

เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิกอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง

SILICON CANTILEVER ETCHING TECHNIQUES
FOR ACCELERATION SENSORS

ศรีเมษ รัตนชัย

SRIMES RATTANACHAI



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 32887
วัน, เดือน, ปี 14 ส.ย. 2542

พศ.2542

ISBN 974 - 622 - 390 - 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SILICON CANTILEVER ETCHING TECHNIQUES
FOR ACCELERATION SENSORS**



**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**

1999

ISBN 974 – 622 – 390 - 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิกอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง

SILICON CANTILEVER ETCHING TECHNIQUES FOR
ACCELERATION SENSORS

นักศึกษา

นายศรีเมษ รัตนชัย

รหัสประจำตัว

35620051

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2542

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการและเทคนิคการสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอนชนิดตัวต้านทานเพียโซ อุปกรณ์ดังกล่าวสร้างจากผลึกซิลิกอนระนาบ(100) ชนิดอีพิแทกเซียลชนิดเอ็นบนฐานรองชนิดพี มีสภาพต้านทานของชั้นอีพิแทกเซียลประมาณ 8 ถึง 12 โอห์มเซ็นต์ติเมตรและมีสภาพต้านทานของฐานรองประมาณ 10 โอห์มเซ็นต์ติเมตร ระบบของมวลและคานสร้างอยู่บนชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งซึ่งมีขนาดเท่ากับ 5×5 มิลลิเมตรโดยวิธีการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก สารละลายสามชนิดคือ EPD โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และไฮดราซีนได้ถูกนำมาทดสอบที่สภาวะต่างๆเพื่อหาความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารละลายสำหรับกระบวนการกัดแอนไอโซโทรปิก โดยได้วิเคราะห์ถึงผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ อาทิ อุณหภูมิของสารละลาย การกวนสารละลาย และความสามารถในการนำมาใช้ซ้ำ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพไดอะแฟรมและอัตราการผลิต ข้อดีข้อเสียของสารละลายทั้งสามชนิดถูกนำมาเปรียบเทียบกับกันทั้งนี้เพื่อการตัดสินใจเลือกสารเคมีและวิธีการที่สามารถเข้ากันได้กับสายงานผลิตวงจรรวม นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีการออกแบบตัวตรวจจับอัตราเร่งให้มีความไวสูงสุด ซึ่งจะกล่าวถึงข้อควรคำนึงตามปัญหาทางกลศาสตร์และข้อควรคำนึงในการควบคุมการกัดให้ได้ลักษณะเรขาคณิตตรงตามที่ต้องการโดยใช่วิธีจำลองแบบการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก นอกจากนี้ยังได้เสนอการกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี และวิธีการไอออนไวปฏิกิริยาในพลาสมาของ SF_6 เพื่อปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวไดอะแฟรม ทั้งนี้เพื่อให้การสร้างความแน่นอนทุกครั้ง ตัวตรวจจับอัตราเร่งที่สร้างขึ้นสามารถสร้างคานขึ้นที่มีความกว้าง 320 ไมครอน ยาว 300 ไมครอน หนา 10.02 ไมครอนและมีขนาดมวลตรวจสอบเท่ากับ 0.48 มิลลิกรัมซึ่งเป็นสัดส่วนเท่ากับ 45.28 เปอร์เซ็นต์ของมวลที่ออกแบบหรือเป็นสัดส่วนเท่ากับ 76.19 เปอร์เซ็นต์ของร้อยละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นงานวิชาการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละ 60 ของมวลตรวจสอบอันเนื่องมาจากการถูกกัดเซาะมุมในขณะกัด อุปกรณ์จะมีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 5.05 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อนำมาทดสอบความไวต่อแรงอัดอากาศจากคลื่นเสียงพบว่ามีควมไวในช่วงเชิงเส้นเท่ากับ 4.266×10^6 มิลลิโวลต์ต่อนิวตัน และสามารถตรวจจับแรงอัดอากาศต่ำสุดที่ 1.137×10^{-5} นิวตัน หรือเทียบเท่ากับการเหนี่ยวนำของมวลตรวจสอบเท่ากับ 0.02 ไมครอน และมีความไวต่ออัตราเร่งเท่ากับ 20.084 มิลลิโวลต์ต่อแรงโน้มถ่วง ซึ่งสัญญาณอัตราเร่งต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้เท่ากับ 2.264g และมีช่วงเชิงเส้นจนถึง 10.568g โดยมีค่าผิดพลาดประมาณ $\pm 0.174g$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	SILICON CANTILEVER ETCHING TECHNIQUES FOR ACCELERATION SENSORS
Student	Mr. Srimes Rattanachai
Student ID.	35620051
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assistant Professor Somsak Chiersirikul

ABSTRACT

This thesis presents some successful methods and guidance techniques for fabrication of the silicon acceleration sensors. The device was started from a (100) silicon wafer with a 10-micron and 8-12 Ohm.cm n-type epi-layer on a 10 Ohm.cm p-type substrate. System of a cantilever and a proof mass carved from bulk silicon utilizing anisotropic etchants was packed with piezoresistors and temperature-compensation ones within an area of a $5 \times 5 \text{ mm}^2$ chip. Three well-known etchants; EPD, KOH and Hydrazine were conducted to study how properly they can be used. Variability of many parameters to which affect the etching behavior including the temperature, agitation condition, reusability and reproducibility were carefully studied since they can significantly change the etching rate and thus the quality of diaphragm. Suitable chemical used means must be well compatible to the batch VLSI fabrication process. Suggestion of good mechanical design was available in this paper as to help ones who are making accelerometers with acceptable high sensitivity. Geometrical consideration to the anisotropic etching control was also included in the simulation topic. Electrochemical Controlled Etching coming with Reactive Ion Etching of SF_6 were employed as to help improving diaphragm quality and make accomplishment in fabrication from chip to chip. The acceleration sensor has a 320-micron width, 300-micron length and 10.02-thick cantilever beam with a 0.48 milligrams proof mass. This mass is weighted about 45.28% of the design or approximately equals to 76.19% of an expected 60% remain of mass due to under etching of the process. The device has the natural frequency of 5.05 kHz. The device was tested for the sensitivity to air pressure arose from a sound source. It was found that the device's sensitivity was $4.26 \times 10^6 \text{ mV/N}$ that related to $1.137 \times 10^{-5} \text{ N}$ as the minimum detectable force signal or equivalent to 20.084 microns as the minimum deflection could be detected. Hence the sensor has the sensitivity to acceleration about 20.084 mV/g and the linear detection range from minimum acceleration about 2.264g to 10.568g with error about $\pm 0.174\text{g}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผ่านการจัดทำที่ยาวนานและมีอุปสรรคมากมาย ผู้เขียนจึงรู้สึกขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาทุ่มเทความรู้ ความสามารถและความช่วยเหลือทุกอย่างจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาแนะนำสิ่งต่างๆที่ดีให้มากมาย และให้กำลังใจเพื่อเอาชนะอุปสