที่มากกระทำเสมอไม่ว่าอัตราเร่งนั้นจะอยู่ในรูปใด วัตถุและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ อาจได้รับความเสียหายได้เมื่อได้รับแรงหรือเคลื่อนที่อยู่ภายใต้อัตราเร่ง ตัวอย่างของอัตราเร่งที่เป็นอันตรายต่อวัตถุและสิ่งมีชีวิต ได้แก่ อัตราเร่งจากแผ่นดินไหว การสั่นของโครงสร้างอาคารหรือการสั่นของเครื่องจักรต่าง ๆ นอกจากนี้อัตราเร่งของ แขน ขา หรืออวัยวะต่าง ๆ ที่ทำงานผิดปกติ ก็มีผลต่อความปลอดภัยของร่างกาย ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งขึ้นเพื่อที่จะใช้ตรวจจับอัตราเร่งทำนายพฤติกรรมของอัตราเร่งเพื่อจะได้ป้องกันล่วงหน้า ตัวตรวจจับอัตราเร่งจึงได้ถูกคิดค้นและสร้างขึ้นมาให้มีขนาดและความสามารถที่ต่าง ๆ กันไปขึ้นอยู่กับบริเวณและลักษณะการใช้

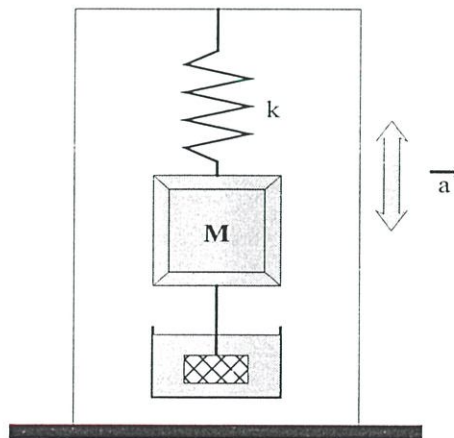
งาน ซึ่งอาจจะมีขนาดใหญ่ เช่น เครื่องวัดการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (Seismograph) หรือขนาดเล็กและเบา เช่น ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิคอน และแบบฟิล์มเพชร ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับเพราะสามารถผนวกโครงสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งเข้ากับเทคนิคการสร้างวงจรรวมจึงทำให้สามารถสร้างชิปที่มีวงจรมวลสัญญาณร่วมกับส่วนที่วัดอัตราเร่งออกมาได้ทำให้ข้อจำกัดทางด้านขนาดของอุปกรณ์และวัสดุที่นำมาสร้างลดลงได้ จึงทำให้ประหยัดเนื่องจากสามารถสร้างชิป เป็นจำนวนมาก ๆ ได้

1.2.1 ทฤษฎีของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบมวลและสปริง

อัตราเร่งนั้นเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ ซึ่งหมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว จากกฎของนิวตันระบุไว้ว่าวัตถุใด ๆ จะคงสภาพเฉื่อยหรือรักษาความเร็วไว้จนกว่าจะถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร่งในทิศทางใด ๆ ดังสมการที่ 1.1

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1.1)$$

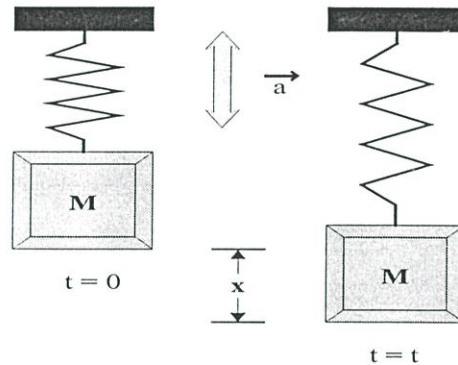
เมื่อแรง F เป็นแรงภายนอกที่มีทิศทางมากระทำมวล (m) และ a เป็นอัตราเร่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรง F และมีทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ F ดังนั้น โครงสร้างของตัวตรวจจับอัตราเร่งพื้นฐานจะเป็นระบบของมวลและสปริงเพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ (1.1) และแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 1.1 โดยมวลผลที่ติดกับสปริงนั้นจะเกิดการขจัดเมื่อระบบ เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่ง a ส่วนวิธีที่จะวัดการขจัดของมวลนั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น วัดจากการขจัดของมวลโดยตรง วัดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อหรือวัดจากคุณสมบัติทางภายในระบบเอง เช่น วัดจากการเปลี่ยนแปลงตัวต้านทานเพียโซ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 ระบบของมวลและสปริง

จากรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบที่สำคัญของตัวตรวจจับอัตราเร่งก็คือ มวล m และสปริง ซึ่งกำหนดให้ค่าคงที่สปริงมีค่าเท่ากับ k และบรรจุอยู่ในกระบอกที่บรรจุของเหลวที่ทำให้เกิด

การหน่วง (Damping Fluid) ที่มีสัมประสิทธิ์การหน่วงเท่ากับ λ เพื่อลดอันตรายที่เกิดจากการกำทอน (Resonant) ของระบบ ในการวัดการขจัด (Displacement) ของมวล m สัมพันธ์กับกล่องที่บรรจุของเหลวที่มีการเคลื่อนที่เป็นการวัดอัตราเร่งนั่นเอง เพื่อให้พิจารณาง่ายขึ้นจะสมมุติในเบื้องต้นว่าสปริงไม่มีมวล มีความไวต่ออัตราเร่งในแนวเดียวกับตัวสปริง และเคลื่อนที่โดยไร้ความฝืด ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การขจัดของระบบมวลและสปริงเมื่อมีแรงกระทำ

จากรูปที่ 1.2 และสมการที่ 1.1 การขจัด $y(t)$ จนเวลา t ใด ๆ จะเขียนเป็นสมการการอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\bar{F} = m\bar{a} = m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + k \times y(t) \quad (1.2)$$

ในสภาวะคงตัว (Steady - State) การยืดออกของสปริงจะมีความสัมพันธ์กับอัตราเร่งดังนี้

$$\frac{y}{a} = \frac{m}{k} \quad (1.3)$$

จากสมการที่ 1.3 จะบอกถึงความไวของตัวตรวจจับอัตราเร่ง y/a ซึ่งจะแปรผันกับ m/k ซึ่งอัตราส่วน m/k นี้จะเป็นค่าความถี่กำทอนธรรมชาติ (Natural Resonant Frequency : f) ของระบบเมื่อไม่มีการหน่วง ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้

$$f_r = 2\pi \left(\frac{m}{k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

จากสมการที่ 1.4 จะเห็นได้ว่าถ้าเราต้องการความไวสูงขึ้นก็จะทำให้การตอบสนองต่อความถี่ของระบบต่ำลง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการหน่วงก็มีผลที่จะทำให้การตอบสนองต่อความถี่เปลี่ยนไปเช่นกัน โดยเราจะกำหนดไว้ว่าการตอบสนองความถี่ η ความถี่กำทอนควรจะให้มีการหน่วงมีค่าดังนี้

$$\lambda \geq 2(km)^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

ส่วนในการจัดการขจัดของมวลนี้สามารถทำให้ 2 วิธีหลัก คือ การวัดการขจัดโดยตรงและการวัดการขจัดโดยอ้อม ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งด้วยฟิล์มเพชรและสร้างให้มีขนาดเล็กเพียง $6 \times 6 \text{ mm}^2$ จึงทำให้ไม่สามารถวัดการขจัดโดยตรงได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างคานยื่นขณะที่มีการเห (Deflection) แทน โดยวิธีการวัดการเหของโครงสร้างคานยื่นขณะที่เคลื่อนที่ภายใต้อัตราเร่งนั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น วิธีตัวต้านทานเพียโซ วิธีวัดค่าเก็บประจุ และวิธีเพียโซอิเล็กทริก เป็นต้น

จากที่กล่าวมาตัวตรวจจับอัตราเร่งนั้น นอกจากจะได้รับความนิยมนสูง แล้วยังมีความเชื่อถือได้และมีความแม่นยำ ทำให้มีมูลค่าทางการตลาดที่สูง ดังจะพบได้ว่ามีการนำตัวตรวจจับอัตราเร่งไปใช้ประโยชน์เป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์ การขนส่ง การศึกษา การพาณิชย์ และการบันเทิง ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.2 การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับอัตราเร่ง [2]

งานที่เกี่ยวข้อง	การประยุกต์ใช้
ขนส่ง	- การควบคุมถุงลมนิรภัย - การควบคุมระบบเบรก ABS
อากาศยาน	- การควบคุมการขับเคลื่อน - การนำร่อง
การแพทย์	- การศึกษาการเคลื่อนไหวของผนังหัวใจก่อนหัวใจวาย - การวัดสภาวะเคลื่อนไหวของร่างกาย ของผู้ป่วยที่เป็นโรคเคลื่อนไหวไม่เป็นปกติ เช่น Parkinson disease
การบันเทิง	- ระบบการป้องกันการกระตุก(anti-jitter)ในกล้องถ่ายวิดีโอ - โรงภาพยนตร์สมจริง (simulation theater)
การศึกษา	- ปากกาจำลองเซ็นได้
อื่นๆ	- การวัดการสั่น - ระบบหุ่นยนต์

1.3 วิวัฒนาการของฟิล์มเพชร

ในปี 1797 Smithson Tennant แสดงให้เห็นว่าเพชรเป็นองค์ประกอบหนึ่งของคาร์บอน โดยทำการเผาเพชรในบรรยากาศออกซิเจนซึ่งจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเถ้าถ่าน แต่ไม่สามารถสังเคราะห์ได้จนกระทั่งประมาณ 1954 ที่ General Electric Research Laboratories Bundy ได้ทำการสังเคราะห์เพชรได้สำเร็จเป็นครั้งแรก ซึ่งเพชรที่สร้างได้มีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง เช่น จำเป็นต้องสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงๆ เป็นต้น การสังเคราะห์เพชรได้มีการพัฒนามาเลย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย โดยในปี 1968 ได้มีการสังเคราะห์เพชรด้วยการใช้วิธี CVD (Chemical Vapor Deposit) ขึ้นและยังสามารถสังเคราะห์ได้บนวัสดุอื่น ๆ อีกด้วย ซึ่งการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการนี้ได้เป็นเทคนิคที่สำคัญในการพัฒนาการสังเคราะห์เพชรเลยมาจนปัจจุบัน

1.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ปัจจุบันการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถกระทำได้ที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ โดยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้นจะใช้วิธี CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นที่นิยมและมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันในเทอมของค่าใช้จ่าย อัตราการเกิดของฟิล์ม และพื้นที่ของการเกิดฟิล์ม เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ลักษณะรูปร่างของฟิล์ม และคุณลักษณะสเปกตรัมของ Raman จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งหมด ซึ่งการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD นั้นสามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิด เช่น ชนิดไส้หลอด ความร้อน (Hot-Filament CVD) ชนิดพลาสมา (Plasma CVD) ชนิดพลาสมาทอร์ช (Plasma Torch CVD) และชนิดคอมบัสชัน (Combustion CVD) โดยความแตกต่างของกระบวนการสังเคราะห์และคุณสมบัติสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1.3 และ 1.4 (อยู่ตอนท้ายของหัวข้อ 1.3.2)

1.3.2 กระบวนการในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรไม่ว่าจะใช้วิธีการใดจะมีกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมือนกันทั้งหมดซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

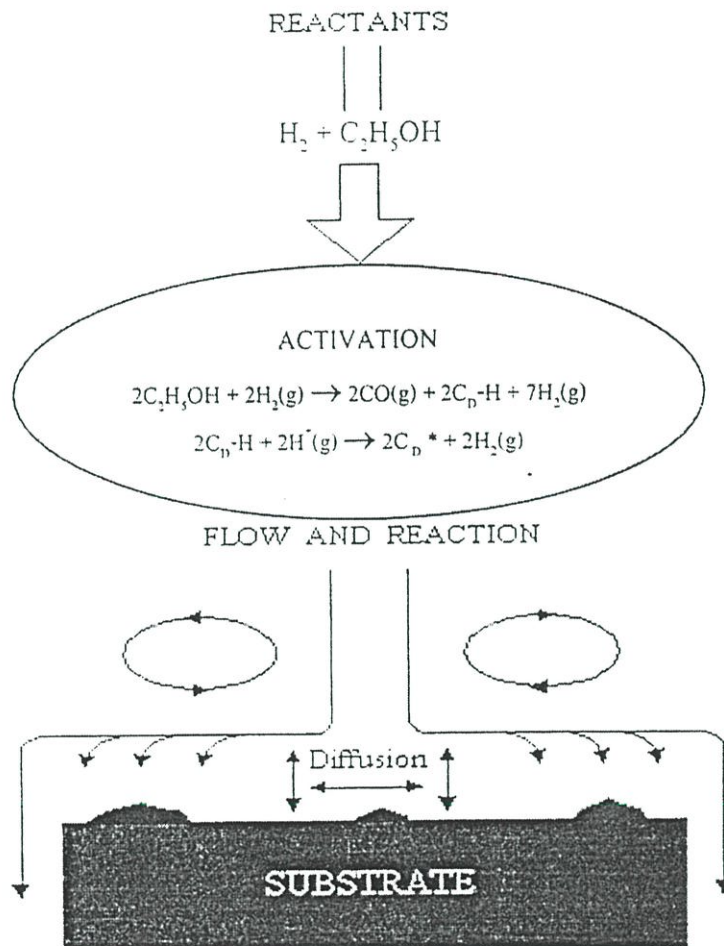
1.3.2.1 กระบวนการของก๊าซเฟส

หลักการพื้นฐานของกระบวนการก๊าซเฟสมีจุดประสงค์เพื่อทำการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานที่มีค่าสูง ซึ่งการกระตุ้นมีจุดประสงค์ที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ

1. กระตุ้นให้ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการซึ่งมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นอนุภาคมูลอิสระ
2. กระตุ้นให้ก๊าซไฮโดรเจนแตกตัวเป็นประจุบวก ซึ่งจะทำให้เกิดรวมตัวภายในระบบเพื่อทำให้พร้อมที่จะเกิดการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้น

จากที่กล่าวมาสามารถแสดงให้เห็นกระบวนการของก๊าซเฟสได้ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งเมื่อให้พลังงานแก่ระบบก๊าซไฮโดรเจนจะแตกตัวเป็นอิออนบวก และจะเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ขึ้น โดย

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่าน โดยการไหล การแพร่ และการพาไปยังฐานรองจนในที่สุดบริเวณใกล้กับฐานรองการแพร่จะเข้าสู่บริเวณที่มีการไหลหยุดนิ่ง ซึ่งเรียกว่า “Boundary Layer” โดยบริเวณพื้นผิวของฐานรองนี้จะมีปฏิกิริยาต่าง ๆ เกิดขึ้น ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยจะเป็นปัจจัยหลักในการเกิดนิวคลีเอชัน การปลูกผลึก และความสมบูรณ์ของผลึก ซึ่งทั้งนี้จะต้องควบคุมเงื่อนไขตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสมตามตารางที่ 1.3 และ 1.4 (อยู่ตอนท้ายของหัวข้อ 1.3.2) เพื่อให้ได้การเกิดก๊าซเฟสของเพชร

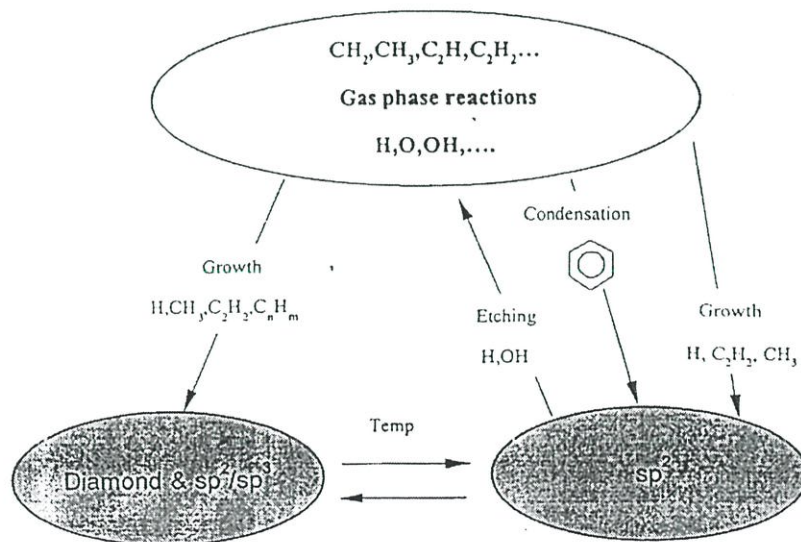


รูปที่ 1.3 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร [3]

1.3.2.2 การนิวคลีเอชันและการเกิดฟิล์มเพชร

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้น คาร์บอนสามารถมีพันธะได้หลายรูปขึ้นอยู่กับว่า Hybridization เป็นแบบ sp sp^2 (กราไฟต์) sp^3 (เพชร) โดยปฏิกิริยาสามารถเกิดการเปลี่ยนพันธะไปมาได้ระหว่าง sp^2 กับ sp^3 ได้ การกำหนดคุณภาพของฟิล์มเพชรและอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรจะขึ้นอยู่กับปัจจัยในการสังเคราะห์เพื่อให้การเปลี่ยนไปมาระหว่างพันธะหยุดอยู่ที่องค์ประกอบ

ของเพชรเท่านั้น ดังนั้นปัจจัยต่าง ๆ ต้องเหมาะสมต่อการเกิดนิวคลีโอชัน โดยกระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อจากกระบวนการของก๊าซเฟส ซึ่งเป็นกระบวนการการก่อตัวของฟิล์มเพชร โดยจะเริ่มขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองเมื่ออะตอมของคาร์บอนที่เกิดจากกระบวนการก๊าซเฟสแพร่ไปสู่พื้นผิวของฐานรองจะก่อตัวเป็นพันธะ sp จนการแพร่จะต่อมของคาร์บอนเข้าสู่สถานะสมดุลอะตอมของคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับฐานรองทำให้เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ที่เรียกว่า "Intermediate Layer" ซึ่งถ้าอะตอมของคาร์บอนมากเกินไปจะเกิดฟิล์มเพชรขึ้น โดยการเปลี่ยนจากพันธะ sp^2 ไปเป็น sp^3 ได้โดยใช้ประจุบวกของไฮโดรเจนเป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทำให้ได้ฟิล์มเพชรเกิดขึ้นและการนิวคลีโอชันจะหยุดลง ซึ่งที่ผิวของฐานรองจะถูกปกคลุมไปด้วยผลึกของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะหลายรูปต่อไปโดยรูปร่างและขนาดของผลึกฟิล์มเพชรจะถูกจำกัดด้วยขนาดของผลึกข้างเคียง ซึ่งกระบวนการเกิดแกรไฟต์และเพชรแสดงได้ดังรูปที่ 1.4 ส่วนการเกิดลักษณะรูปแบบผลึกไม่ว่าจะเป็นแบบระนาบ {100} {111} หรือแบบผสมระหว่าง {100} กับ {111} จะขึ้นอยู่กับปัจจัยของอุณหภูมิความดัน และปริมาณของอะตอมคาร์บอนและไอออนบวกของไฮโดรเจนที่อ้อมตัว ซึ่งเป็นองค์ประกอบของการเกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดผลึกของฟิล์มเพชร ดังนั้นในการสังเคราะห์ฟิล์มสังเคราะห์ฟิล์มเพชรการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ จะมีผลต่อการเกิดคุณลักษณะต่างๆของฟิล์มเพชร



รูปที่ 1.4 กระบวนการเกิดแกรไฟต์และเพชรขณะสังเคราะห์ภายในระบบ

ตารางที่ 1.3 เทคนิคและเงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ [4]

รูปแบบพลังงาน	ประเภท	เงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้ก๊าซมีเทน (CH ₄)				
		อุณหภูมิฐานรอง (องศาเซลเซียส)	ความดัน (ทอร์)	อัตราไหลก๊าซไฮโดรเจน (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณคาร์บอน:ไฮโดรเจน	ก๊าซเฉื่อย (ลิตรต่อนาที)
Hot filament	W , Rh, Pt ,Ta	<1000	10 – 100	0.1 – 1	<1%	
Plasma	DC	<1000	10 – 50	0.1 – 1	<1%	
	RF	<1000	1 – 10	0.1 – 1		
	Microwave	<1000	100	0.1 – 1		
	ECR	400 – 600	<10	0.1 – 1		
Plasma Torch	DC arc jet					>10
	RF	≅1000	500 – 760	1 – 5	5 – 15%	
	Microwave					
combustion	C ₂ H ₂ + O ₂	≅1300	760	O ₂ 5 (ลิตรต่อนาที)	C/O 97%	1 - 2

ตารางที่ 1.4 คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ [4]

รูปแบบพลังงาน	ประเภท	คุณสมบัติจากการสร้างด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ						
		อัตราการเกิด (ไมครอน/ชั่วโมง)	ขนาดของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ (เซนติเมตร)	คุณภาพของฟิล์ม (วิเคราะห์ด้วยรามาน)	ความสม่ำเสมอ (Uniformity)	ลักษณะความหนาฟิล์ม	การทำลายพื้นผิวฟิล์ม	แหล่งกำเนิดพลังงาน
Hot Filament	W , Rh , Pt , Ta	1 - 5	≥ 10	ดีถึงดีมาก	ดี	ได้ฟิล์มบางถึงหนา	อุณหภูมิ	Filament
Plasma	DC	< 1	≥ 10	ต่ำ	ดี	ได้ฟิล์มบางถึงหนา	อิเล็กตรอนและไอออน	Electrode, Walls
	RF	1	1 - 2	ดี	พอใช้			
	Microwave	1 - 5	2 - 5	ดีถึงดีมาก	พอใช้			
	ECR		ไม่ปรากฏ	ต่ำ	ไม่ปรากฏ			
Plasma Touch	DC arc	60	1 - 2	ดีมาก	พอใช้	ได้ฟิล์มหนา	อิเล็กตรอนและไอออน	Electrode, Walls
	RF		1 - 2	ดี	ต่ำ			
	Microwave		1 - 2	ดี	ต่ำ			
Combustion	$C_2H_2 + O_2$	20	1 - 2	ดีถึงดีมาก	พอใช้	ได้ฟิล์มหนา	อุณหภูมิ	Nozzle, ambient

1.3.3 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชร

เพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เด่นกว่าวัสดุอื่นๆอยู่หลายอย่างเช่น มีความแข็งที่สุด ทนต่อการกัดกร่อนและสามารถนำความร้อนไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น คุณสมบัติต่าง ๆ นี้ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกล ทางความร้อนทางแสงและทางเคมี ได้ถูกรวบรวมอยู่ภายในตัวของเพชรเองซึ่งไม่พบอยู่ในวัสดุอื่น ๆ ทั่วไป นอกจากนี้เพชรได้ถูกจัดให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งเนื่องจากเพชรเป็นองค์ประกอบหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 4 เช่นเดียวกับซิลิคอนและเยอรมันเนียม ดังนั้นด้วยเหตุนี้เพชรจึงถูกจัดให้เป็นสารกึ่งตัวนำโดยมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ดังตารางที่ 1.5 และตารางที่ 1.6

ตารางที่ 1.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ [4]

คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิคอน	แกเลียมอาร์เซไนด์	เยอรมันเนียม
Thermal conductivity (W/cm-k)	20	1.5	0.455	0.28
Electron mobility (cm ² /V-s)	2,000	1,500	8,800	3,900
Hole mobility (cm ² /V-s)	1,800	600	400	1,900
Electron saturated velocity (cm/s)	2.7x10 ⁷	1x10 ⁷	1.2x10 ⁷	5x10 ⁶
Hole saturated velocity (cm/s)	1.05x10 ⁷	9x10 ⁶	1x10 ⁷	4x10 ⁶
Density of states effective mass				
Electron	0.57	1.1	0.068	0.55
Hole	1.2	0.8	0.5	0.37
Effective density of states				
Conduction band (cm ⁻³)	1x10 ¹⁹	2.8x10 ¹⁹	4.7x10 ¹⁷	1.04x10 ¹⁹
Valence band (cm ⁻³)	3x10 ¹⁹	1x10 ¹⁹	7x10 ¹⁸	6.0x10 ¹⁸
Breakdown field (V/cm)	10 ⁷	5x10 ⁶	3x10 ⁵	10 ⁴
Resistivity (Ω.cm)	10 ¹⁶	10 ³	10 ⁸	10
Dielectric constant (ε)	5.7	11	12.5	15.8
Energy gap (eV)	5.45	1.1	1.42	0.72

ตารางที่ 1.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเพชรกับวัสดุอื่น ๆ [4]

Matrrial	Yield Strength (10^{-10} dynes/cm ²)	Knoop Hardness (kg/mm ²)	Young's Modulus (10^{12} dynes/cm ²)	Density (gm/cm ³)
Diamond*	53	7000	10.35	3.5
SiC*	21	2480	7.0	3.2
TiC*	20	2470	4.97	4.9
Al ₂ O ₃	15.4	2100	5.3	4.0
Si ₃ N ₄ *	14	3486	3.85	3.1
Iron	12.6	400	1.96	7.8
SiO ₂	8.4	820	0.73	2.5
Si*	7.0	850	1.9	2.3
Steel	4.2	1500	2.1	7.9
W	4.0	485	4.1	19.3
Stainless Steel	2.1	660	2.0	7.9
Mo	2.1	275	3.43	10.3
Al	0.17	130	0.70	2.7

* Single Crystal

จากตารางที่ 1.6 จะพบว่าเพชรเป็นวัสดุที่คัดต่อการนำมาใช้งานทางด้านกลศาสตร์ ดังนั้นจึงมีความนิยมกันมากในการที่จะนำฟิล์มเพชรมาใช้งานในการสร้างอุปกรณ์จำพวก ไมโครแมคคานิก (Micromchanics) และ เซนเซอร์

1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและวิจัย โดยการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมาสร้างเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มเพชร เพื่อทำการศึกษากระบวนการสร้างต่าง ๆ รวมทั้งศึกษาความไวในการตอบสนองต่ออัตราเร่งของกานที่เป็นฟิล์มเพชร โดยทำการออกแบบและสร้างตัวตรวจจับด้วยการสร้างตัวต้านทานเพชรชนิดเอ็กทรินซิกชนิด p บนกานที่เป็นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก ซึ่งตัวต้านทานเพชรบนกานนี้จะถูกต่อเข้ากับตัวต้านทานภายนอกเพื่อให้เป็นวงจรบริดจ์ และเมื่อให้อัตราเร่งจากภายนอกกับตัวตรวจจับจะทำให้กานเกิดการแอ่นและสั้น ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวต้านทานซึ่งจะแปรผันตามความยาวและจะทำงานวงจรบริดจ์ไปส่งสัญญาณไปยังวงจรรับแรงดึง

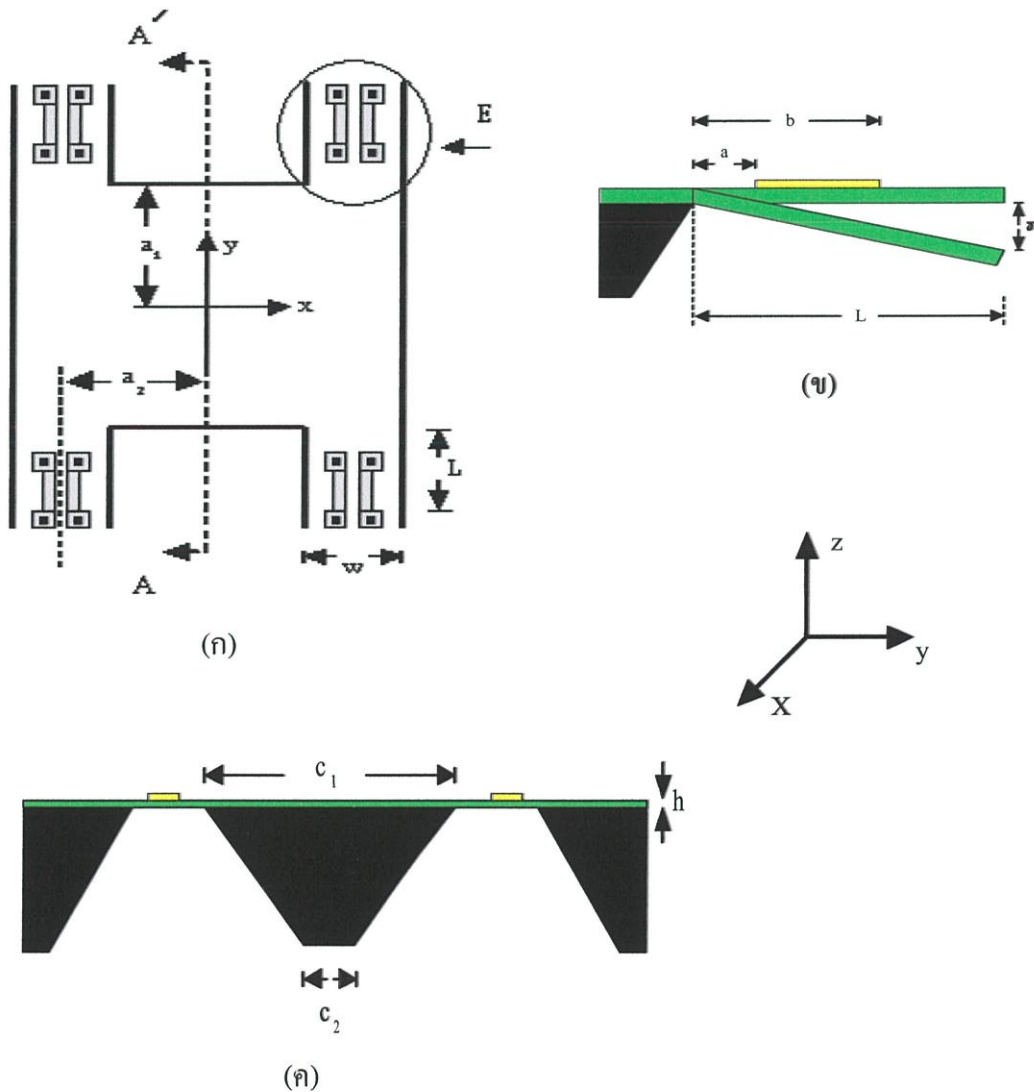
ไฟฟ้าเอาต์พุทของวงจรบริดจ์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราเร่งที่ป้อนให้และจะทำการสรุปความไวสูงสุดและต่ำสุดต่อการตรวจจับอัตราเร่ง

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ

2.1.1 โครงสร้างของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดขนาดความกว้าง ยาว หนาของคานและมวลโดยใช้สัญลักษณ์ตามรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบสะพานชนิดฟิล์มเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ

(ก) ด้านบน (ข) พิจารณาเฉพาะบริเวณขอบคานด้านข้างที่บริเวณ E

(ค) ด้านข้างแนว AA'

2.1.2 พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

การหาค่าทางกลศาสตร์ของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบสะพานนั้นค่อนข้างจะยุ่งยากดังนั้นจึงทำการหาค่าโครงสร้างแบบคานเดี่ยว ซึ่งเป็นพื้นฐานเพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการพิจารณาก่อนจะทำการนำเสนอการหาค่าของโครงสร้างแบบสะพาน โดยการหาค่าของโครงสร้างแบบคานเดี่ยวสามารถพิจารณาได้ดังนี้

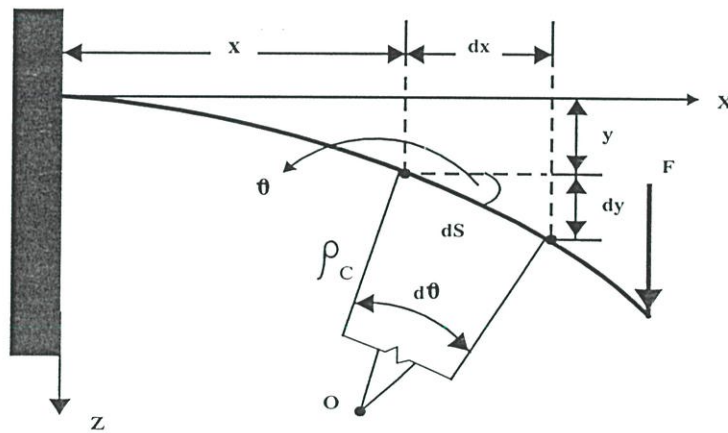
2.1.2.1 การหาค่าระยะเห (Beam deflection, $y(x)$) ของคาน [5, 6]

การหาค่าระยะเหของคานนั้นมีความจำเป็นมากเพราะเป็นการหาค่าการเปลี่ยนไปของคานเมื่อมีแรงกระทำกับคาน โดยสมมติให้คานอยู่ภายใต้แรงกระทำ (F) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะทำให้คานเกิดการแอ่นโค้ง (Deflection curve, y) ซึ่งเราสามารถหาค่าความโค้ง (K) ที่จุดใด ๆ ในคานได้ดังนี้

$$K = \frac{1}{\rho_c} = \frac{d\theta}{dS} = \frac{d^2z}{dx^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ_c เป็นรัศมีมีความโค้ง

θ เป็นมุมที่เกิดจากการหมุนของเส้นแอ่น



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมของคานเมื่อมีแรง F มากระทำที่ปลายสุดของคาน

ซึ่งสมการที่ 2.1 นี้ จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อคานมีระยะเหสั้น ๆ (ในวิชานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะการเหที่มีค่าน้อย ๆ เท่านั้น) ดังนั้นเส้นแอ่น (Deflection Curve) จะมีความโค้งน้อย ซึ่งค่ามุมและความลาดของเส้นโค้งก็จะน้อยลงด้วยเพราะฉะนั้นสามารถประมาณได้ว่า

$$dS \cong dx \quad (2.2)$$

$$\theta = \tan \theta \cong \frac{dz}{dx} \quad (2.3)$$

จากกฎของฮุก (Hooks law) ความโค้งที่ทุกๆ จุดบนคานจะเป็นความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กันกับ โมเมนต์คัต (Bending Moment , M) ดังนั้น จะได้

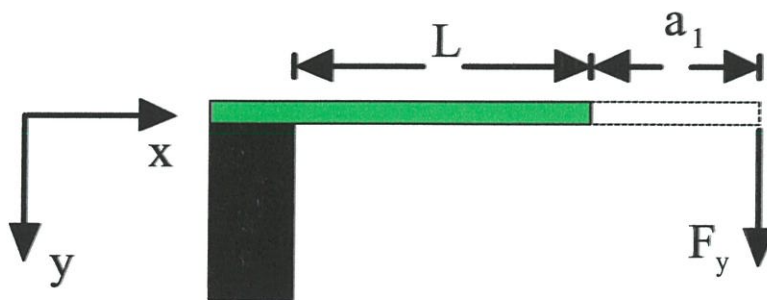
$$K = \frac{-M}{EI_y} = \frac{d^2z}{dx^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ E เป็นค่ายังมอดูลัส (Young's modulus) สำหรับฟิล์มเพชรที่เป็น Polycrystallines ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.43×10^{12} dynes/cm²

I เป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรอบแกน ๆ ซึ่งจะถูกระบุโดยรูปร่างภาคตัดขวางของคาน สำหรับคานที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้าง W จะได้

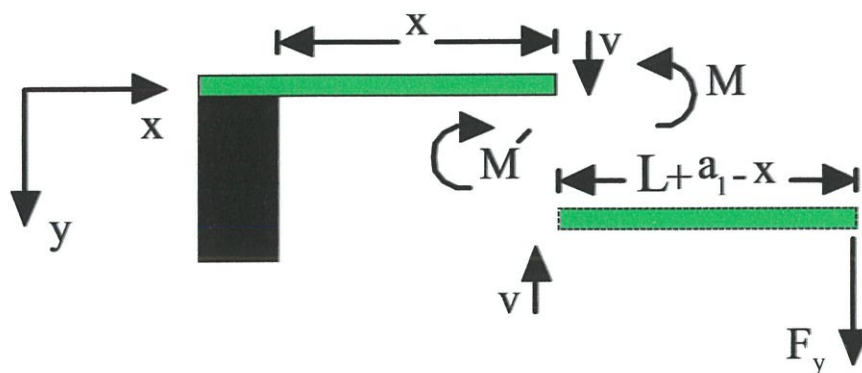
$$I_y = \frac{W_b h^3}{12} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าถ้าเราสามารถหาค่า M ได้ก็จะสามารถหาค่าระยะเหได้ ดังนั้นการหาค่าโมเมนต์คัตสามารถพิจารณาได้รูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 คานยื่น

จากรูปที่ 2.3 กำหนดให้คานยาว L และมีแรง F มากระทำกับคาน โดยสมมติให้จุดศูนย์กลางมวลอยู่ที่ระยะ L+a บนแกน x เท่านั้น เมื่อพิจารณารอยตัดของคานจนตำแหน่ง x ใดๆ จะเกิดโมเมนต์รวม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โมเมนต์ในคานยื่น

พิจารณารอยตัดด้านขวามือ

$$M' = -F_y(L + a_1 - x) \quad (2.6)$$

สมการความโค้งของคานยื่นเนื่องจากโมเมนต์ $M(x)$ ณ ตำแหน่ง x ใดๆ

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{F_y(L + a_1 - x)}{EI_y} \quad (2.7)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{F_y}{EI_y} \left[(L + a_1)x - \frac{x^2}{2} \right] + A \quad (2.8)$$

ใช้เงื่อนไขขอบ $\frac{dy}{dx} = 0$ ที่ $x=0$ จะได้ $A=0$

$$y = \frac{F_y}{EI_y} \left[(L + a_1)\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right] + B \quad (2.9)$$

ใช้เงื่อนไขขอบเขต $y(0) = 0$ ดังนั้น $B = 0$ จะได้

$$y = \frac{F_y}{2EI_y} \left[(L + a_1)x^2 - \frac{x^3}{3} \right] \quad (2.10)$$

สำหรับการหาค่าระยะเหของโครงสร้างแบบสะพาน สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.1 ดังนั้นจะได้

$$M' = \frac{-FL}{2} + Fx \quad (2.11)$$

$$EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} = - \left[- \frac{(FL)}{2} + Fx \right] \quad (2.12)$$

$$EI_z \frac{dy}{dx} = \frac{FL}{2} x - \frac{Fx^2}{2} + C_1 \quad (2.13)$$

$$EI_z y = \frac{FL}{4} x^2 - \frac{Fx^3}{6} + C_1 x + C_0 \quad (2.14)$$

ใช้เงื่อนไขขอบเขต

$$y(x) = \frac{F}{EI_y} \left(\frac{3Lx^2 - 2x^3}{12} \right) \quad (2.15)$$

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีแรงกระทำ F มากกระทำกับมวลจะเกิดการกระจายแรงไปที่คานทั้ง 4 ดังนั้นจะได้

$$F = \frac{1}{4} F_z \quad (2.16)$$

แทนค่า ลงในสมการที่ 2.14 จะได้

$$y(x) = \frac{F_z}{4EI_y} \left(\frac{3Lx^2 - 2x^3}{12} \right) \quad (2.17)$$

2.1.3 การตอบสนองของตัวตรวจจับอัตราเร่งเมื่อมีแรงกระทำไม่คงที่

จากหัวข้อที่กล่าวมาในตอนต้นนั้นจะเป็นพฤติกรรมของตัวตรวจจับอัตราเร่งภายใต้สถานะที่แรงกระทำมีค่าคงที่ตลอด แต่ในหัวข้อต่อไปนี้จะพิจารณาเมื่อมีแรงกระทำที่ไม่คงที่มี การเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น การห้ามล้อรถอย่างกะทันหันหรือการวัดการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจสอบสภาพของท้องถนน ซึ่งตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคานภายใต้อัตราเร่งไม่คงที่ คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง ζ โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ การหน่วงมีหลักการว่า ถ้าให้แรงที่ทราบพฤติกรรมที่แน่นอน เช่น สัญญาณไซน์ สัญญาณฟันเลื่อยหรือสัญญาณพัลส์แก่ระบบและทำการวัดการตอบสนอง เช่น การขจัด ความถี่กำทอนหรือมุมวิถีภาคที่เลื่อนออกไปซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการวัดการขจัดเมื่อให้แรงที่ทราบพฤติกรรมที่แน่นอนแก่ระบบดังจะจำแนกได้ดังนี้

2.1.3.1 การวัดการสั่นภายใต้การหน่วง

เมื่อคิ่งสปริงออกจากจุดสมดุลหยุดนิ่งและปล่อยแรงนี้ออกไประบบจะเกิดการตอบสนองขึ้นแต่จะมีแอมพลิจูดลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งลักษณะการตอบสนองที่มีการหน่วงนี้จะมีสมการทั่วไปของการขจัดดังนี้

$$y_M(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[y_M(0) \cos \omega_D t + \left(\frac{\dot{y}_M(0) + \zeta\omega_n y_M(0)}{\omega_D} \right) \right] \quad (2.18)$$

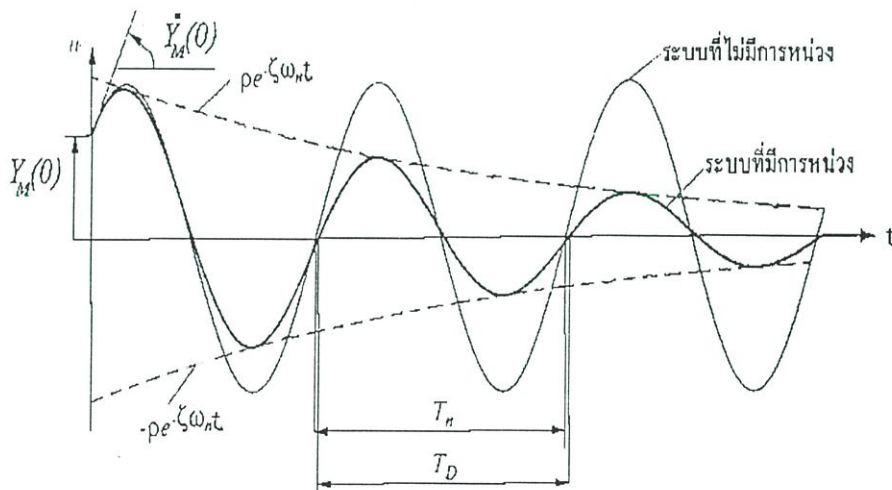
เมื่อ ω_D เป็นความถี่ของระบบภายใต้การหน่วง โดยมีค่า ดังนี้

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.19)$$

เมื่อ T เป็นคาบของการหน่วง โดยมีค่า

$$T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.20)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.17 , 2.18 , และ 2.19 มาพล็อตกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การตอบสนองของระบบสั่นอิสระภายใต้การหน่วง

ค่าตัวแปรที่อ่านได้จากกราฟ นั้นได้แก่

1. $\dot{y}_M(0)/dt$ สร้างได้จากการลากเส้นสัมผัสกราฟ ณ เวลา $t = 0$

2. เมื่อพิจารณาการหาค่าเฉลี่ย (Envelop) ตามสมการที่ 2.17 อัตราส่วนของแอมพลิจูดของคลื่นลูกที่ n ต่อคลื่นลูกที่ $n+1$ ซึ่งห่างกันเท่ากับ T จะเป็นดังนี้

$$\frac{y_M(n)}{y_M(n+1)} = \exp\left[\frac{2\pi\xi}{\sqrt{1+\xi^2}}\right] \quad (2.21)$$

เมื่อใส่ลอการิทึมฐานธรรมชาติในสมการที่ 2.21 ซึ่งนิยามให้เป็นส่วนลดลอการิทึม (Logarithm decrement, δ) ซึ่งจะทำให้ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\delta = \ln \frac{y_M(n)}{y_M(n+1)} = \left[\frac{2\pi\xi}{\sqrt{1+\xi^2}} \right] \quad (2.22)$$

2.1.3.2 การสั่นแบบหน่วงภายใต้แรงบังคับแบบคลื่นไซน์

ถ้าให้แรง $F(t) = F_0 \sin(\omega t - \phi)$ กระทำกับตัวตรวจจับอัตราเร่ง ดังนั้นจะได้การขจัดของระบบ $y_M(t)$ มีสมการทั่วไป ดังนี้

$$y_m(t) = \frac{F_0}{k} R_d \sin(\omega t - \phi) \quad (2.23)$$

เรียก R ว่าตัวคูณการขจัด (Displacement response factor) โดย

$$R_d = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

และ ϕ เป็นวัฏภาคล่าช้า (Phase lag) โดยมีสมการดังนี้

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right] \quad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.22 2.23 และ 2.24 ถ้าค่า $\omega/\omega_n \ll 1$ ระยะการขจัดของสปริงมีค่าใกล้เคียงกับระยะขจัดของแรงภายนอกมุมวัฏภาคมีค่าประมาณศูนย์นั่นคือ สัญญาณกระตุ้นและการตอบสนองจะมีมุมวัฏภาคเดียวกันหรือใกล้เคียงกันมากส่วน $\omega/\omega_n \gg 1$ แอมพลิจูดจะมีค่าลดลงอย่างมากจนเข้าใกล้ค่าคงที่นั่นคือ ไม่ว่าจะให้แรงเป็นเท่าใดการตอบสนองจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากสัญญาณอัตราเร่งของสปริงและสัญญาณกระตุ้นที่มีมุมวัฏภาคกลับกับอยู่ 180 องศา ทำให้มี

การหักล้างสัญญาณกันตลอดเวลาดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่าตัวตรวจจับอัตราเร่งไม่ใช่อุปกรณ์วัดสัญญาณที่ความถี่สูง ส่วนการหาค่าอัตราเร่งนั้นสามารถหาได้จากการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 2.23 2 ครั้งซึ่งจะได้คำตอบทั่วไปดังสมการต่อไปนี้

$$\ddot{y}_m(t) = \left[-\frac{1}{\omega^2} \right] \frac{F_0}{k} R_d \sin(\omega t - \phi) \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.25 พบว่าอัตราเร่งนั้นสามารถอ่านค่าได้โดยตรวจจากการจัดของมวล M_0 ซึ่งต้องคูณด้วยค่า R_d / ω^2 นั้นเองแต่สัญญาณที่ได้จะมีมุมเลื่อนออกไปเท่ากับ ϕ และมีเวลาในการตอบสนองช้าลงเท่ากับ ϕ / ω (ค่า R_d และ ϕ จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่บังคับระบบแต่ค่า ω^2 นั้นคงที่และไม่ขึ้นกับการเคลื่อนของระบบแต่อย่างใด)

2.2 ปรากฏการณ์สภาพต้านทานเพียโซ (Piezoresistive effect)

2.2.1 สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซกับความเค้น

สมมุติตัวต้านทานตัวหนึ่งมีสภาพต้านทานเริ่มต้นเท่ากับ ρ_0 มีความยาว L กว้าง d และหนา t มีกระแสไหลผ่านเท่ากับ I และมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ V ดังนั้นจะทำให้ความต้านทาน R มีค่าดังนี้

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho_0 L}{td} \quad (2.27)$$

ถ้าให้แรงที่มีค่าสม่ำเสมอ จะทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$dR = d\left(\frac{\rho L}{td}\right) \quad (2.28)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{\delta\rho}{\rho} + \left(\frac{\delta L}{L} - \frac{\delta t}{t} - \frac{\delta d}{d}\right) \quad (2.29)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{\delta\rho}{\rho} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 \quad (2.30)$$

เมื่อ ε_1 , ε_2 และ ε_3 เป็นความเครียดและตัวต้านทาน R นี้สามารถวางตัวไปในทิศทางใด ๆ ก็ได้บนแผ่นผลึก จากสมการที่ 2.27 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานนอกจากจะเกิดจากปรากฏการณ์ Piezoresistive แล้วยังเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากขนาดของมันเปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่เทอมที่สำคัญที่สุดคือ $\delta\rho / \rho$ นั้นเอง

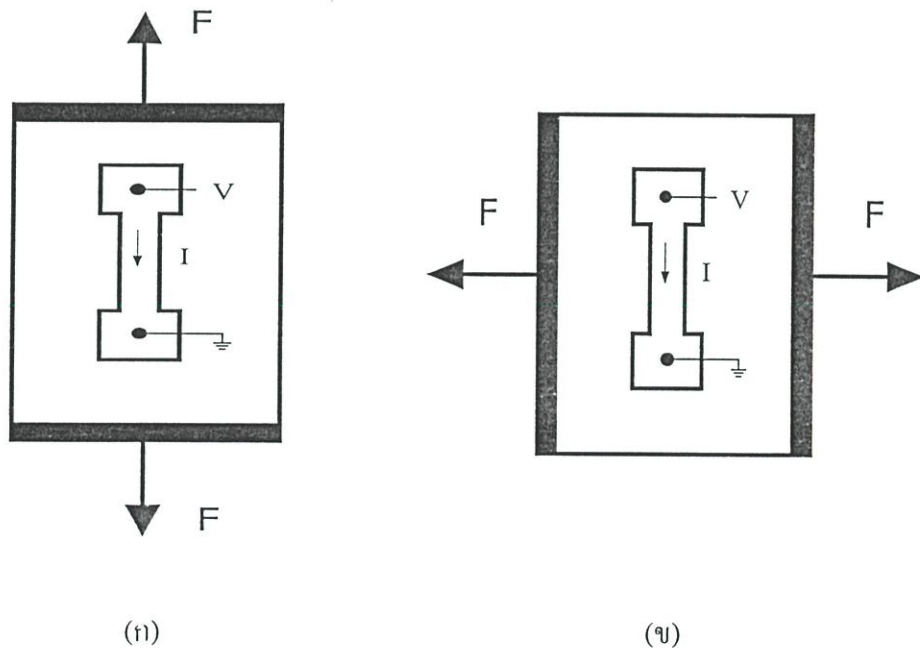
จากกฎของฮุก (Hook's Law) กล่าวไว้ว่า ในวัสดุหลาย ๆ ชนิดที่มีขนาดจำกัด อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่ตามกฎของฮุก (Hook's Law) นี้เรียกว่าดัชนีการยืดหดตัวของวัสดุหรือโมดูลัสของวัสดุ (Modulus of elastic of material) ดังสมการที่ 2.31

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.31)$$

ค่าของยังโมดูลัสในแต่ละวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากัน และแตกต่างกันไปดังแสดงใน ตารางที่ 1.6 และสำหรับฟิล์มเพชรที่เช่นเดียวกันจากการศึกษาและวิจัยพบว่า ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งเป็นผลึกแบบหลายรูปจะมีค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยเท่ากับ 11.43×10^{12} dyne/cm² [9]

2.2.2 สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามยาวและตามขวาง [7]

สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามยาวและตามขวางที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัตถุ ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงสภาพความต้านทานในวัสดุ โดยจะขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ โดยสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามยาว (π_{\parallel}) จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงตามยาวมากระทำกับวัสดุ ดังรูปที่ 2.6(ก) ส่วนสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามขวาง (π_{\perp}) จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงตามขวางมากระทำกับวัสดุ ดังรูปที่ 2.6(ข)



รูปที่ 2.6 ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุที่ประกอบด้วย (ก) แรงดึงตามแนวยาว
(ข) แรงดึงตามแนวขวาง

จากรูปที่ 2.6 เมื่อมีแรงใด ๆ มากระทำกับวัสดุแล้วทำให้วัสดุนั้นมีความเค้นเกิดขึ้น พบว่าสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแส (J) และ ความเค้น (σ) ดังสมการที่ 2.32

$$\vec{E} = \rho J + \pi J \quad (2.32)$$

เมื่อ ρ คือ พิกัดความต้านทาน

π คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปเทนเซอร์

สำหรับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางใด ๆ ในโครงผลึก เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.32 แล้ว จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_1 = \rho_0 J_1 + \pi_1 \sigma_1 \rho_0 J_1 \quad (2.33)$$

เมื่อ ρ_0 คือ พิกัดความต้านทานเริ่มต้น

π_1 คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามยาว (Longitudinal Piezoresistive Coefficient)

จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับพิกัดความต้านทานและความหนาแน่นกระแสดังสมการที่ 2.34

$$\vec{E} = \rho J \quad (2.34)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ 2.34 ลงในสมการที่ 2.33 จะได้ว่า

$$\rho_1 J_1 = \rho_0 J_1 + \pi_1 \sigma_1 \rho_0 J_1 \quad (2.35)$$

หรือ

$$\rho = \rho_0 + \pi_1 \sigma_1 \rho_0 \quad (2.36)$$

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \pi_1 \sigma_1 \quad (2.37)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \pi_1 \sigma_1 \quad (2.38)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อกำหนดให้ π_t คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามขวาง (Transverse Piezoresistive Coefficient) ดังนั้นจากสมการที่ 2.33 ถึง 2.38 จะได้ว่า

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_l \sigma_1 \quad (2.39)$$

2.2.3 เพียโซรีซีฟทีปเกจแฟคเตอร์ [8]

ค่าเพียโซรีซีฟทีปเกจแฟคเตอร์ (GF) เป็นค่าที่บอกถึงความไวของเกจ ซึ่งในแต่ละวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยถ้าค่าเกจแฟคเตอร์มีค่าสูงจะหมายถึงเกจนั้นมีความไวในการเปลี่ยนแปลงสูง ซึ่งสามารถกำหนดค่าเกจแฟคเตอร์ในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$GF = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\varepsilon} \quad (2.40)$$

สำหรับค่าเพียโซรีซีฟทีปเกจแฟคเตอร์นี้ยังสามารถพิจารณาแยกออกไปได้อีกคือ ค่าเพียโซรีซีฟทีปเกจแฟคเตอร์ตามยาว (GF_l) และค่าเพียโซรีซีฟทีปเกจแฟคเตอร์ตามขวาง (GF_t) โดยค่าทั้งสองจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโดยพิจารณาได้ดังนี้

2.2.3.1 วัสดุที่เป็น Isotropic [9]

จะได้ค่าเกจแฟคเตอร์ดังนี้

$$GF_{il} = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \frac{1}{\varepsilon_l} \quad (2.41)$$

$$GF_{it} = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \frac{1}{\varepsilon_t} - 1 \quad (2.42)$$

เมื่อ ε_l คือ ความเครียดตามยาว

2.2.3.2 วัสดุที่เป็น Anisotropic Homogeneous Polycrystalline [9]

จะมีค่าเกจแฟคเตอร์ ดังนี้

$$GF'_{al} = \frac{\pi_l}{S_{11}} \quad (2.43)$$

$$GF_{at} = \frac{\pi_t}{S_{11}} \quad (2.44)$$

เมื่อ S_{11} คือ Complexing Coefficient สำหรับฟิล์มเพชรค่า $S_{11} = 0.09493 \times 10^{-2} \text{ Cm}^2 \cdot \text{dyre}^{-1}$

2.2.3.3 วัสดุที่เป็น Random Polycrystalline [9]

ค่าเอกแพคเตอร์จะสามารถหาได้จากการหาค่าเฉลี่ยทั้งพื้นผิวของสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานตามขวาง ($\langle \pi_l \rangle$) ดังสมการที่ 2.45

$$\langle \pi_l \rangle = \frac{\int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{\frac{\pi}{4}} \pi_l d\theta d\phi}{\int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{\frac{\pi}{4}} d\theta d\phi} \quad (2.45)$$

เมื่อ θ และ ϕ เป็นมุมระหว่าง Arbitrary Coordinate และ Principle Coordinate ดังนั้นสามารถหาค่าของ $\langle \pi_l \rangle$ ได้โดยการใช้กฎของฮุกและจากสมการที่ 2.37 2.38 2.40 2.41 และ 2.44 จะได้

$$\langle \pi_l \rangle = GF_{II} \frac{1}{E} \quad (2.46)$$

$$\langle \pi_l \rangle = GF_{II} \frac{1}{E} \quad (2.47)$$

เมื่อ E คือค่าขึงมอดูลัส สำหรับฟิล์มเพชรค่า $E = 11.43 \times 10^{12} \text{ dynes.cm}^{-2}$ [9]

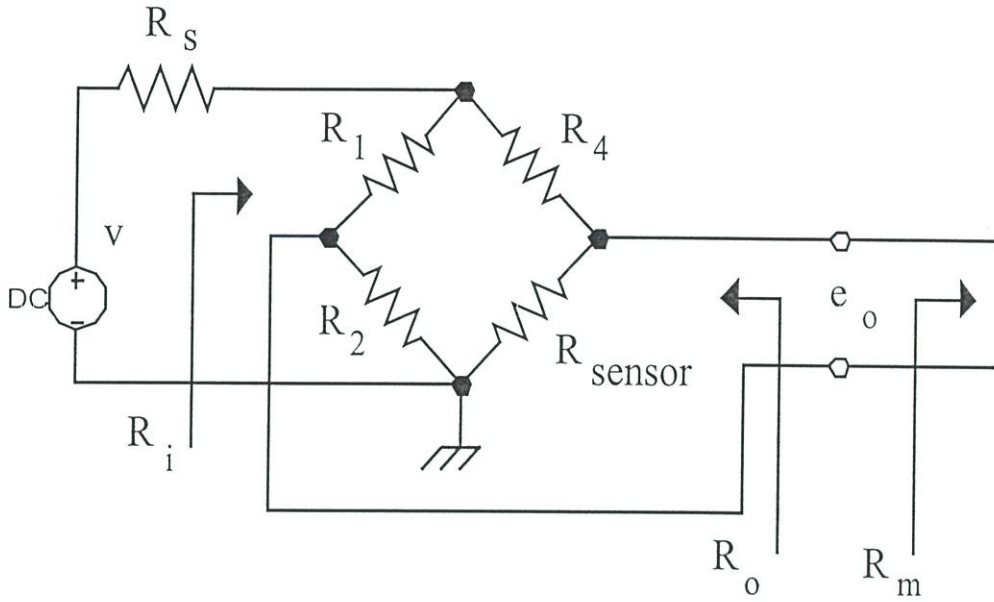
จากสมการที่ 2.41 ค่า ε_l จะสามารถหาได้จากการพิจารณา จากรูปที่ 2.1(ค) โดยจะได้ค่าดังนี้

$$\varepsilon = \left[\frac{3h \left(l - \frac{a+b}{2} \right)}{l^3} \right] \times y(x) \quad (2.48)$$

เมื่อ $y(x)$ เป็นค่าระยะเห

2.3 วงจรวิธสโตนบริดจ์และความไว

ในการอ่านสัญญาณอันตรายเราจะใช้วงจรวิธสโตนบริดจ์ต่อกับตัวต้านทานเพียโซร่วมกับตัวต้านทานอื่น ๆ ประกอบขึ้นเป็นวงจรผังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะได้สมการแรงดันเอาต์พุต V_0 ของวงจรซึ่งเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 วงจรบริดจ์

$$\Delta V_o = V_i \left(\frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_i}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{R_o}{R_m}} \right) \left(\frac{a}{(1+a)^2} \right) \left(\frac{\Delta R}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_{SENSOR}}{R_{SENSOR}} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1-\eta) \quad (2.49)$$

เมื่อ V_s เป็นแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงที่ป้อนแก่วงจร, N เป็นความไม่เชิงเส้นของวงจร

R_s เป็นความต้านทานภายในแหล่งจ่ายไฟ

R_1 เป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้าของวงจรบริดจ์

R_o เป็นอิมพีแดนซ์ขาออกของวงจรบริดจ์

R_m เป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้าของเครื่องมือวัดซึ่งใช้ออสซิลโลสโคป

R_1, R_4 เป็นตัวต้านทานใด ๆ

R_2 เป็นตัวต้านทานที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อชดเชยอุณหภูมิและถูกสร้างพร้อม R_{sensor}

เมื่อให้ $R_1/R_2 = R_4/R_{sensor} = a$ เป็นเงื่อนไขสมดุลของวงจร และ η เป็นความไม่เชิงเส้นของวงจร กรณีที่ $R_1 = R_2 = R_{sensor} = R_4$ จะทำให้ค่าของตัวแปร a มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นถ้าค่านของตัวตรวจจับอัตราเร่งถูกแรงกระทำค่า R_{sensor} ที่ติดอยู่ที่คานจะเปลี่ยนแปลงทำให้เอาท์พุทมีค่าดังนี้

$$V_0 = V_i \left(\frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_i}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_m}} \right) \left(\frac{a}{1 + a^2} \right) \left(\frac{\Delta R_{SENSOR}}{R_{SENSOR}} \right) (1 - \eta) \quad (2.50)$$

สำหรับกรณีทั่ว ๆ ไปค่า $\eta \approx 0$ $R_s \ll R_i$ และ $R_0 \ll R_m$ ดังนั้นจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\Delta V_O = \frac{V_i}{4} \left(\frac{\Delta R_{SENSOR}}{R_{SENSOR}} \right) \quad (2.51)$$

จากสมการที่ 2.51 ถ้านำอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่ง (Δa) มาคูณเข้าไปจะได้ความไวในการตอบสนองอัตราเร่ง ดังสมการที่ 2.51

$$S = \frac{\Delta V_O}{V_i} = \left(\frac{\Delta R_{SENSOR}}{4 R_{SENSOR} \Delta a} \right) \quad (2.52)$$

2.4 การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซโทรปิก

2.4.1 การหาค่าของมวล [10]

ในหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมทางสถิติของตัวตรวจจับอัตราเร่งจะถูกกำหนดโดยมวล(M) ดังนั้นเราสามารถหาค่าของมวลได้ ซึ่งมวลที่สร้างโดยการกัดด้วยสารละลายแบบแอนไอโซโทรปิกจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 และมีสมการดังต่อไปนี้

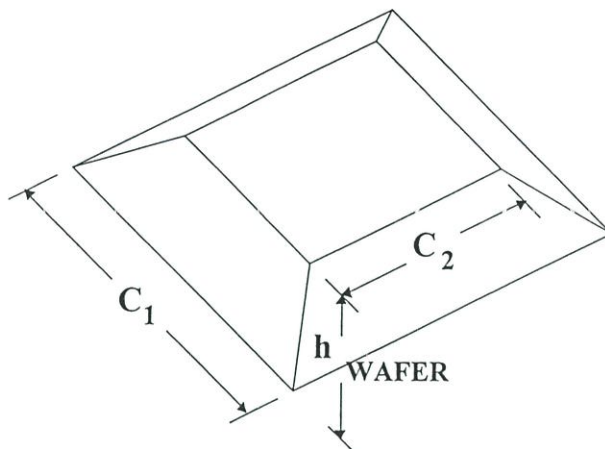
$$M = \iiint_V \rho \, dx \, dy \, dz = \rho \frac{h_{wafer}}{3} \times \frac{C_1^3 - C_2^3}{C_1 - C_2} \quad (2.53)$$

เมื่อ $\rho = \rho_{si} = 2.33 \times 10^3 \, \text{kg.m}^{-3}$

h_{wafer} = ความหนาของแผ่นซิลิคอน

C_1 = ความกว้างของสี่เหลี่ยมที่ฐานของมวล

C_2 = ความกว้างของสี่เหลี่ยมที่ยอดของมวล



รูปที่ 2.8 ลักษณะของมวลที่ได้จากการกัดซิลิคอนด้วยสารละลายแบบแอนไอโซโทรปิก

จากรูปที่ 2.8 เราสามารถหาความสัมพันธ์ของ C_1 และ C_2 ได้ดังนี้

$$C_2 = C_1 - h_{wafer} \sqrt{2} \quad (2.54)$$

แทนสมการที่ 2.54 ลงในสมการที่ 2.53 จะได้

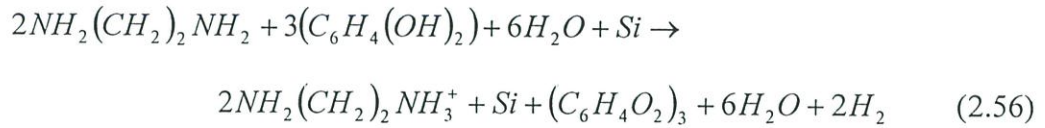
$$M = \rho \frac{\sqrt{2}}{6} [C_1^3 - (C_1 - h_{wafer} \sqrt{2})^3] \quad (2.55)$$

2.4.2 ปฏิริยาการกัดซิลิคอน

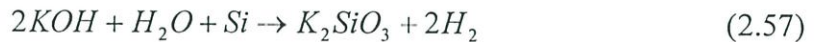
จากที่กล่าวมาการที่จะหามวลให้ได้ลักษณะดังในรูปที่ 2.8 นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายที่ใช้แล้วยังขึ้นกับเทคนิคในการระบวนการสร้างอุปกรณ์นั้น ๆ โดยสารละลายทั้งที่มีอยู่ในปัจจุบันจะมีกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยาหลัก ๆ อยู่ 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การฉีดโฮลจากสารละลายเข้าสู่ผิวซิลิคอน เพื่อยกระดับสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ของซิลิคอนเป็น Si^+
2. การรวมตัวของอนุมูลหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) กับซิลิคอนที่เป็นประจุบวก ไปเป็นออกไซด์ที่ละลายน้ำได้
3. การรวมตัวของซิลิคอนและองค์ประกอบในสารละลายเป็น Complexing Agent
4. การดึงซิลิคอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายออกสู่น้ำ ทำให้ซิลิคอนถูกกัดออกไป

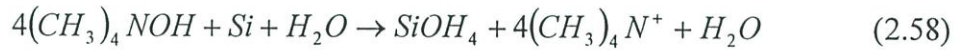
จากขั้นตอนทั้ง 4 สารเคมีที่จะใช้กัดซิลิคอนได้จะต้องแตกตัวให้โพลกับซิลิคอนและตัวมันเองจะต้องมีอนุภาคของหมู่ไฮดรอกซิลเกิดขึ้นเพื่อจะได้ไปรวมตัวกับซิลิคอน รวมทั้ง Complexing Agent จะต้องสามารถละลายในน้ำได้ดี โดยสารละลายที่นิยมใช้กันมากมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น -EPD (EthyleneDiamine : Pyrocatechol : DI ; E:P:D)



-KOH (Potassium Hydroxide)



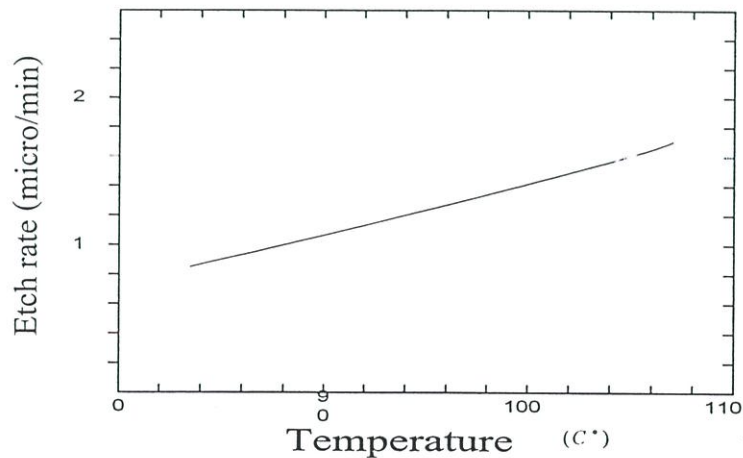
-TMAH (Tetramethyl Ammonium Hydroxide ; $(CH_3)_4NOH$)



2.4.3 อัตราการกัดซิลิคอน

2.4.3.1 อัตราการกัดซิลิคอนระนาบ (100) ในสารละลาย EPD [11]

เอธิลีนไดอะมีน (Ethylene Diamine) เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีคุณสมบัติเป็นด่าง มีจุดเดือดประมาณ $120^\circ C$ เมื่อทิ้งไว้ในอากาศเป็นเวลาพอสมควรจะเกิดการออกซิไดซ์ (Oxidize) กับอากาศจะทำให้มีสีคล้ำขึ้น และจะมีการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นถ้าเพิ่มอุณหภูมิ ส่วนไพโรแคทอล (Pyrocatechol) เป็นเกลือของแฉ่งสีเทาควันบุหรือสามารถดูความชื้นได้ดี เมื่อผสมกับเอธิลีนไดอะมีนและน้ำ DI จะทำให้สารละลายมีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อผสมสารละลาย EPD ในอัตราส่วน 50:8:16 ให้อุณหภูมิกับสารละลายที่ $80^\circ C$ ถึง $110^\circ C$ และใส่แผ่นซิลิคอนระนาบ(100) สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.9

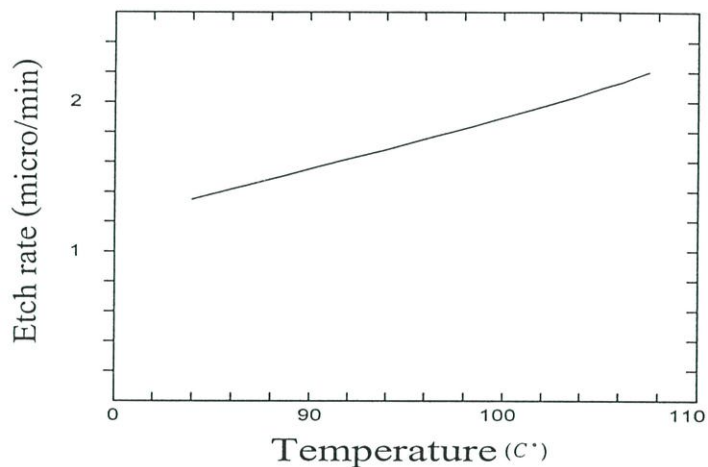


รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิของสารละลาย EPD ในอัตราส่วน

50:8:16

2.4.3.2 อัตราการกัดซึลิกอนระนาบ(100)ในสารละลาย KOH [11]

KOH เป็นของแข็งเกลือคลีตีสิวามีสภาพเป็นด่างแก่ สามารถละลายน้ำได้ดี ถ้าปล่อยให้แห้งในอากาศจะสามารถดูดความชื้นได้จากอากาศ เมื่อผสม KOH กับน้ำ DI จะได้สารละลายที่ไม่มีสี จากการศึกษพบว่าถ้าใส่แผ่นซึลิกอนระนาบ(100) ลงในสารละลาย KOH ที่มีความเข้มข้น 4 โมลาร์ จะได้อัตราการกัดซึลิกอนระนาบ(100) สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิของสารละลาย KOH เข้มข้น 4 โมลาร์

จากการศึกษาได้พบว่าสารละลายทั้ง 2 ชนิด มีข้อดี และข้อเสีย ดังนี้

1. สารละลาย EPD เมื่อใช้ไปจะทำให้สารละลายเกิดการออกซิไดร์กับอากาศจำทำให้สารละลายมีสีเข้มขึ้นเรื่อยๆ และยังพบอีกว่าสารละลาย EPD นี้ เมื่อระเหยกลายเป็นไอจะมีอันตรายเป็นอย่างมากกับผู้ใช้

2. สารละลาย KOH เมื่อแตกตัวในน้ำจะให้ K^+ เกิดขึ้น ซึ่ง K^+ นี้ ถ้าตกค้างอยู่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและจะทำให้อุปกรณ์ที่สร้างอยู่เกิดความเสียหายได้

3. อัตราการกัดของสารละลายทั้ง 2 ชนิด มีอัตราการกัดซึลิกอนค่อนข้างเร็ว ซึ่งเป็นข้อดี แต่นอกจากจะกัดซึลิกอนได้เร็วแล้ว ยังมีอัตราการกัดซึลิกอนไดออกไซด์ที่เร็วด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องสร้างซึลิกอนไดออกไซด์ให้มีความหนาตามไปด้วย ซึ่งอาจจะทำให้เครื่องจักรที่ใช้สร้างซึลิกอนไดออกไซด์มีอายุการใช้งานสั้นลง

4. กระบวนการสร้างอุปกรณ์มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียม แต่การกัดมวลมักจะถูกสร้างในกระบวนการหลังจากการสร้างขั้วโลหะเสมอ ดังนั้นถ้าสารละลายทั้ง 2 ไหลซึมไปสัมผัสกับขั้วโลหะก็จะทำให้เกิดความเสียหายกับขั้วโลหะได้ จึงเป็นข้อเสียที่สำคัญอย่างมากกับผู้ใช้สร้างอุปกรณ์

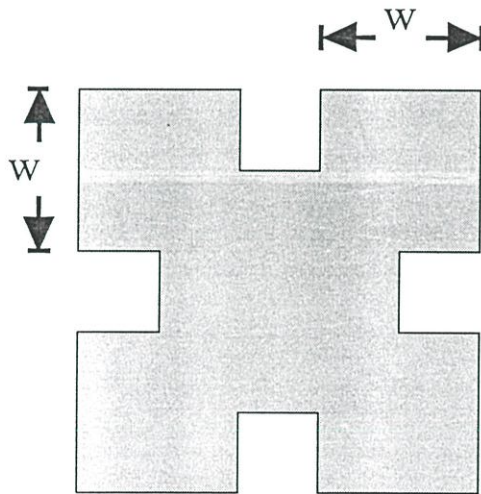
จากข้อดี และข้อเสียที่กล่าวมาจึงได้มีผู้คิดค้นสารละลายที่ไม่มีสี ไม่มีการตกค้างของอิเล็คตรอนอิสระที่จะทำให้อุปกรณ์เสียหาย และไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ซึ่ง สารละลายชนิดนี้คือ TMAH ส่วนคุณสมบัติของสารละลายชนิดนี้จะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

2.4.4. การชดเชยมุม [12]

การสร้างมวลของตัวตรวจจับอัตราเร่งนั้นจำเป็นต้องทำการชดเชยมุมจากการกัศฉลิตคอนในสารละลายแบบแอนไอโซโทรปิก เพราะสารละลายจะทำการกัดมุมของมวลทำให้เราไม่ได้มวลตามลักษณะตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องทำการสร้างส่วนต่อเติมยื่นออกไปเพื่อเป็นตัวถูกกัดแทน โดยจะทำการคำนวณให้ส่วนต่อเติมมีขนาดพอดี เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสร้าง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบส่วนต่อเติมพื้นฐานขึ้นมา 3 แบบ ดังต่อไปนี้

2.4.4.1 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

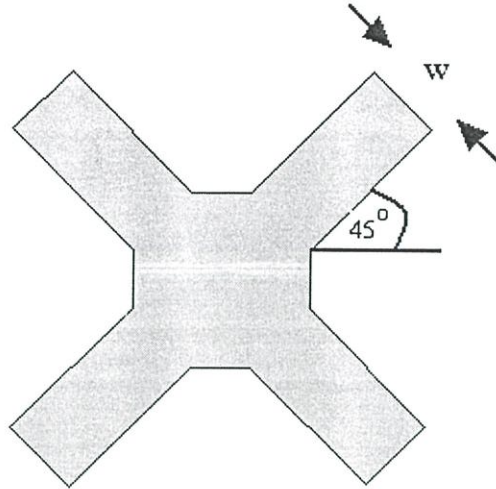
การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะออกแบบได้โดยการเพิ่มเติมนี่เหลี่ยมยื่นออกไปจากหัวมุมด้านละเท่ากับ w ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

2.4.4.2 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา

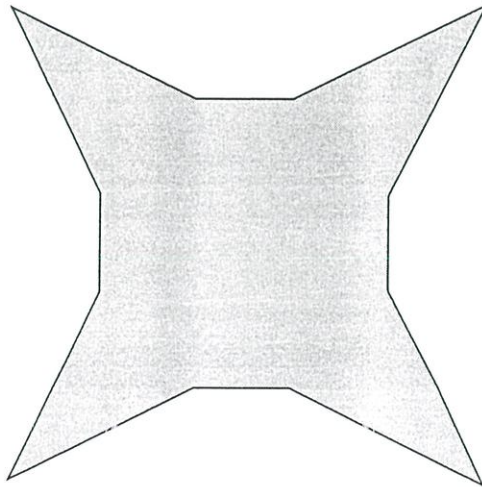
การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา จะทำการออกแบบโดยการยื่นส่วนต่อเติมออกไปทำมุม 45 องศา กับขอบของมวลที่ออกแบบไว้ และให้ความกว้าง w มีค่าน้อยหรือเท่ากับสองเท่าของความลึกที่ต้องการจะกัด ดังรูปที่ 2.12



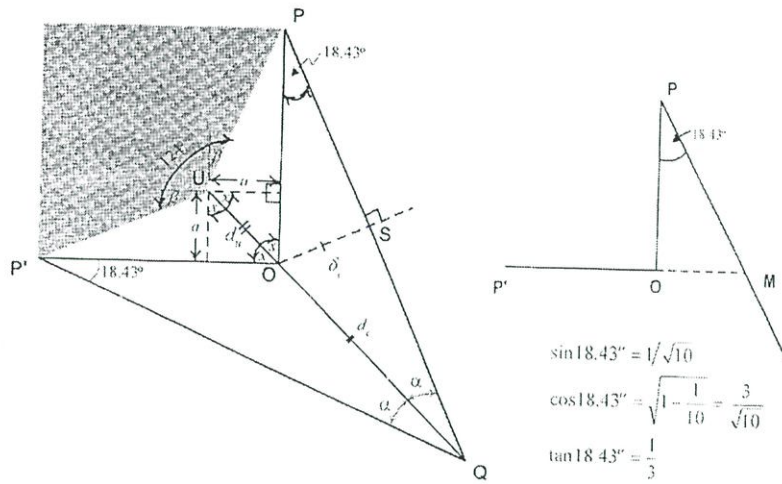
รูปที่ 2.12 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา

2.4.4.3 การชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยม

การออกแบบมุมชดเชยแบบสามเหลี่ยมนี้จะใช้ข้อมูลขนาดการเข้ามุมของ Beam เพื่อกำหนดขนาดของด้านสามเหลี่ยมให้พอดีกับความลึกที่จะทำการกัด ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้ ดังรูปที่ 2.13 ถึง 2.14

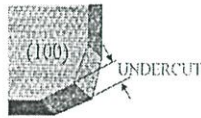


รูปที่ 2.13 การชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยม



(ก)

ความลึก	การเซาะมุม
ไมครอน	
5	1.91
10	4.70
18	9.35
23	13.49
30	16.38
34	20.57
36	24.13
44	26.87
49	30.78
54	33.50



(ข)

รูปที่ 2.14 (ก) การหาค่าของมุมสามเหลี่ยมทั้ง 4 (ข) อัตราการเซาะมุมตามข้อมูลของ Beam

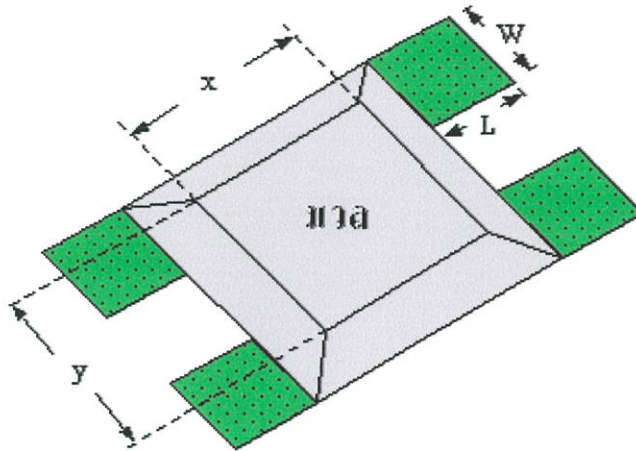
จากรูปที่ 2.14 (ก) กำหนดให้ $d_c = 2d_u$, $d_u = -1.941 + 0.659 h$ และ $\delta_c = \frac{2}{\sqrt{5}} d_u$

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

3.1 การออกแบบตัวตรวจจับสนุตร้าแรง

จากสมการต่าง ๆ ในบทที่ 2 เราจะพบว่าลักษณะทางเรขาคณิตของตัวตรวจจับสนุตร้าแรงนั้นจะเป็นตัวกำหนดลักษณะต่าง ๆ ของตัวตรวจจับสนุตร้าแรงดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะออกแบบให้ตัวตรวจจับสนุตร้าแรงมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะมีมวลซิลิคอนคงที่เท่ากับ 1.238 มิลลิกรัม และมีขนาด $x = y = 800$ ไมครอน และ $h = 440$ ไมครอน และออกแบบคานเป็นลักษณะแบบสะพาน โดยมีขนาดความกว้าง (L) และความยาว (w) เท่ากับ 440 ไมครอน และมีความหนาของคานโดยขึ้นอยู่กับเวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ความหนาของคานประมาณ 7 ไมครอน ส่วนการกัดมวลตรวจสอบของตัวตรวจจับสนุตร้าแรงนั้นจะใช้การกัดแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้สารละลาย TMAH เข้มข้น 22% wt ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

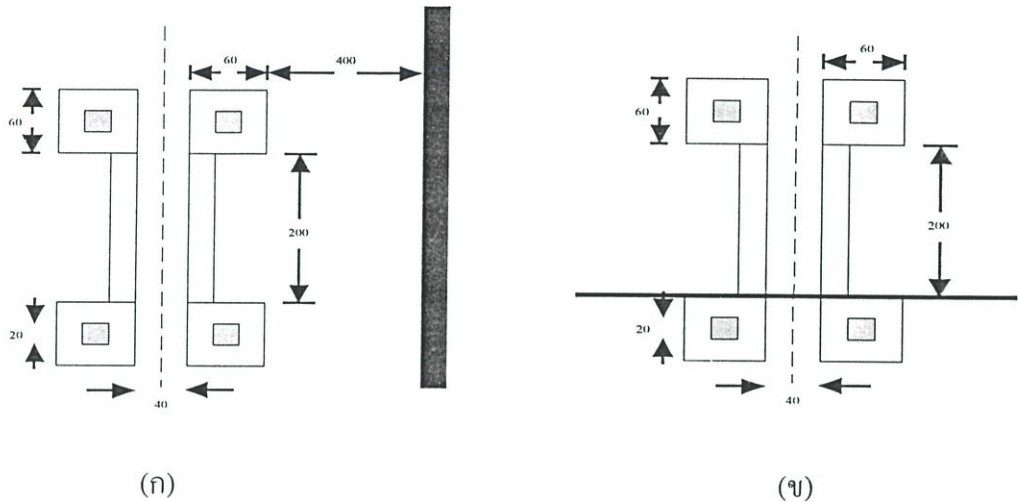


รูปที่ 3.1 การออกแบบมวลและคาน

3.2 การออกแบบตัวต้านทาน

การออกแบบด้านทานสำหรับอุปกรณ์ตัวตรวจจับสนุตร้าแรงนั้นมี 2 จุด คือ จุดตัวต้านทานเพียโซ ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับความเค้นที่เกิดขึ้นบนคานและจุดตัวต้านทานชดเชยอุณหภูมิ ซึ่งทั้งสองจุดเป็นด้านทานที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการเนื่องจากสร้างพร้อมกันและด้วยวิธีเดียวกันและทำการต่อตัวต้านทานทั้งสองจุดแบบอนุกรม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ตัวต้านทานแต่ละตัวมีความยาว 200 ไมครอน กว้าง 40 ไมครอนวางอยู่ห่างกันอย่างสมมาตร 40 ไมครอน ส่วนที่เชื่อมต่อกับ Bonding Pad มีขนาด 60x60 ตารางไมครอน ส่วนวินโดวส์คอนแทกมีขนาด 20x20 ตารางไมครอน โดยกำหนดให้วางตัวต้านทานชดเชยอุณหภูมิห่างจากรอยกัดอย่างน้อย 100 ไมครอน ซึ่งสามารถ

วางไว้ ณ ตำแหน่งใด ๆ ซึ่งไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายและจะต้องวางไปในแนวเดียวกับตัวด้านทานเพื่อใช้ในการวางตัวด้านทานเพื่อโซจะวางกึ่งกลางของตัวด้านทานเพื่อโซให้ทับกับแนวกึ่งกลางของคาน โดยจะเริ่มส่วนที่เป็นตัวด้านทานตรงกับส่วนขอบของคานขึ้นดังรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.2 การออกแบบตัวด้านทาน (ก) การวางตัวด้านทานชดเชยอุณหภูมิ (ข) ตัวด้านทานเพื่อโซ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ตัวด้านทานถูกสังเคราะห์ด้วยฟิล์มบางเพชรชนิด p ซึ่งจะใช้ไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ผสมกับสารละลายไบรอนไตรออกไซด์ในอัตราส่วนไบรอนต่อคาร์บอน 10,000 ppm ซึ่งจะได้พิกัดความต้านทานประมาณ 5×10^{-2} โอห์ม-เซนติเมตรและสามารถจะหาค่าความต้านทานได้จากสมการที่ 3.1

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.1)$$

- เมื่อ R = ค่าความต้านทาน
 ρ = พิกัดความต้านทาน
 L = ความยาวของตัวด้านทาน
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวด้านทาน

3.3 มาส์กและลำดับการสร้าง

กระจกมาส์กต้นแบบจะกำหนดตามขั้นตอนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งบนฟิล์มบางเพชรซึ่งมีมาส์กดังต่อไปนี้

มาตราที่ 1 เจาะช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึก เพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการกัดด้วยสารละลาย TMAH จนทะลุแผ่นเพื่อใช้เป็น Back-to-front aligner

มาตราที่ 2 เจาะช่องออกไซด์ด้านหลังเพื่อกำหนดบริเวณกัดมวลของตรวจจับอัตราเร่ง

มาตราที่ 3 กำหนดช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดบริเวณของตัวต้านทานเพียโซ

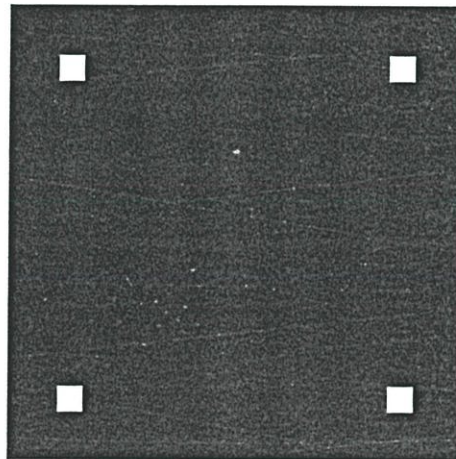
มาตราที่ 4 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึก เพื่อแยกคานออกจากไดอะแฟรม (Beam Definition) โดยการกัด

มาตราที่ 5 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดบริเวณเปิดวินโดวส์คอนแทค

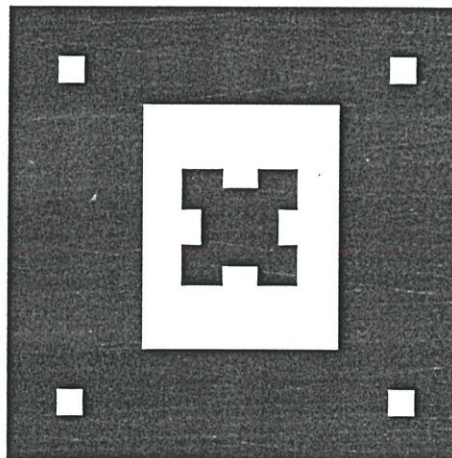
มาตราที่ 6 สร้างแพทเทิร์นสำหรับลวดลายขั้วทอง

3.3.1 มาส์ก

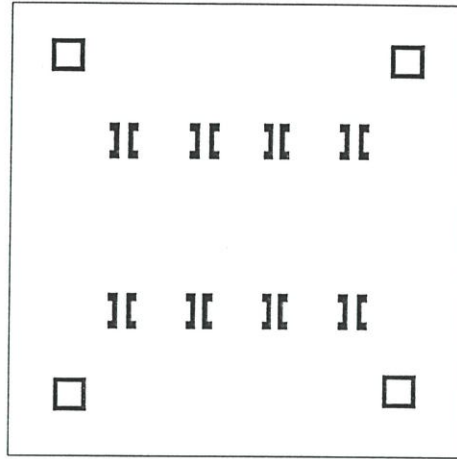
แสดงรูปของมาส์กทั้ง 6



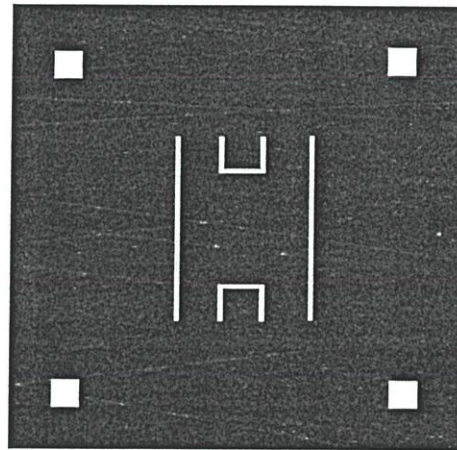
มาตราที่ 1



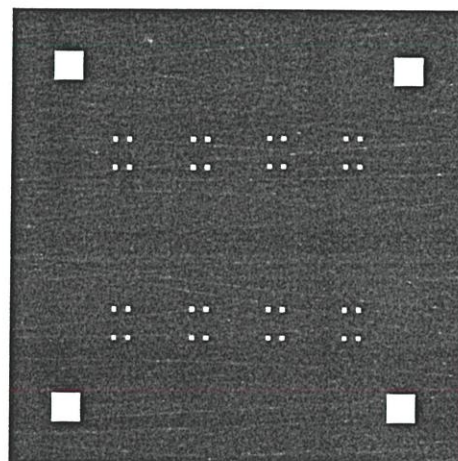
มาตราที่ 2



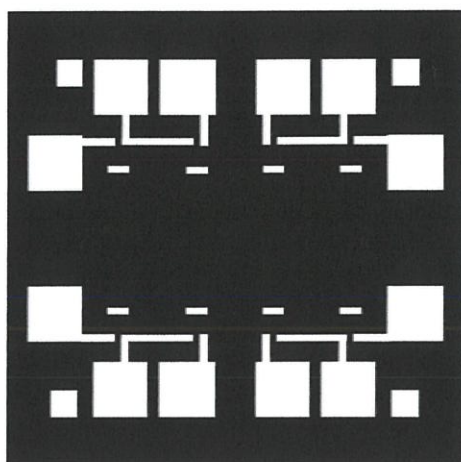
มาตรา 3



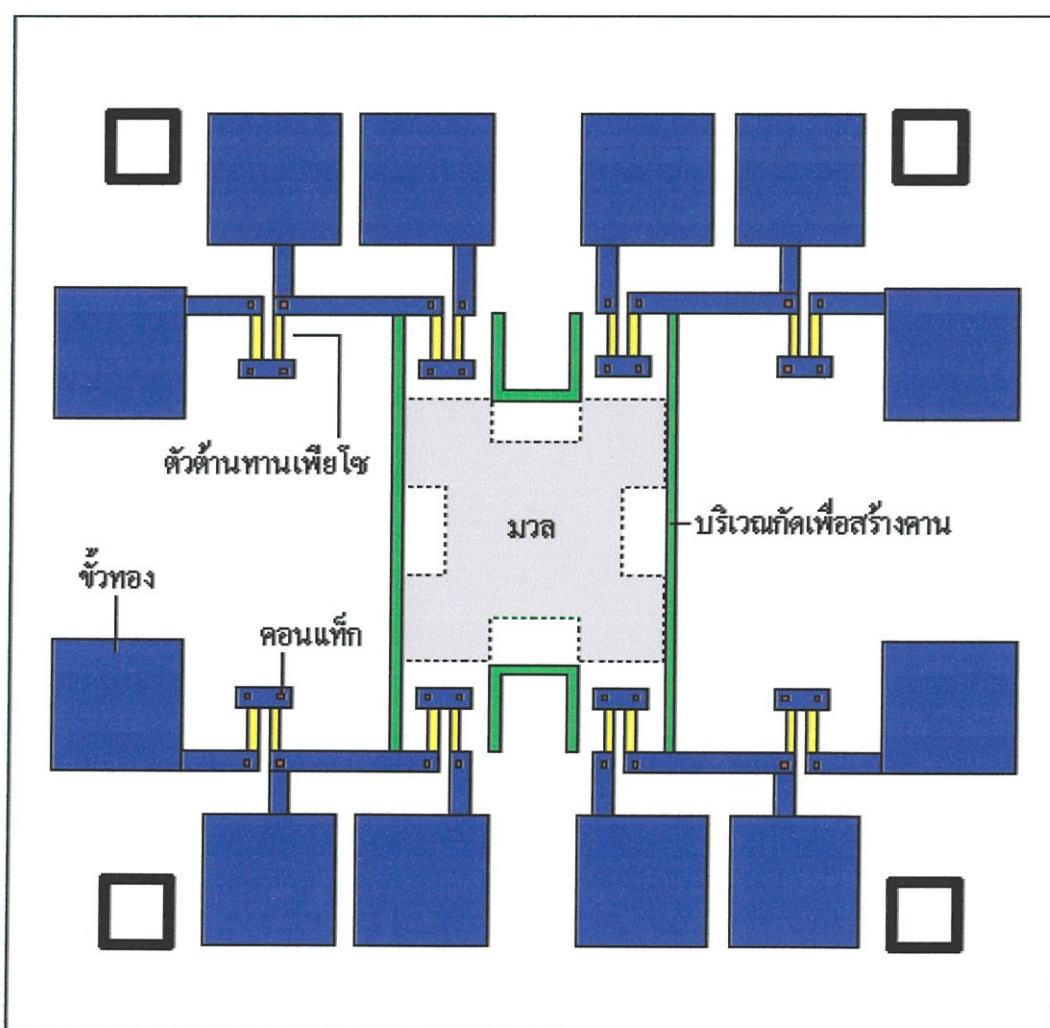
มาตรา 4



มาตรา 5



มาส์ก 6



รูปที่ 3.3 รูปแบบมาส์กสมบูรณณ์เมื่อนำมาส์กทั้ง 6 ชั้นทับกัน

3.3.2 ลำดับการสร้าง

3.3.2.1 การทำความสะอาดและเตรียมแผ่นเบื้องต้น

1. เลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น โดยใช้แผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ชนิด p ความหนาประมาณ 440 ไมครอน

2. ตัดแผ่นผลึกซิลิกอนให้ได้ขนาด 1.2x1.5 เซนติเมตรและทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอนซึ่งมีชั้นตอนดังนี้

- ล้างแผ่นผลึกด้วยน้ำ DI ในเครื่องสั่นความถี่สูง 5 นาที
- ต้มในกรดไนตริก 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้าออก
- ราวด้วยน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 7000 อังสตรอม โดยการออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนแห้งด้วยอัตราการไหล 1200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อเนื่องด้วยการออกซิเดชันแบบชื้น 4 ชั่วโมง และแบบแห้งอีก 2 ชั่วโมง

4. กระบวนการการโฟโตลิทราฟี 1 (ด้านหลัง) กระบวนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งจะต้องมีการซ้อนทับแบบทั้งสองด้านของแผ่นเวเฟอร์ ในขั้นแรกนั้นกระบวนการโฟโตลิทราฟี 1 จะเปิดช่องออกไซด์เพื่อกำหนดบริเวณที่กัดแผ่นผลึกซิลิกอนจากด้านหน้าเพื่อเป็นจุดอ้างอิงสำหรับทับแพทเทิร์นบนด้านหน้าต่อไป กระบวนการโฟโตลิทราฟี 1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบแผ่นเวเฟอร์ครั้งแรก ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เพื่อขับไล่ความชื้นบนแผ่นผลึก
- เคลือบฟิล์มของน้ำยาไวแสง AZ6112 ด้วยเครื่อง spinner ด้วยความเร็ว 3000 รอบต่อนาที
- อบฟิล์มน้ำยาไวแสงที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ซ้อนทับแบบและฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อถ่ายแบบด้วยเครื่อง mask aligner
- ล้างน้ำยา AZ developer 2 แก้ว แก้วละ 3 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- ออบฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ทาด้านหน้าของแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสง AZ 6112
- ออบฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- กัดออกไซด์ด้วยสารละลาย Buffer HF
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์จำนวนมาก
- เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน
- เตรียมสารละลาย EPD ในอัตราส่วน 50:8:16 ควบคุมอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส ควบคุมสารละลายตลอดเวลาด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเพื่อกระจายความร้อนของสารละลายให้เท่ากัน ควบคุมความเข้มข้นด้วยการเพิ่มเติมหลอดควบแน่นย้อนกลับ (Condenser) ตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้คงที่ประมาณ 60 นาที แล้วจึงนำชิ้นงานลงกัดจนทะลุแผ่นผลึก สังเกตการทะลุด้วยการมองจะใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก
- กัดออกไซด์ผิวหน้าบางส่วนด้วยสารละลาย Buffer HF เป็นเวลา 30 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก
- เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน

5. ลอกซิลิคอน ไดออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนออก โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ทาน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 1350 ที่ด้านหลังแผ่นผลึกซิลิคอน
- ออบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที
- ลอกชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ออกด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ HF:NH₄ (1:6)
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.3.2.2 การล้างคราห์ฟิล์มบางเพชรบนฐานรองซิลิคอน

1. นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการที่ 3.3.2.1 มาขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 1 ไมครอน เป็นเวลา 16 นาที
2. ทำความสะอาดแผ่นผลึกที่ขัดเสร็จแล้วตามขั้นตอนต่อไปนี้
 - ล้างด้วยอะซิโตนเครื่องสันความถี่สูง 5 นาที
 - ล้างด้วยน้ำ DI

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดซัลฟูริก 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- ต้มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ปริมาณมาก
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่เตรียมผิวหน้าเรียบร้อยแล้วมาทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบไล่ลดความร้อนที่ความดันต่ำในบรรยากาศของไฮโดรเจนเอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมงและทำการสังเคราะห์ฟิล์มเอ็กทรินซิก ซึ่งใช้ไฮโดรเจนของโบรอนไดรอกไซด์ในเอทิลแอลกอฮอล์ โดยใช้อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน 10,000 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.2.3 กระบวนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชร

1. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 2 ใช้กระจกมาสก์ที่ 2 เปิดช่องออกไซด์ด้านหลังเพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการกัดให้เป็นโครงสร้างของมวลตรวจสอบ ซึ่งมีขั้นตอนต่อไปนี้

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอน ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 20 นาที
- ถ่ายแบบด้วยเครื่อง mask alinger โดยการซ้อนทับแบบด้วยกระจกมาสก์ที่ 1 และฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 10 วินาที
- ล้างในน้ำยา AZ developer 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 20 นาที
- กัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- กัดซิลิคอนให้ได้เป็นโครงสร้างด้วยละลาย TMAH เข้มข้น 22 wt % คัม และ กวนสารละลายตลอดเวลาด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาประมาณ 400 นาที
- ทำความสะอาดหลังการกัดโดยการราดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์
- และล้างด้วยน้ำ DI แล้วจึงเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์มบางเพชร (ครั้งที่ 1) ด้วยเครื่อง PECVD โดยใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 3.1 ซึ่งจะได้ซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 5,000 อังสตรอม

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง PECVD

พลังงาน	30 วัตต์
อัตราการใช้ของก๊าซ SiH_4 15% ใน N_2	25 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
อัตราการใช้ของก๊าซ N_2O	50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ความดันในระบบ	300 มิลลิทอร์
เวลาในการสร้าง	15 นาที

2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 3 ใช้กระจกมาสก์ที่ 3 เปิดช่องออกไซด์เพื่อกำหนดการกัดให้ได้เป็นโครงสร้างของตัวต้านทาน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ถ่ายแบบด้วยเครื่อง mask aligner โดยการซ้อนทับแบบด้วยกระจกมาสก์ที่ 2 และฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 50 วินาที
- ล้างในน้ำยา AZ developer 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- ล้างน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที
- กัดซิลิคอนไดออกไซด์ทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อ

เปิดช่องสำหรับกัดฟิล์มเพชรด้วยเครื่องไมโครเวฟพลาสมา โดยมีขั้นตอนดังนี้ กัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE โดยใช้เงื่อนไขดัง ตารางที่ 3.2 ซึ่งมีอัตราการกัด 280 อังสตรอมต่อนาที

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE

พลังงาน RF	250 วัตต์
อัตราส่วนก๊าซผสม Ar : CHF ₃ : O ₂	55% : 43% : 2%
ความดันในระบบ	200 มิลลิทอร์
เวลาในการกัด	ประมาณ 18 นาที

- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน
- กัดชั้นฟิล์มเพชรชนิด p ถึงชั้นฟิล์มเพชรชนิด i ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา

โดยใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 3.3 เพื่อกัดให้เป็นโครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิดพี

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการกัด โครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p

พลังงาน	750 วัตต์
อัตราส่วนก๊าซผสม Ar : O ₂	50% : 50%
อัตราการไหลของก๊าซ	50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ความดันในระบบ	8.5 ทอร์
เวลาในการกัด	ประมาณ 7 นาที

- ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์มเพชร (ครั้งที่ 1) ออกด้วยสารละลายบัฟ และ ล้างด้วยน้ำ DI การทำความสะอาดผิวฟิล์มเพชรหลังการกัด โดยมีขั้นตอนดังนี้ กัดด้วยสารละลายอิมตัวของโครเมียมไดออกไซด์ (CrO₃) ในกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที เพื่อกำจัดกราฟไฟท์ที่ผิวหน้า

- ล้างด้วยสารละลายคัมเด็คของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) กับ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) ในอัตราส่วน 1:1

- ล้างด้วยน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน
- สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์มเพชร (ครั้งที่ 2) โดยใช้ เครื่อง PECVD

ตามตารางที่ 3.1

3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ 4 ใช้กระจกมาสก์ที่ 4 เพื่อเปิดช่องออกไซด์ ซึ่งจะเป็นการกำหนดบริเวณการกัดให้การแยกพื้นผิวของฟิล์มเพชรแยกออกจากกันเพื่อให้ได้รูปแบบของคานเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 4620 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ความเร็ว 4,800 รอบ

ต่อนาที

- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 20 นาที
- ถ่ายแบบด้วยเครื่อง Mask alinger โดยการซ้อนทับแบบด้วยกระจกมาสก์ที่ 4

และฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 50 วินาที

- ล้างในน้ำยา AZ developer 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- ล้างน้ำ DI 1 แก้ว
- เช้าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 20 นาที
- กัดซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดช่องสำหรับกัดฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง ไมโครเวฟ

พลาสมา โดยใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 3.3

- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- กัดฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาโดยใช้เงื่อนไขใน

ตารางที่ 3.3 ซึ่งการกัดเพื่อให้ได้การแยกคานออกจากพื้นผิวของฟิล์มเพชร

4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี 5 ใช้กระจกมาสก์ที่ 5 โดยเปิดช่องออกไซด์เพื่อ กำหนดบริเวณที่ต้องการกัดให้เป็นรอยสัมผัสขั้วทองของตัวต้านทาน ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 4620 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ความเร็ว 4800

รอบต่อนาที

- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที
- ถ่ายแบบด้วยเครื่อง Mask alinger โดยการซ้อนทับแบบด้วยกระจกมาสก์ที่ 5

และฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 50 วินาที

- ล้างในน้ำยา AZ developer 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที

- กัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE ซึ่งจะใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 4.4
- เคลือบทองโดยเครื่องเคลือบระบบสุญญากาศ
- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. กระบวนการโฟโตลิทราฟี 6 ใช้กระจกมาสก์ที่ 6 โดยเปิดช่องออกไซด์เพื่อกำหนดบริเวณของขั้วทองโดยจะเป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้งานต่อไป ซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 4620 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ความเร็ว 4800 รอบ

ต่อหน้าที่

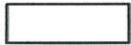
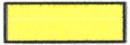




- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที
- ถ่ายแบบด้วยเครื่อง Mask alinger โดยการซ้อนทับแบบด้วยกระจกมาสก์ที่ 6

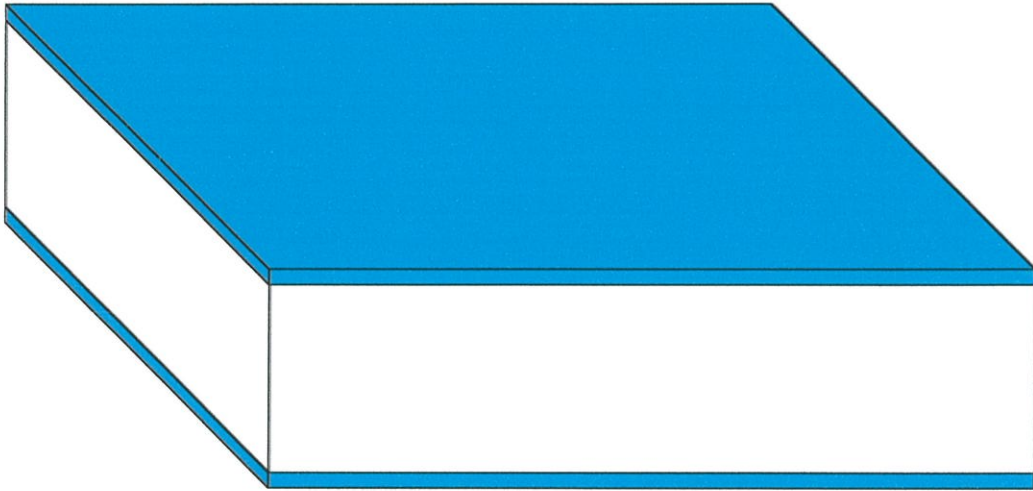
และฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 50 วินาที

- ล้างในน้ำยาไวแสง AZ developer 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที
- กัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE ซึ่งจะใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 4.4
- เคลือบทองโดยเครื่องเคลือบระบบสุญญากาศ
- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

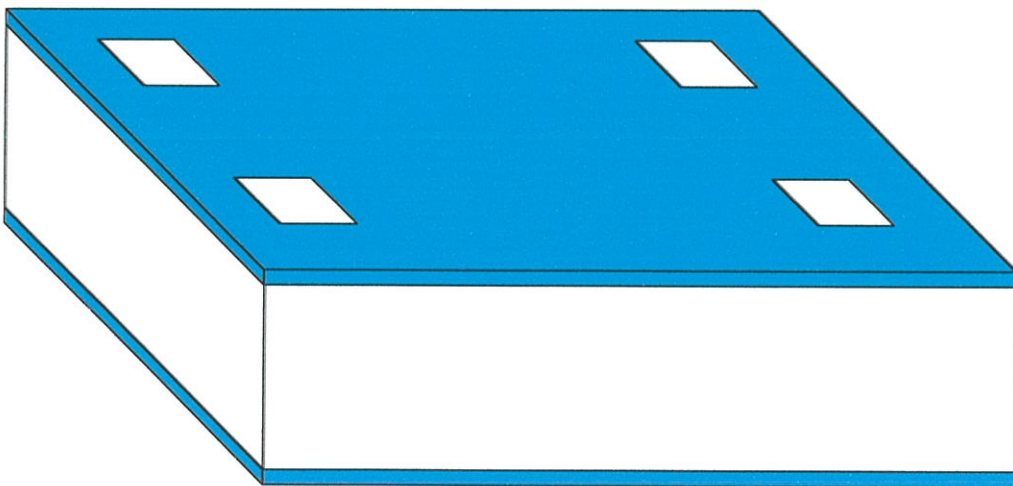
6. การซินเตอร์ริง ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหล 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเวลา 11 นาที เพื่อให้เกิดเป็นรอยต่อไอหุ้มมิกที่ดัด

จากกระบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวมา สามารถแสดงลำดับการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 3.4

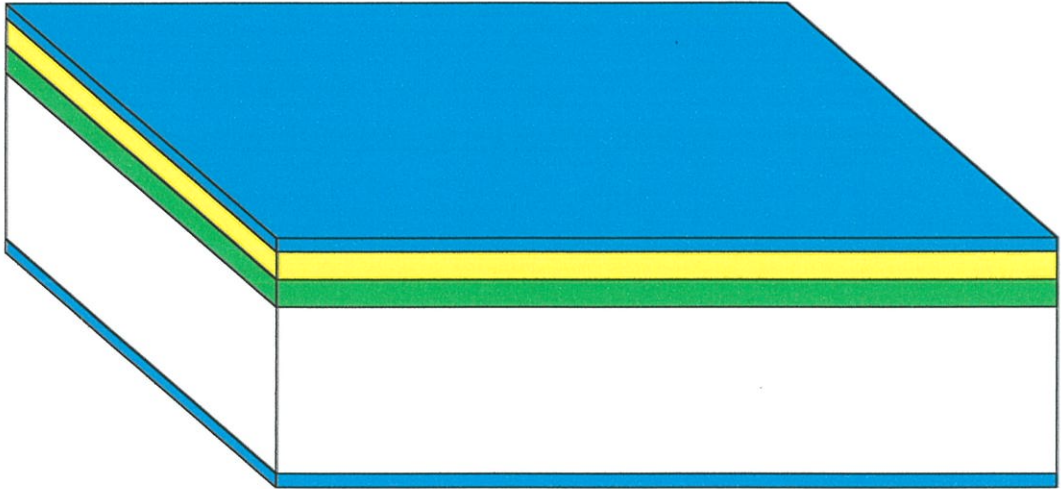
	ซิลิคอน		ฟิล์มเพชรชนิด p
	ซิลิคอนไดออกไซด์		ทอง
	ฟิล์มเพชรชนิด i		วินโดล์คอนแทก



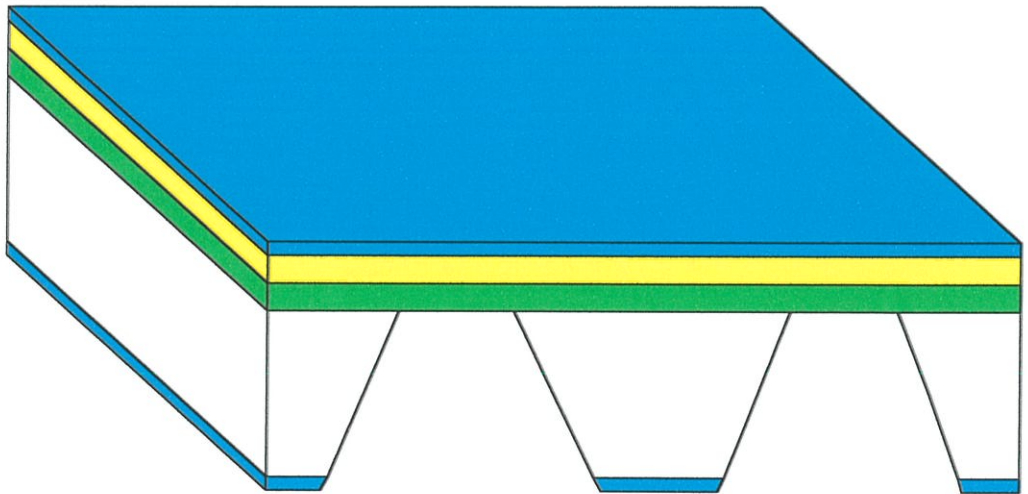
- (ก) - สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และทำการเปิดช่องออกได้ด้านหลังแผ่นด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกมาสก์ที่ 1



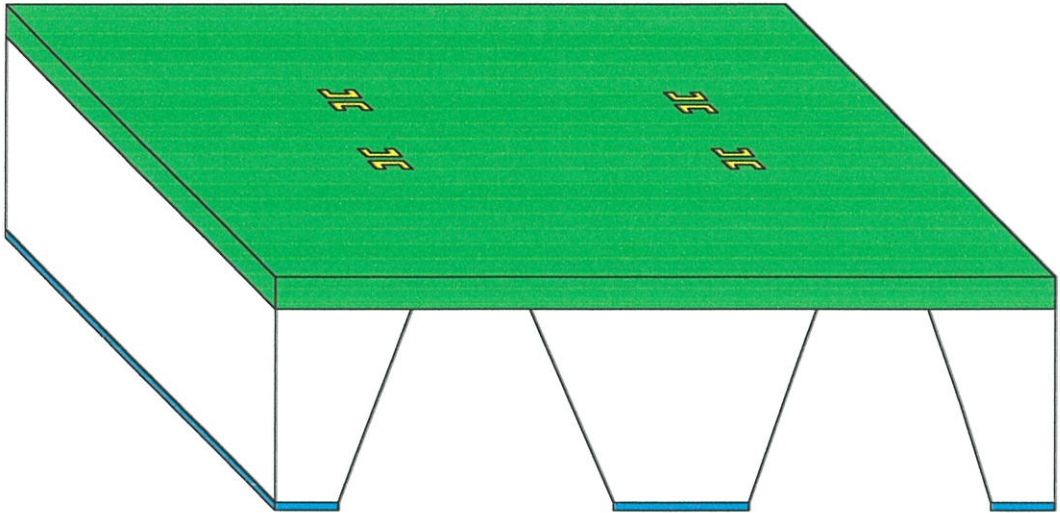
- (ข) - ทำการกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย EPD อัตราส่วน 50:8:16 เพื่อเป็นมาสก์ Aligner



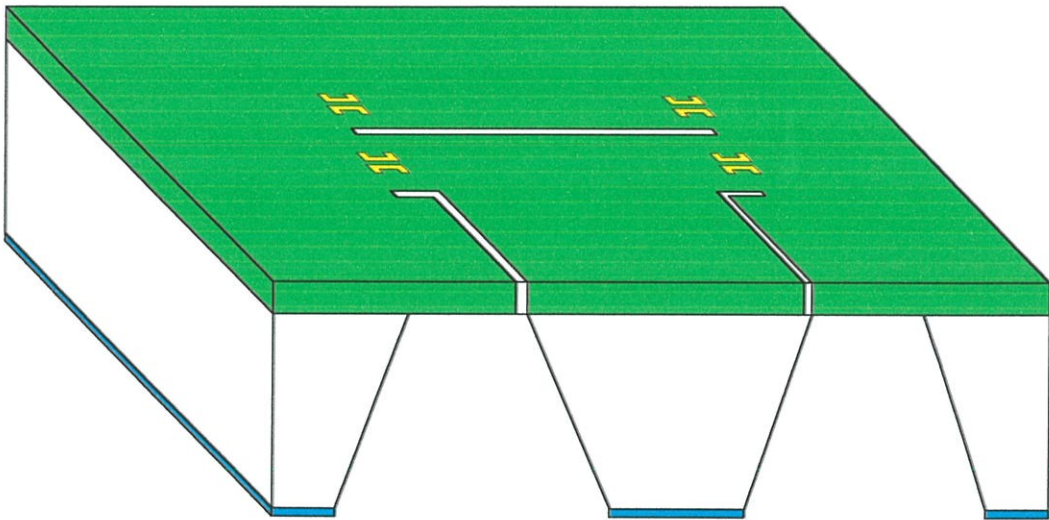
- (ค) - สังกะระห์ฟิล์มเพรชชนิด I และต่อด้วยฟิล์มเพรชชนิด p บนฐานรองซิลิคอน จากนั้นทำการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธี PECVD และทำการเปิดช่องออกไซด์ด้านหลังแผ่นด้วย กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกมาสก์ที่ 2



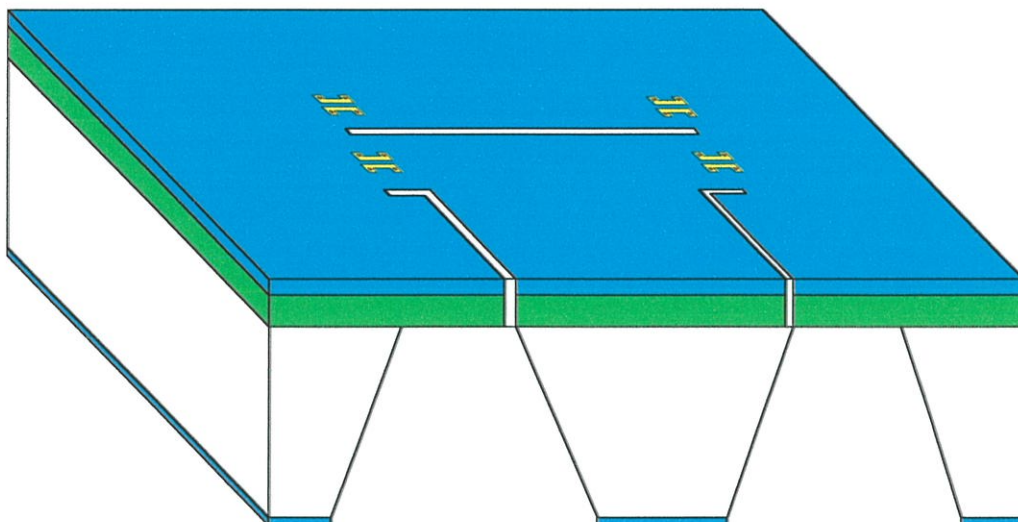
- (ง) - ทำการกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH เข้มข้น 22 wt% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่อสร้างมวลตรวจสอบ



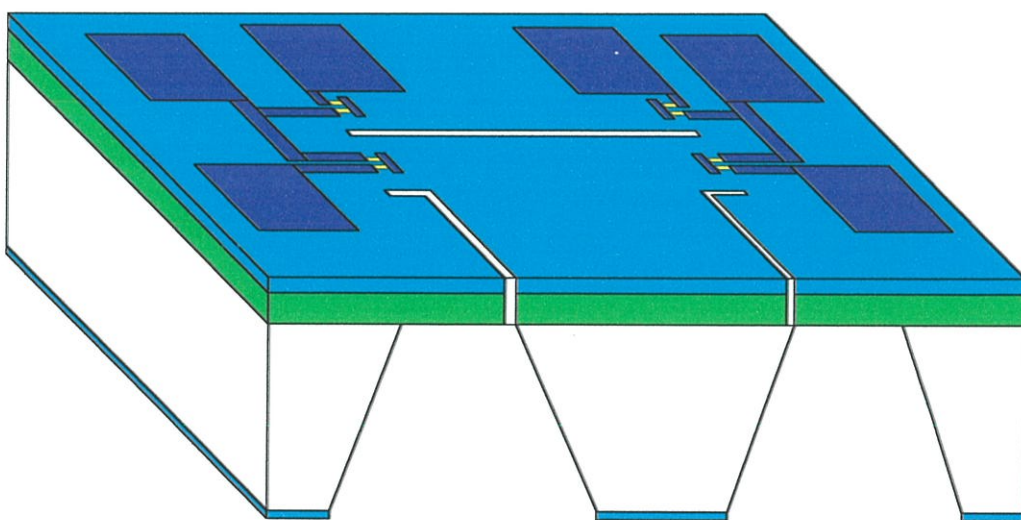
- (จ) - ทำการเปิดช่องออกได้ด้านหน้าแผ่นด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกมาสก์ที่ 3 และทำการกัดฟิล์มเพชรด้วยวิธี MPCVD เพื่อสร้างตัวต้านทาน



- (ฉ) - สร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธี PECVD และทำการเปิดช่องออกไซด์ด้านหน้าแผ่นด้วย กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกมาสก์ที่ 4 เพื่อทำการกัดฟิล์มเพชรด้วยวิธี MPCVD ซึ่งจะได้รูปทรงของคานตามที่ออกแบบ



- (ข) - สร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธี PECVD และทำการเปิดช่องออกไซด์ด้านหน้าแผ่นด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้ระยะจกมาสก์ที่ 5 เพื่อสร้างวินโดว์คอนแทค



- (ข) - สร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธี PECVD และทำการเปิดช่องออกไซด์ด้านหน้าแผ่นด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้ระยะจกมาสก์ที่ 6 เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าแล้วทำการซินเตอร์

รูปที่ 3.4 ลำดับกระบวนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

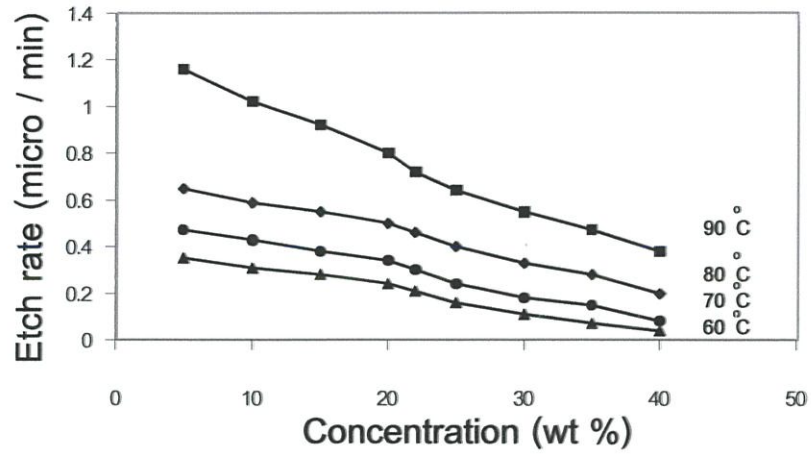
ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองเป็น 2 หัวข้อคือ 1) การกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH เพื่อนำไปสร้างมวลตรวจสอบ 2) การวัดและเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าบางประการของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

4.1 การทดลองการกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH

TMAH เป็นของแข็งมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีสภาพเป็นด่าง สามารถละลายน้ำได้ดี สารละลายใสไม่มีสี การทดลองหาพฤติกรรมการกัดนั้นจะเริ่มจากการเตรียมสารละลาย TMAH ในบีเกอร์และให้ความร้อนโดยใช้ Hot plate ทำการกวนสารละลายตลอดเวลาด้วยแท่งแม่เหล็กกวน ทำการทดลองกัดซิลิคอนชนิด p หนา 100) ซึ่งมีสภาพต้านทาน 3-6 โอห์ม. เซนติเมตร ต่อจากนั้นสร้างแพทเทิร์นทดสอบเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตรและยาว 2 มิลลิเมตรด้วยวิธีโฟโตลิโธกราฟีและใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหน้ากปกป้องกัน นั้นออกไซด์ดังกล่าวสร้างจากกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง 3 ชั่วโมงแล้วตามด้วยแบบชื้นและแบบแห้ง 2 และ 1 ชั่วโมงตามลำดับซึ่งจะให้ความหนาของออกไซด์ประมาณ 5,000 อังสตรอม แผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการกัดทำความสะอาดด้วยการต้มในกรดไนตริก 5 นาทีล้างน้ำ DI เป่าแห้งและล้างไขมันด้วยไตรคลอโรเอธิลีนและอะซิโตนล้างด้วยน้ำ DI และเป่าแห้ง จุ่มในสารละลาย HF 10% เป็นเวลา 15 วินาทีล้างด้วยน้ำ DI และเป่าแห้ง ส่วนการเตรียมสารละลาย TMAH ที่สภาวะต่าง ๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ระบบมีความเสถียร นอกจากนี้ได้ติดตั้งระบบกลั่นตัวกลับ (reflux system) เพื่อรักษาความเข้มข้นของสารละลายให้คงที่ตลอดการใช้งาน แล้วจึงเริ่มทำการกัดและสังเกตผล

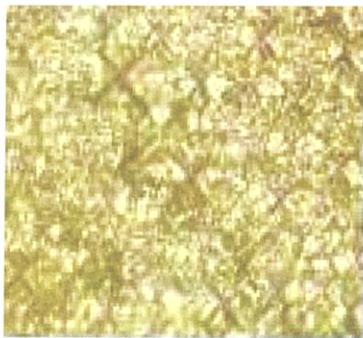
4.1.1 อัตราการกัดซิลิคอนในสารละลาย TMAH [12,13]

การหาอัตราการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH มีความสำคัญในอันดับต้น ๆ ของการหาคุณสมบัติของสารละลาย ดังนั้นจะทำการศึกษาหาอัตราการกัดโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 5-40 w% และในแต่ละความเข้มข้นจะทำการกัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ แตกต่างกันไปตั้งแต่ 60-90 องศาเซลเซียสและใช้เวลา 120 นาที แล้วทำการวัดอัตรา การกัดโดยใช้เครื่องวัดความหนา ซึ่งจะทำได้อัตราการกัดดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อัตราการกัดซิลิคอนในสารละลาย TMAH

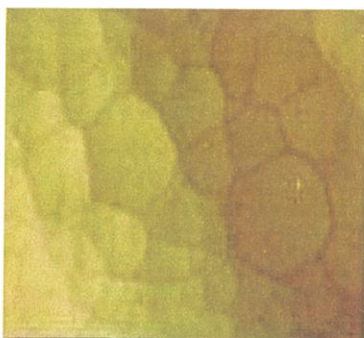
จากการทดลองนี้นอกจากจะได้อัตราการกัดซิลิคอนตามรูปที่ 4.1 แล้วยังได้ลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนอีกด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การพิจารณาเลือกใช้สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นที่ต้องการ โดยลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่นำมาแสดง จะใช้ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเท่านั้น



(ก) 5 wt%



(ข) 15 wt%



(ค) 20 wt%



(ง) 22 wt%



(จ) 25 wt%



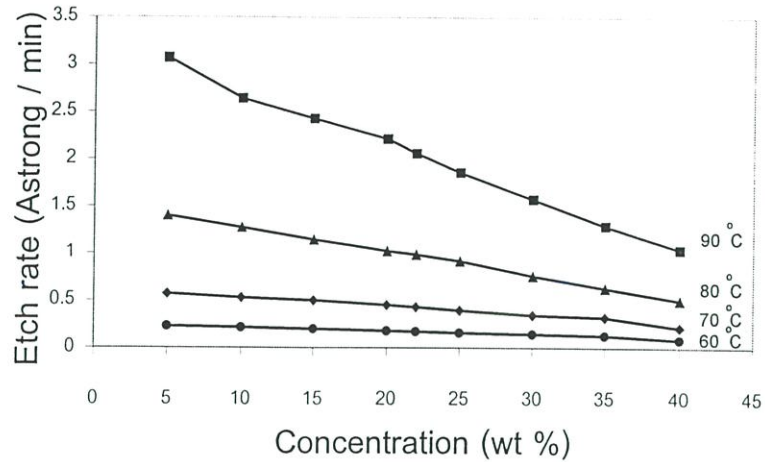
(ข) 30 wt%

รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่าอัตราการกัดซิลิคอนจะลดลงและพื้นผิวจะเรียบขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 5-15 wt% จะพบว่าลักษณะของพื้นผิวจะขรุขระและมีผลึกซิลิคอนที่เป็นรูปทรงปิรามิด (Pyramid hillock) ค่อนข้างหนาแน่นและมีขนาดใหญ่ซึ่งจะลดลงเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 20-40 wt% พื้นผิวและซิลิคอนที่ถูกกัดจะมีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบแต่ อัตราการกัดจะลดลงโดยจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งถ้าเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายมาก ๆ ก็จะทำให้อัตราการกัดนั้นต่ำมากเป็นผลให้ต้องเพิ่มเวลาในการกัดมากตามไปด้วย ดังนั้นจากการทดลองนี้เราจะเลือกความเข้มข้นของสารละลายที่ 22 wt% มาใช้งานเนื่องจากที่ความเข้มข้นนี้พื้นผิวจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และมีอัตราการกัดซิลิคอนประมาณ $0.72 \mu\text{m}/\text{min}$

4.1.2 อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ในสารละลาย TMAH

อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ในสารละลาย TMAH เป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญเนื่องจากในการกัดซิลิคอนจำเป็นต้องมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหน้ากปกป้องกันหรือจำกัดบริเวณที่จะทำการกัดดังนั้นพฤติกรรมในการการกัดก็มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะได้รู้ถึงอัตราในการกัดเพื่อที่จะได้สร้างซิลิคอนไดออกไซด์รองรับเอาไว้ไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่จะทำการสร้าง ซึ่งอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นไปดังรูปที่ 4.3 โดยจะทำการกัดตั้งแต่ความเข้มข้น 5-40 wt% และใช้อุณหภูมิ 60-90 องศาเซลเซียส

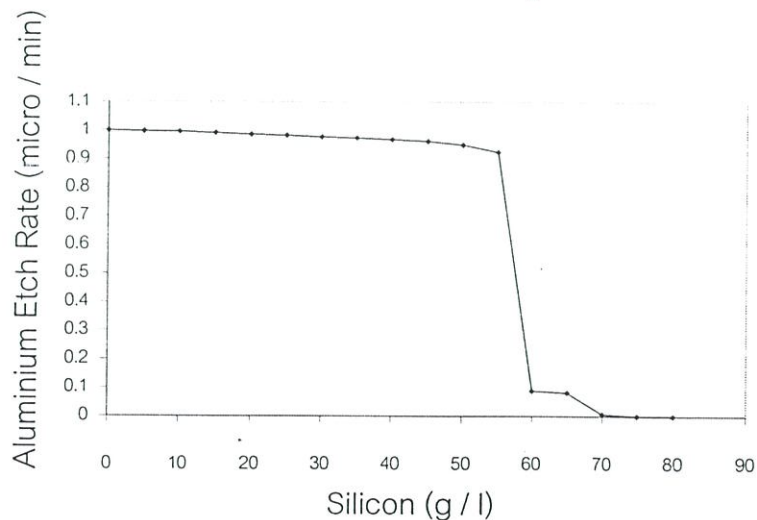


รูปที่ 4.3 อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ในสารละลาย TMAH

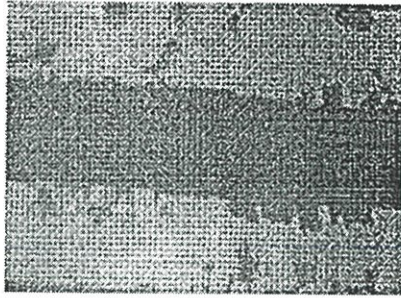
จากรูปที่ 4.3 อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ พบว่า อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์นั้นม้อัตราการกัดต่ำกว่าอัตราการกัดซิลิคอนถึง 4 ออร์เดอร์ (Order) และจากการทดลองอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์จะมากขึ้น เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายลงและ/หรือเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายขึ้น

4.1.3 อัตราการกัดอลูมิเนียมในสารละลาย TMAH [14]

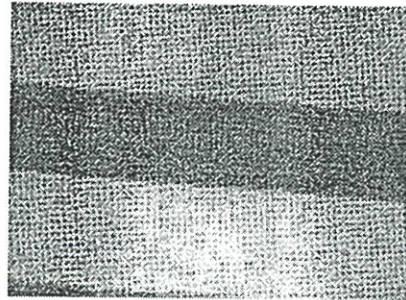
ในสารละลาย TMAH มีจุดเด่นกว่าสารละลายชนิดอื่นคือจะสามารถควบคุมอัตราการกัดโลหะอลูมิเนียมได้ซึ่งคุณสมบัตินี้ไม่พบในสารละลายชนิดอื่นไม่ว่าจะเป็น KOH และ EPD ดังนั้นในการศึกษานี้เป็นการนำเสนอสารละลายชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติ ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะอลูมิเนียม แต่ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับสภาพของสารละลายที่จะใช้ด้วย โดยในการทดลองจะใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 22 wt% อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และใช้ลวดลายอลูมิเนียมเป็นเส้นยาว 2,000 ไมครอน กว้าง 40 ไมครอน จากการทดลองจะได้ผลดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 อัตราการกัดอลูมิเนียมเมื่อเติมซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH



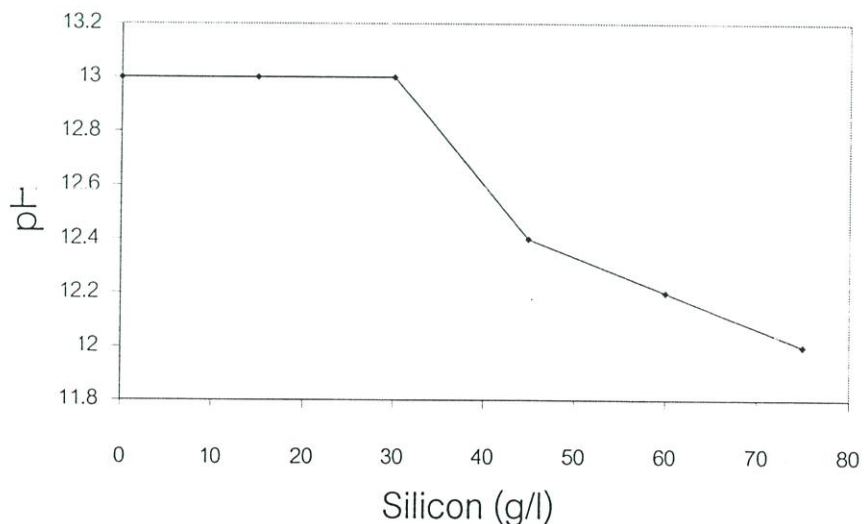
(ก) 0 g/l



(ข) 70 g/l

รูปที่ 4.5 ลักษณะของพื้นผิวโพลิอิมิดเมื่อเติมซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH

จากรูปที่ 4.4 พบว่าอัตราการกัดโพลิอิมิดจะลดลงเมื่อเติมผลึกซิลิคอนลงในสารละลาย โดยลักษณะของพื้นผิวโพลิอิมิดเมื่อเติมผลึกซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH จะเป็นดังรูปที่ 4.5 แต่จากการสังเกตจะพบอีกว่าในการเติมผลึกซิลิคอนลงไปทีปริมาณ 55 กรัมต่อลิตรจะพบว่าอัตราการกัดโพลิอิมิดจะลดลงเป็นอย่างมากทำให้และถ้าเติมผลึกซิลิคอนลงไปอีกที่ 70 กรัมต่อลิตรจะเห็นได้ว่า อัตราการกัดลดลงเกือบจะเข้าไปใกล้ศูนย์ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นจากรูปที่ 4.5 (ข) ว่าลักษณะพื้นผิวของโพลิอิมิดสมบูรณ์มากแม้เวลาจะผ่านไปถึง 30 นาที นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในการเติมผลึกซิลิคอนลงในสารละลายจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเติมผลึกซิลิคอน ดังรูปที่ 4.6 และลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการกัดมีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมผลึกซิลิคอนมากขึ้นลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนจะมีลักษณะขรุขระมากขึ้นเหมือนที่ความเข้มข้นของสารละลาย 5-15 wt% โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ค่าของ pH เมื่อเติมผลึกซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH



(ก) 0 g/l



(ข) 70 g/l

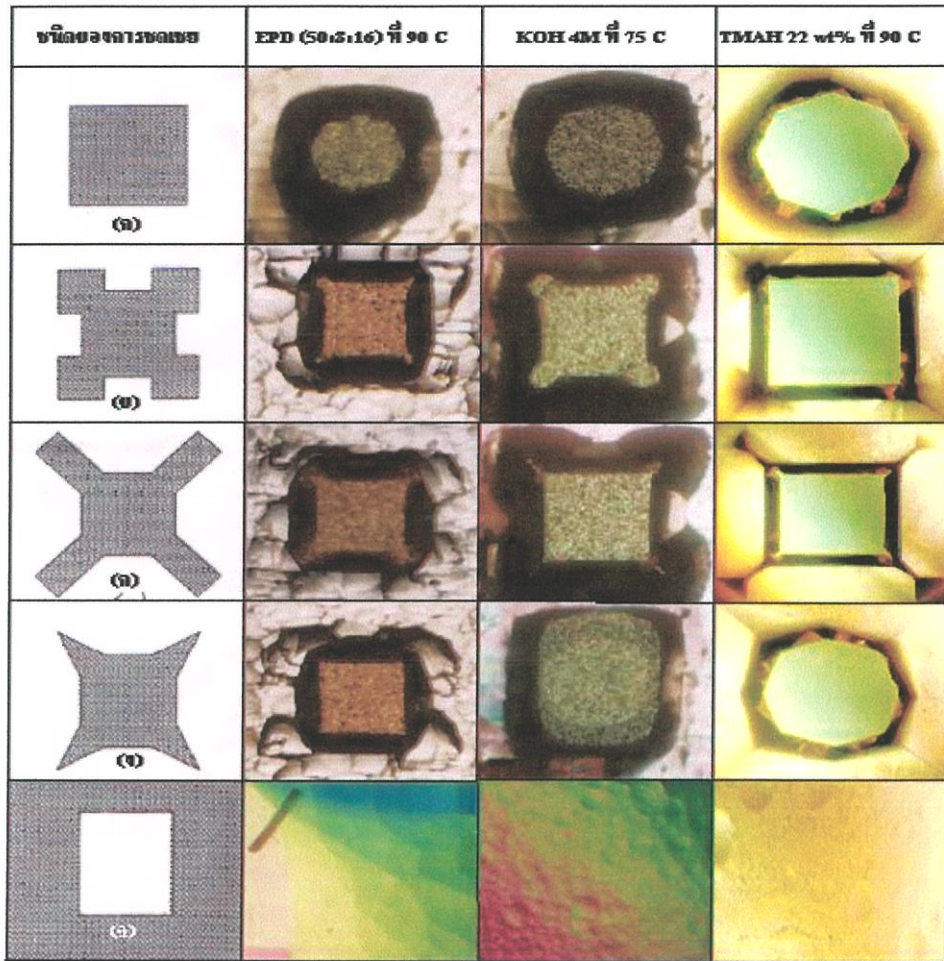
รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวซลิคอนเมื่อเติมผลึกซลิคอนลงในสารละลาย TMAH

4.1.4 ความสามารถในการขจัดเศษมุมของการการออกแบบมุมขจัดเศษแบบต่าง ๆ [11]

การทดลองได้ออกแบบแพทเทิร์นทดสอบขึ้นมา 3 แบบ โดยจะทำการเปรียบเทียบแพทเทิร์นทั้ง 3 แบบ จะต้องให้ผลลัพธ์เป็นเกาะสี่เหลี่ยม โดยในแต่ละแบบจะถูกนำไปกัดในสารละลายทั้ง 3 คือ EPD KOH และ TMAH ซึ่งแพทเทิร์นทั้ง 3 แบบ จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.8 (อยู่ถัดไปจากหน้า) จากรูปจะเห็นได้ว่าสารละลาย TMAH มีอัตราการเซาะมุมที่สูงมากกว่าสารละลายอีกสองชนิด ดังนั้นในการเลือกสารละลายใดไปใช้งานนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะนำไปใช้ เช่น ถ้าต้องการพื้นผิวหลังการกัดที่มีลักษณะค่อนข้างเรียบก็สมควรที่จะใช้สารละลาย TMAH เป็นต้น ส่วนอัตราการกัดซลิคอนในระนาบต่างๆจะเป็นไปตามตารางที่ 4.1 ซึ่งตารางนี้จะเป็นตัวช่วยบอกถึงอัตราการกัดของซลิคอนที่ระนาบต่างๆ

ตารางที่ 4.1 อัตราการกัดซลิคอน(ไมครอนต่อชั่วโมง)ในทิศทางต่างๆสำหรับสารละลายทั้ง 3 ชนิด

ระนาบ	EPD	KOH	TMAH
(111)	1	1	1
(110)	100	30	56
(100)	90	80	24



คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)



คือ บริเวณที่เปิดสู่สารละลาย

รูปที่ 4.8 การกัดแพทเทิร์นทดสอบด้วยสารละลายชนิดต่างๆเป็นเวลา 120 นาที

4.2 การวัดและเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

ตัวตรวจจับอัตราเร่งที่ได้จากการทดลองสร้างจะมีลักษณะเป็นไปตามรูปที่ 4.9 และขนาดต่างๆจะเป็นไปดังนี้

ขนาดของคาน

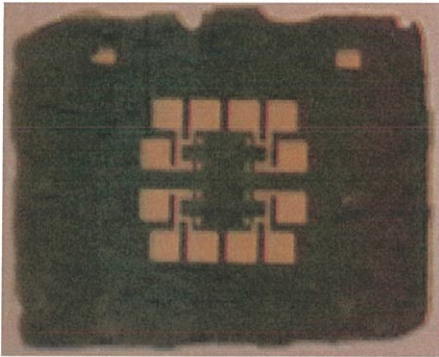
W กว้าง	440 ไมครอน
L ยาว	440 ไมครอน
h หนา(วัดจากเครื่องวัดความหนา)	10 ไมครอน
I_y โมเมนต์ของความเฉื่อย	1.257×10^{-20} กิโลกรัม

ขนาดของมวลตรวจสอบ (สมมติว่าการกัดได้มวลอย่างสมบูรณ์)

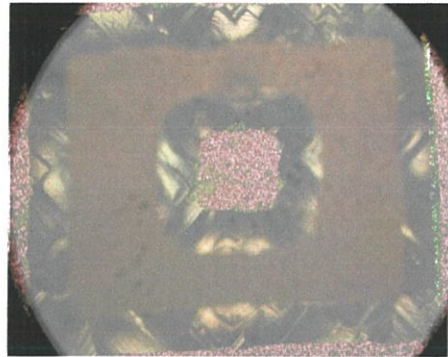
c_1 ความกว้างของมวลที่ฐาน	1400 ไมครอน
c_2 ความกว้างของมวลที่ปลายยอด	800 ไมครอน
h_{wafer} ความหนาของแท่นซิลิคอน	440 ไมครอน
M_0 มวล (คำนวณ)	1.238 มิลลิกรัม

ความต้านทานเพียโซ

R ความต้านทาน	48 กิโลโอห์ม
L_r ความยาวตัวต้านทาน	200 ไมครอน
W_r ความกว้างตัวต้านทาน	40 ไมครอน



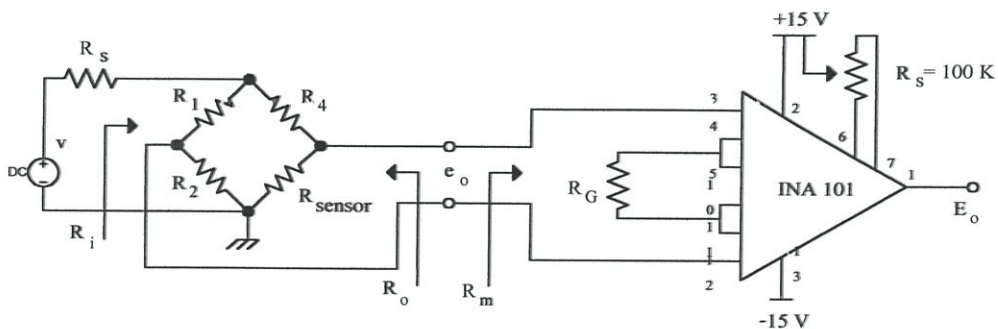
(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

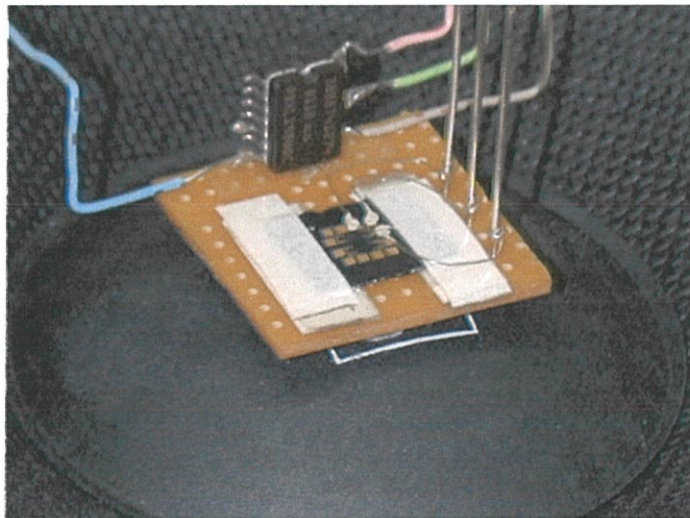
รูปที่ 4.9 ลักษณะของตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างได้

ก่อนจะนำชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งไปวัดสัญญาณจะต้องตัวต้านทานเข้ากับวงจรวีธโตนบรีดจ์ ซึ่งจะต่อสัญญาณออกไปสู่วงจรขยายดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงจรขยายแรงดันอินเออร์ทพุท

ด้านหลังของชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งจะถูกติดอยู่กับชิพซิลิกอนอีกชิ้นหนึ่งซึ่งกัดเป็นหลุมสี่เหลี่ยมลึกประมาณ 10 ไมครอน หลุมเหล่านี้จะอนุญาตให้มวลตรวจสอบของชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งแกว่งขึ้นลงอย่างอิสระภายในขอบเขต 10 ไมครอน ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแกว่งมากเกินไปที่ความถี่กำทอน ส่วนด้านบนของชิพจะไม่ปิดฝาไว้ ทั้งนี้เนื่องจากต้องการทดสอบความไวต่อแรงกระตุ้นภายนอกขนาดเล็กซึ่งได้เลือกใช้ลำโพงรถยนต์ช่วยเสียงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานกระตุ้น และต่อเชื่อมลำโพงกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ สัญญาณที่ส่งออกจากวงจรบริคซ์และส่งผ่านเข้าวงจรขยายอินสตรูเมนต์และบันทึกสัญญาณด้วยดิจิตอลสโตรีจสโคป (Digital Storage Scope)



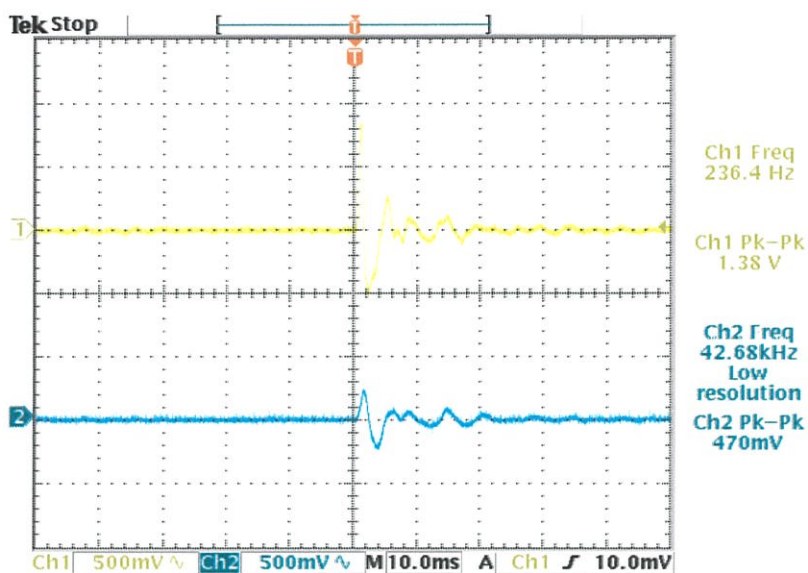
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างได้กับ ADXL 190 ขณะติดตั้งบนลำโพง

ในรูปที่ 4.11 เป็นการจัดการทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างขึ้นเทียบกับตัวตรวจจับอัตราเร่งที่ขายในท้องตลาดของบริษัท Analog Device โดยใช้ตัวตรวจจับอัตราเร่งเบอร์ ADXL 190 ซึ่งจะทำให้การติดตัวตรวจจับอัตราเร่งทั้ง 2 ให้อยู่บนลำโพง ขณะทำการวัดโดยจะให้ ADXL 190 อยู่ในช่องสัญญาณที่ 1 ของดิจิตอลสโตรีจสโคป (Digital Storage Scope) ส่วนตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างขึ้นจะอยู่ในช่องสัญญาณที่ 2 จากนั้นทำการจ่ายสัญญาณเข้าให้กับลำโพง ขนาด 10 โวลต์ ที่ความถี่ 10 Hz ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณดังรูปที่ 4.12 จากรูปนี้จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณตอบสนองที่จริงจะมียอดคลื่นแผ่มาก ซึ่งเกิดจากการมอดูเลตของสัญญาณรวมกับสัญญาณตอบสนองเชิงกลของตัวอุปกรณ์ ในการวิเคราะห์จะสร้างกรอบคลื่น (Envelop) ของสัญญาณขึ้นเพื่อแสดงการตอบสนองเชิงกลของระบบโดยสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

Logarithmic decrement

นำค่าสูงสุดในคาบที่ n หารด้วย แอมพลิจูดของคาบต่อไปจะเป็นการทดสอบค่า logarithmic decrement ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.21) และ (2.22) การวิเคราะห์แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\delta = \ln \frac{Y_m(n)}{Y_m(n+1)} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.22)$$



รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์สัญญาณการตอบสนองต่ออัตราเร่ง

ซีกบวของอุปกรณ์ที่สร้าง

แอมพลิจูดลูกที่	Vp(mV)	δ	ζ
1	240	1.098	0.171
2	80		
3	70	0.133	0.020
4	80	-0.133	-0.020

ซีกลบ

แอมพลิจูดลูกที่	Vp(mV)	δ	ζ
1	240	2.484	0.387
2	20		
3	60	-1.098	-0.171
4	40	0.405	0.063
	เฉลี่ย	0.4815	0.075

จากกราฟ $\omega_D = 42.68 \text{ kHz}$ จากสมการ $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ จะได้ $\omega_n = 42.80 \text{ kHz}$
 จากกราฟจะพบว่าความถี่ขณะเกิดความหน่วงเท่ากับ 42.68 kHz ซึ่งสามารถคำนวณความถี่ธรรมชาติตามสมการ 2.19 ได้เท่ากับ 42.80 kHz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่เมื่อเกิดการหน่วง

การเปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับอัตราเร่งเพื่อหาความไวต่ออัตราเร่งนั้นจะใช้วิธีเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดของคลื่นพัลส์ที่จ่ายให้กับลำโพงแล้ววัดการตอบสนองของลำโพง แรง F ที่เกิดจากพลังงานเสียง (หรือความดันอากาศ) ที่ให้แก่ระบบจะทำให้มวล M เกิดการเหตเท่ากับ y_m ดังสมการต่อไปนี้

$$y_M(t) = \frac{F}{M\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t) \quad (4.1)$$

แรงที่กระทำต่อระบบนี้จะทำให้เกิดระยะขจัดสูงสุด y_{Max} ตรงกับคลื่นลูกแรกที่เวลา $T_D/4$ ซึ่ง y_M จะมีค่าดังนี้

$$y_M\left(\frac{T_D}{4}\right) = \frac{F}{M\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n \frac{T_D}{4}} \quad (4.2)$$

และเนื่องจากคุณสมบัติของตัวตรวจจับอัตราเร่งจากสมการที่ (2.19) การเหของมวล M จะประมาณเท่ากับอัตราเร่งของวัตถุที่ตรวจสอบอัตราเร่งคงความสัมพันธ์ $-\omega_n^2 y_M \approx a$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.58 และ 2.17 การเหจะทำให้ความต้านทานของตัวตรวจจับอัตราเร่งเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\Delta R/R$ ดังนี้

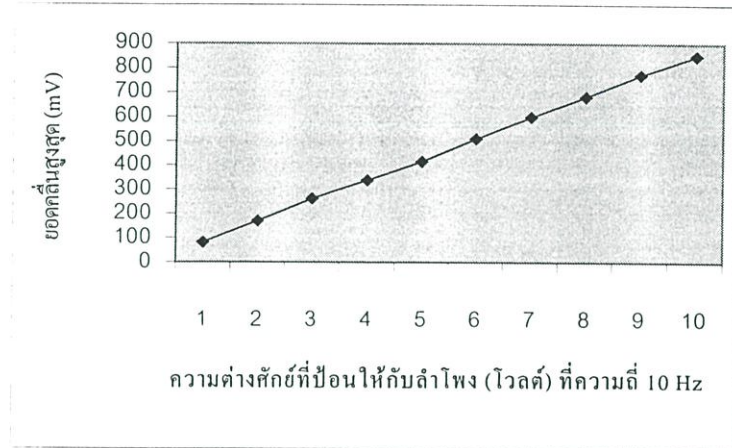
$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\pi_l M \omega_n^2}{4I_z} \left[\frac{3h}{2} \left(\frac{l - \left(\frac{a+b}{2}\right)}{12} \right) \right] \left[\frac{3Lx^2 - 2x^2}{12} \right] y_M \quad (4.3)$$

เมื่อนำตัวต้านทานเพียโซบนคานยื่นของอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่งไปต่อเข้ากับวงจรวิศโคนบริคจ์ตามรูปที่ 5.26 โดยให้ตัวต้านทานทุกตัวมีค่าเท่ากัน เมื่อนำสมการที่ (5.2) แทนค่าลงในสมการ (5.3) โดยอ้างอิงจากสมการที่ (2.55) สัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าดังนี้

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\pi_l M \omega_n^2}{4I_z} \left[\frac{3h}{2} \left(\frac{l - \left(\frac{a+b}{2}\right)}{12} \right) \right] \left[\frac{3Lx^2 - 2x^2}{12} \right] \frac{e^{-\zeta\omega_n \frac{T_D}{4}}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4.4)$$

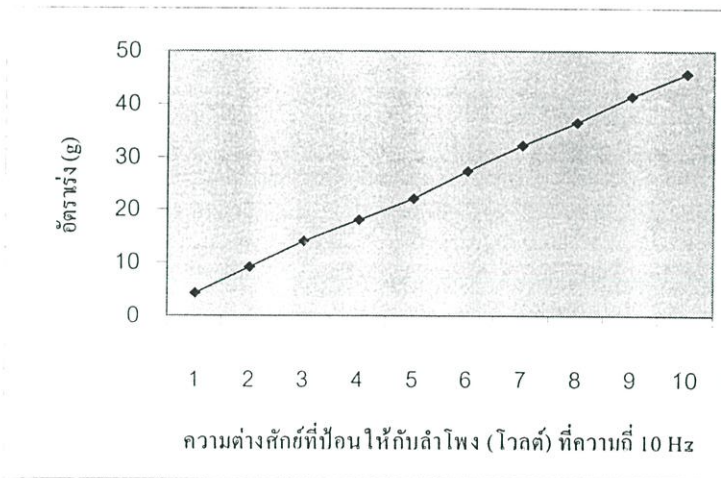
เรียก S_F ว่าความไวต่อแรงมีหน่วยเป็น โวลต์ต่อนิวตัน

จากการทดลองป้อนความต่างศักย์ให้กับลำโพงที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ โดยกำหนดให้ความถี่ 10 Hz และอ่านค่ายอดคลื่นสูงสุดของตัวตรวจจับอัตราเร่งเพื่อหาค่าอัตราเร่งมาตรฐานของ ADXL 190 ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 4.13



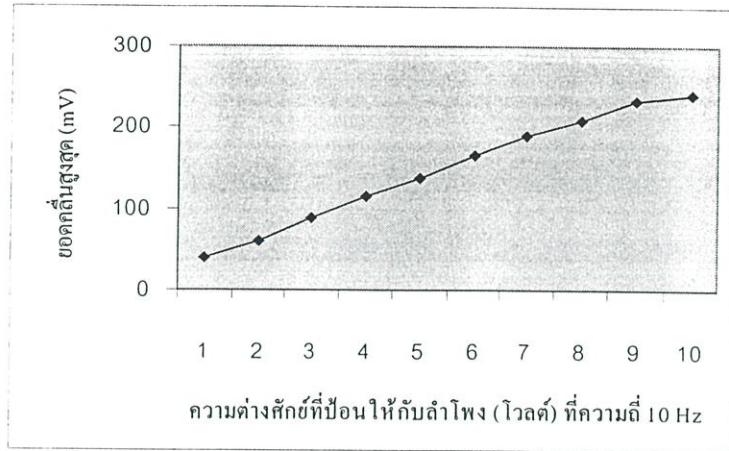
รูปที่ 4.13 ค่ายอดคลื่นสูงสุดของ ADXL 190 เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ให้กับลำโพง

ค่ายอดคลื่นสูงสุดที่ได้จากรูปที่ 4.13 สามารถนำไปสู่การหาค่าอัตราเร่งของอุปกรณ์ได้โดยเป็นไปตามรูปที่ 4.14

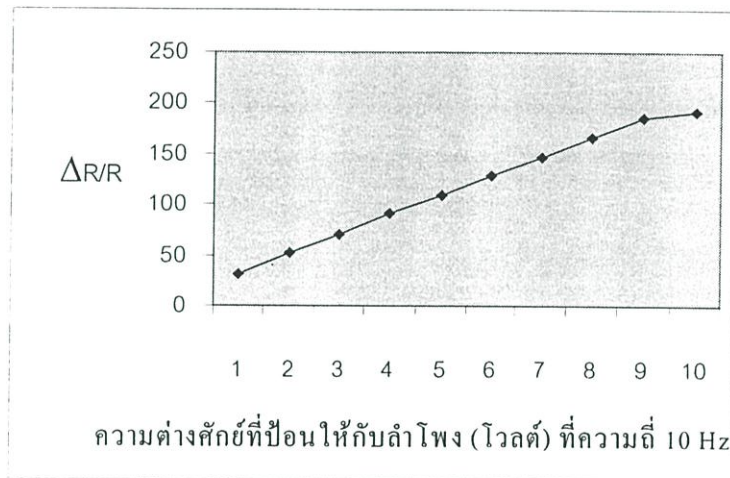


รูปที่ 4.14 ค่าอัตราเร่งของ ADXL 190 เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ให้กับลำโพง

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะทำให้เราทราบถึงอัตราเร่งจริงที่กระทำกับตัววัดอัตราเร่งดังนั้นจะสามารถนำค่าที่ได้มาทำการสอบเทียบกับอุปกรณ์ที่ทำการสร้างขึ้น โดยจะทำการติดตั้งตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเข้ากับลำโพง ซึ่งในการติดตั้งและวัดจะทำการวัดค่าสัญญาณยอดคลื่นสูงสุดของ ADXL190 และอุปกรณ์ที่สร้างไปพร้อมๆ กัน ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณดังรูปที่ 4.12 จากการทดลองจะได้ค่ายอดคลื่นสูงสุดเป็นไปตามรูปที่ 4.15 และได้ค่า $\Delta R/R$ ดังรูปที่ 4.16

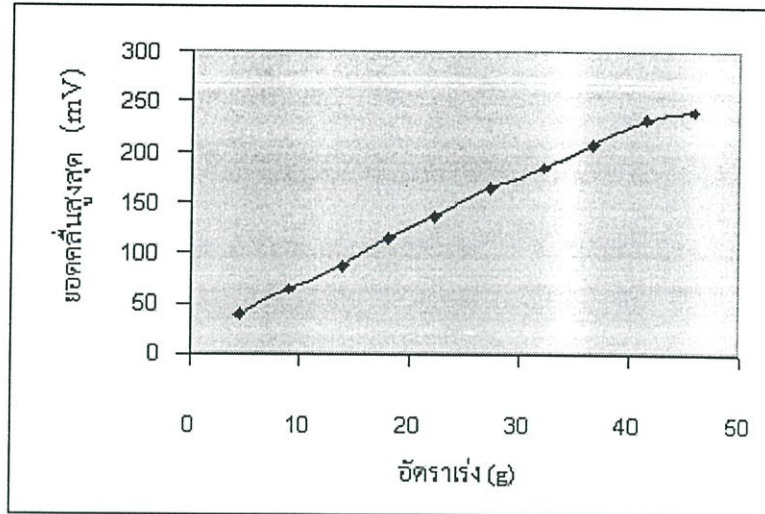


รูปที่ 4.15 ค่ายอดคลื่นสูงสุดของอุปกรณ์ที่สร้างเมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ให้กับลำโพง



รูปที่ 4.16 ค่า $\Delta R/R$ ของอุปกรณ์เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ให้กับลำโพง

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 สามารถสรุปค่าความสัมพันธ์ระหว่างยอดคลื่นสูงสุดของตัวอุปกรณ์กับอัตราเร่งได้ดังรูปที่ 4.17 โดยจะนำค่ายอดคลื่นสูงสุดของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเทียบกับอัตราเร่งที่ได้จาก ADXL 190 เมื่อป้อนความต่างศักย์ต่างๆ ให้กับลำโพง ซึ่งเป็นผลทำให้ได้ค่าความไวในการตอบสนองต่ออัตราเร่งของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.17 ค่าความไวในการตอบสนองต่ออัตราเร่ง

จากรูปที่ 4.17 พบว่าขนาดของยอดคลื่นสูงสุดจะตอบสนองต่ออัตราเร่งค่อนข้างเป็นเชิงเส้น โดยตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างขึ้นสามารถตรวจจับอัตราเร่งได้ตั้งแต่ 4.394 g จนถึง 45.551 g และมีความไวตอบสนองเท่ากับ 9.718 m V/g ดังนั้นสามารถสรุปคุณสมบัติเฉพาะของตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างขึ้นได้ดังนี้

1. อัตราเร่งน้อยที่สุดที่สามารถตรวจจับได้ (Minimum Detectable Signal) 4.394 g
2. ระยะเหของมวลน้อยที่สุดที่ตรวจจับได้ (Minimum Detectable Deflection) 0.0223 μm
3. ความถี่ธรรมชาติของระบบ 45.80 kHz
4. ขนาดของมวล 1.238 mg

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเสนอแนะ และวิเคราะห์เทคนิควิธีการในการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่ง ซึ่งมีโครงสร้างที่เกิดจากการกัดแผ่นซิลิคอนด้านหลังมาบรรจบกับด้านหน้า โดยจะกล่าวถึงคุณลักษณะต่างๆ ของสารละลาย TMAH

ปัจจัยหลักสำหรับการสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่งในวิทยานิพนธ์นี้คือ การควบคุมการกัดมวลให้ได้รูปทรงที่ต้องการโดยใช้สารละลาย TMAH จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติในการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH จะมีอัตราการกัดซิลิคอนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่ถ้าอัตราการกัดสูงมากขึ้นเรื่อยๆ จะพบว่า พื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดจะขรุขระมากขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกัน ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ขึ้นเรื่อยๆ อัตราการกัดซิลิคอนจะมีค่าลดลงและยังเป็นผลให้พื้นผิวซิลิคอนมีลักษณะที่เรียบขึ้นเรื่อยๆ โดยการทดลองได้ศึกษาอัตราการกัดซิลิคอนที่อุณหภูมิ 60-90 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารละลาย TMAH จาก 5-40 wt% นอกจากนี้จะทำการศึกษาอัตราการกัดซิลิคอนแล้วยังได้ศึกษาอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วย โดยอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์นั้นจะมีค่าต่ำมากๆ (ประมาณ 2 อังสตรอม) ซึ่งจะต่ำกว่าประมาณ 4 ออร์เดอร์ (Order) เมื่อเทียบกับอัตราการกัดซิลิคอน (0.72 ไมครอน ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นสารละลาย 22 wt%) จากการศึกษาพบว่าสารละลาย TMAH สามารถลดอัตราการกัดอลูมิเนียมได้โดยการเติม ซิลิคอนลงในสารละลายให้มากกว่า 65 g/l จะทำให้อัตราการกัดอลูมิเนียมลดลงจาก 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ ไปเป็น 0.01 $\mu\text{m}/\text{min}$ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเพิ่มอีกโดยทำการวัดค่า pH และลักษณะของพื้นผิวซิลิคอน เมื่อเติมซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH เพื่อลดอัตราการกัดอลูมิเนียม พบว่าค่า pH ของสารละลายลดลงจาก pH 13 ไปเป็น pH 12 และลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการกัดมีลักษณะที่ขรุขระมากขึ้นเรื่อยๆ จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ทำให้เกิดแนวคิดว่า ถ้าจะใช้กรดเติมลงในสารละลายแทนจะได้อะไรหรือไม่ ซึ่งจะต้องทำการศึกษาต่อไปในอนาคต ในส่วนสุดท้ายของการศึกษาคุณลักษณะของสารละลาย TMAH ได้ทำการทดสอบการชดเชยมุมของการออกแบบมุมชดเชยต่างๆ ของสารละลาย 3 ชนิด คือ EPD KOH และ TMAH จากการศึกษาพบว่า การชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยมนั้นจะสามารถลดการชดเชยมุมได้น้อยที่สุด ส่วนการชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะลดการชดเชยมุมได้มากที่สุด และยังพบว่าสารละลาย TMAH มีการชดเชยมุมมากที่สุด ซึ่งการชดเชยมุมที่มากนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กัดอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่ง เพราะจะทำให้ต้องออกแบบมุมชดเชยให้มากพอ ซึ่งจะให้อุปกรณ์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น แต่ด้วยลักษณะที่เด่นอื่นๆ เช่น การไม่กัดอลูมิเนียม พื้นผิวซิลิคอนที่ทำการกัดเรียบมาก ไม่มีสารพิษตกค้าง ไม่มีไอออนบวกตกค้าง

และยังเข้ากันได้กับกระบวนการผลิต CMOS ซึ่งคุณลักษณะต่างๆ ที่กล่าวมานี้ ไม่พบในสารละลาย EPD และ KOH ดังนั้นจึงได้นำสารละลาย TMAH มาใช้แทน

ตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างขึ้นมีขนาดความกว้างของคานเท่ากับ 440 ไมครอน และมีความยาว 440 ไมครอน ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุต จากวงจรวิธสโตนบริดจ์ ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะเชิงกล ของตัวตรวจจับอัตราเร่ง โดยเริ่มจากการให้อิมพัลส์ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของลำโพงแก่คานและมวลโดยตรง ซึ่งสามารถคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบเท่ากับ 45.80 กิโลเฮิร์ตซ์ และจากการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นกับชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งจากบริษัท Analog Device เบอร์ ADXL 190 ซึ่งจะได้อัตราเร่งที่ตรวจจับได้ และเป็นเชิงเส้นตั้งแต่ 4.394 - 45.551 g และสามารถคำนวณความไวต่ออัตราเร่งได้ 9.718 mV/g จากการทดลองวัดในวิทยานิพนธ์นี้ มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ โดยสิ่งหนึ่งที่ควรแก้ไขเป็นอย่างยิ่ง คือ การเก็บบรรจุอุปกรณ์ ซึ่งนอกจากจะสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์แล้วยังมีผลจากสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบๆ ตัวอุปกรณ์ด้วย

การสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสม รวมทั้งเทคนิคและกระบวนการสร้างต่างๆ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องวิจัยค้นคว้า และพัฒนาต่อไปเพื่อให้สามารถสร้างเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปสู่กระบวนการสร้างที่มีมาตรฐาน และมีผลผลิตทางอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศรีเมฆ รัตนชัย. “เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิคอน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [2] James W. Dally , Wolliam F. Riley , Kenneth G. McConnell. Instrumentation for Engineering Measurements. 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [3] A. Lettington and J.W. Steeds. Thin Film Diamond. Great Britain : Chapman & Hall for The Royal Sociely. 1994.
- [4] Lawrence S. Pan , Don R. Kania. Diamond : Electronic Properties and Applications. Massachusetts : Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [5] รศ. จำรูญ ตันติพิศาลกุล. กลศาสตร์ของแข็ง. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ. 1992.
- [6] L.M. Roylance., J.B. Angell. “A Batch-Fabrication Silicon Accelerometer.” , IEEE Trans. Electron Devices , 1979, pp. 1911-1917.
- [7] S.M. Sze. Semiconductor Sensors. JOHN WILEY & SONS, INC. 1994.
- [8] Matthias W., Mario A., Peter G., and Erhard K. “Review on Diamond Based Piezoresistive Sensors.” IEEE , 1998, pp. 147-152.
- [9] Taher I., Aslam M., Tamor M.A., Poter T.J. and Elder R.C. “Piezoresistive Microsensors using P-type CVD Diamond Films.” Sensors and Actuators A45, 1994, pp. 35-43.
- [10] R.P. van Kampen amd R.F. Wolffenbuttel., “Modeling the Mechanical Behavior of Bulk-Micromachined Silicon Accelerometer.” Sensor and Actuators A64, 1998, pp. 137-150.
- [11] Göpel W., Hesse J., Zemel J.N., Grandke T., Ko W.H. Sensors. Volume 1. Weingeim : VCH. 1989.
- [12] Göpel W., Hesse J., Zemel J.N., Bau H.H., deRooij N.F., Kloeck B. Volume 7. Weingeim : VCH. 1994.
- [13] Osamu Taata., Ryouji Asahi., Hirofumi Funabashi., Keiichi Shimaoka., Susumu Sugiyama. “Anisotropic Etching of Silicon in TMAH Solutions.” Sensor and Actuator A34, 1992, pp. 51-57.

- [14] Knut Liant., Stewart Smith., A.J. Walton., Alan Gundlach., Tom Stevenson.
“Characterization of Aluminium Passivation for TMAH Based Anisotropic Etching for MEMS Application.” IEEE(ICMTS), 2000, pp, 210-214.
- [15] เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์. “ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเพียโซรีซีฟที่ปบนฟิล์มบางเพชร.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [16] Lynn Michelle Roylance. A Miniature Integrated Circuit Accelerometer for Biomedical Applications. Michigan : University Microfilms International. 1981.

ภาคผนวก

รายละเอียดของตัวตรวจจับอัตราเร่ง ADXL 190



Low Cost $\pm 100 g$ Single Axis Accelerometer with Analog Output

ADXL190*

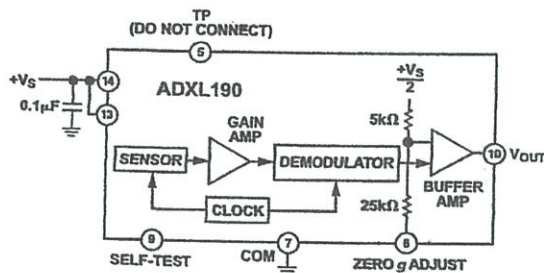
FEATURES

iMEMS® Single Chip IC Accelerometer
 40 Milli-g Resolution
 Low Power 2 mA
 400 Hz Bandwidth
 +5.0 V Single Supply Operation
 2000 g Shock Survival

APPLICATIONS

Shock and Vibration Measurement
 Machine Health
 Shipping Recorders
 Military Fuze, Safe and Arm

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



GENERAL DESCRIPTION

The ADXL190 is a complete acceleration measurement system on a single monolithic IC. It contains a polysilicon surface-micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open-loop acceleration measurement architecture. The ADXL190 is capable of measuring both positive and negative accelerations up to $\pm 100 g$, making it suitable for shock and vibration measurement.

Typical noise floor is $4 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$ allowing signals below 40 milli-g to be resolved. The ADXL190 can measure both dynamic accelerations, (typical of vibration) or static accelerations, (such as inertial force or gravity).

The ADXL190 has a two-pole Bessel switched-capacitor filter. Bessel filters, sometimes called linear phase filters, have a step response with minimal overshoot and a maximally flat group

delay. The -3 dB frequency of the poles is preset at the factory to 400 Hz. These filters are also completely self-contained and buffered, requiring no external components.

The product features a built-in self-test feature that exercises both the mechanical structure and electrical circuitry. When triggered by a logic high on the self-test pin, an electrostatic force acts on the beam equivalent to approximately 20% of full-scale acceleration input, and thus a proportional voltage change appears on the output pin. No external components other than a decoupling capacitor are required.

The ADXL190 is available in a hermetic 14-lead surface mount cerpak, specified over the -40°C to $+105^\circ\text{C}$ temperature range.

*Patent Pending.

iMEMS is a registered trademark of Analog Devices, Inc.

REV. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>
 Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

ADXL190—SPECIFICATIONS ($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , $V_S = +5$ V, Acceleration = 0 g unless otherwise noted)

Parameter	Conditions	ADXL190WQC			Units
		Min	Typ	Max	
SENSOR INPUT					
Dynamic Range ^{1, 2, 3}	Without Zero-g Adjust	±105			g
Alignment Error			±1		Degrees
Nonlinearity			0.2		%
Cross Axis Sensitivity			±2		%
SENSITIVITY					
Initial ⁴	Ratiometric Δ from +25°C	16.5	18.0	19.5	mV/g
Temperature Drift ⁵			±0.5		%
ZERO g BIAS LEVEL					
Initial ^{2, 3}	Ratiometric Δ from +25°C	2.3	2.5	2.7	V
0 g Offset vs. Temperature ⁵			1.0		g
Zero g Adjustment Gain		0.45	0.50	0.55	$\Delta V_{OUT}/\Delta V$ 0 g Adjust
Zero g Adjust Pin Input Impedance		20	30	40	kΩ
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density			4	12	mg/√Hz rms
FREQUENCY RESPONSE					
3 dB Bandwidth		360	400		Hz
Sensor Resonant Frequency			24		kHz
SELF-TEST					
Output Change ⁶		450		990	mV
Logic "1" Voltage		3.5			V
Logic "0" Voltage				1.0	V
Input Impedance			50		kΩ
ANALOG OUTPUT					
Output Voltage Range	$I_{OUT} = \pm 100 \mu A$	0.25		$V_S - 0.25$	V
Capacitive Load Drive		1000			pF
POWER SUPPLY					
Specified Performance		4.75		5.25	V
Quiescent Supply Current			2.0	5.0	mA
TEMPERATURE RANGE					
Specified Performance		-40		+105	°C

NOTES

¹Product is tested at ±50 g, and the combination of 0-g error, sensitivity error, and output voltage swing measurements provide the calculations for dynamic range.
²0-g is nominally $V_S/2$. Use of the 0-g adjustment pin is used to null the 0-g error, resulting in increased dynamic range. It can also be used to create an asymmetrical dynamic range if so desired.

³The output response is ratiometric and is described by the following equation. $V_{OUT}(\text{accel}, V_S) = [V_S/2 \pm (a V_S/5 V)] + \{(\text{accel}) (b V_S + c V_S^2)(1 \pm 0.08)\}$
 Where $a = 0.2$ V, $b = 2.712 \times 10^{-3}$ 1/g, $c = 0.178 \times 10^{-3}$ 1/g².
 Measured at 100 Hz, ±50 g.

⁴Specification refers to the maximum change in parameter from its initial value at +25°C to its worst case value at T_{MIN} or T_{MAX} .
⁵ST pin Logic "0" to "1"; $\Delta V_{OUT} = (\Delta V_{OUT} @ 5 V) \times (V_S/5 V)$.

All min and max specifications are guaranteed. Typical specifications are not tested or guaranteed.
 Specifications subject to change without notice.

ADXL190

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Acceleration (Any Axis, Unpowered for 0.5 ms)2000 g
Acceleration (Any Axis, Powered for 0.5 ms)1000 g
+V _S-0.3 V to +7.0 V
Short Circuit Duration (Any Pin to Common) Indefinite
Operating Temperature-55°C to +125°C
Storage Temperature-65°C to +150°C

*Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; the functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Drops onto hard surfaces can cause shocks of greater than 2000 g and exceed the absolute maximum rating of the device. Care should be exercised in handling to avoid damage.

PIN FUNCTION DESCRIPTIONS

Pin No.	Function
1, 2, 3, 4, 6, 11, 12	No Connect
5	Test Point (Do Not Connect)
7	Common
8	Zero g Adjust
9	Self-Test
10	V _{OUT}
13, 14	V _S

PACKAGE CHARACTERISTICS

Package	θ_{JA}	θ_{JC}	Device Weight
14-Lead Cerpak	+110°C/W	+30°C/W	5 Grams

PIN CONFIGURATION

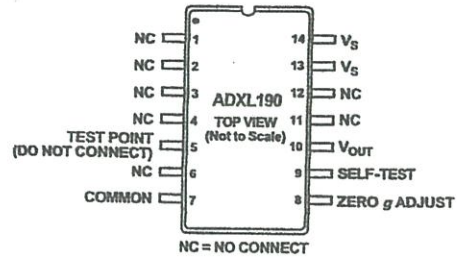


Figure 1 shows the response of the ADXL190 to the earth's gravitational field. The output values shown are nominal. They are presented to show the user what type of response to expect from each of the output pins due to changes in orientation with respect to the earth.

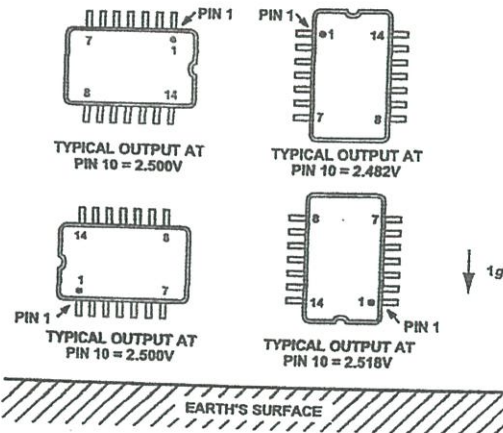


Figure 1. ADXL190 Response Due to Gravity

ORDERING GUIDE

Model	# Axis	Specified Voltage	Temperature Range	Package Description	Package Option
ADXL190WQC	1	+5 V	-40°C to +105°C	14-Lead Cerpak	QC-14

CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the ADXL190 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



ADXL190

APPLICATIONS

All the circuitry needed to drive the sensor and convert the capacitance change to voltage is incorporated on-chip requiring no external components except for standard power supply decoupling. Both sensitivity and the zero- g value are ratiometric to the supply voltage, so that ratiometric devices following the accelerometer (such as an ADC, etc.) will track the accelerometer if the supply voltage changes. The output voltage (V_{OUT}) is a function of both the acceleration input (a) and the power supply voltage (V_S) as follows:

$$V_{OUT} = V_S/2 - (\text{Sensitivity} \times V_S/5 \text{ V} \times a)$$

Adjusting the 0 g Bias Level

In some cases the user may have an asymmetrical input or may want to fine adjust the zero- g output level to obtain maximum dynamic range. The zero- g level is adjusted by supplying a voltage to the zero- g adjustment pin (see Figure 2).

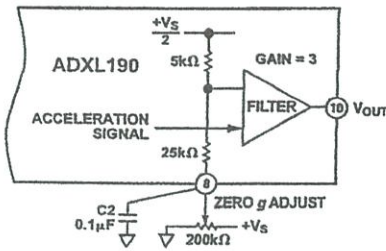


Figure 2. Optional Zero- g Adjust Circuit Detail

Any voltage difference between the zero- g adjustment pin and $V_S/2$ is reduced by a factor of 6 by the internal resistor divider. This is then gained by the factor of 3 in the output stage for a total gain of 0.5 for the zero- g adjustment. (Note: The ratio of the resistors in the divider is consistent from part-to-part; however, the absolute values can have a $\pm 30\%$ tolerance). The zero- g adjustment voltage can be set up by a variety of methods including a potentiometer (as shown in Figure 2), a PWM signal, or with a simple three-state output.

The simplest way is by adding a resistor between the ZERO g ADJUST pin and V_S or ground. The output will be offset by:

$$\text{Offset (V)} = (7.5 \times V_S)/(30 + R)$$

where R is in $k\Omega$ and connected to V_S .

$$\text{Offset (V)} = (-7.5 \times V_S)/(30 + R)$$

where R is in $k\Omega$ and connected to ground.

Resistors may also be connected to microcontroller I/O pins as shown in Figure 3. Using two I/Os that may be set to V_S , ground, or three-state, there are seven possibilities as shown in Table I (one cannot set one I/O pin to V_S and the other to ground). Using such a system, any ADXL190 may be user trimmed to output $2.5 \text{ V} \pm 35 \text{ mV}$ at zero g .

Table I. Offsets Produced Using the Circuit in Figure 3 for $V_S = 5 \text{ V}$

P1	P0	Offset Voltage Produced	Offset in g
Three-State	Three-State	0 mV	0
Three-State	0	-71 mV	-4
0	Three-State	-134 mV	-7.4
0	0	-191 mV	-10.6
Three-State	1	71 mV	4
1	Three-State	134 mV	7.4
1	1	191 mV	10.6

Another way to adjust the zero g offset is to supply a voltage to the ZERO g ADJUST pin. The difference between $V_S/2$ and the voltage at the ZERO g ADJUST pin is reduced by a factor of 6 (as a result of the internal $5 \text{ k}\Omega$ and $25 \text{ k}\Omega$ voltage divider) and then multiplied by a factor of 3 in the output stage of the ADXL190 resulting in a total gain of 0.5. Offset is thus described by the following equation:

$$\text{Offset (V)} = (\text{Voltage at the ZERO } g \text{ ADJUST Pin} - V_S/2)/2$$

This voltage may be produced by a variety of methods including a PWM signal from a microcontroller. Care must be taken that the output impedance of this voltage source is less than $5 \text{ k}\Omega$ and that there is very little ripple (noise). Any noise at the ZERO g ADJUST pin will cause output errors.

If an asymmetric range of acceleration is required (e.g., $+75 \text{ g}$ to -125 g) a resistor may be connected between the ZERO g ADJUST and ground or V_S as described above. For example:

For a range of $+75 \text{ g}$ to -125 g the offset required is -25 g .

-25 g at $18 \text{ mV/g} = 450 \text{ mV}$ of offset is required.

Rearranging the offset equations above:

$$R = [(7.5 \times V_S)/\text{offset}] - 30 = 53.3 \text{ k}\Omega \text{ connected to ground.}$$

For asymmetric operation the g range midpoint may be shifted up to $\pm 80 \text{ g}$ typically.

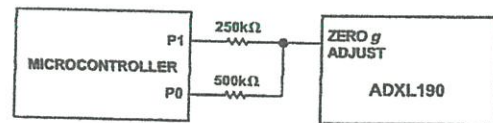
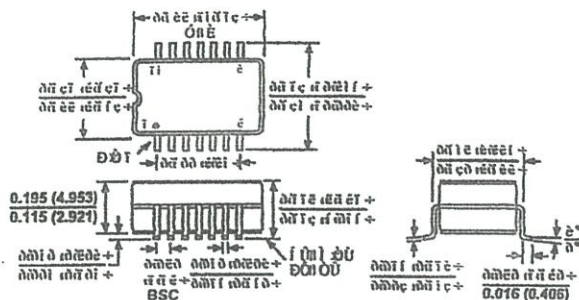


Figure 3. An Offset Adjustment Scheme

OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

14-Lead Cerpak
(QC-14)



ประวัติผู้เขียน

นายวีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2517 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีการศึกษา 2539 ปัจจุบันรับตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. วีระศักดิ์ สนเภา , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และ สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล , “การศึกษาการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่ง” , การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 1 , 2543 , หน้า 444-449.
2. ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์ , วีระศักดิ์ สนเภา , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และ สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล , “การศึกษาคุณสมบัติการกัดแบบค้ำนึ่งทิศทางของซิลิคอนในสารละลาย TMAH” , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23-F24 , 2543 , หน้า 725-728.
3. Weresak Sonphao , Somsak Chaisirikul , “Silicon Anisotropic Etching of TMAH Solution. ” IEEE Industrial Electronics Society. , vol. 3 , June 2001. Pp.2049-2052.
4. วีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์ , สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล , “พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิคอนแบบคานเดี่ยว” , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 , 2544 , หน้า 915-920.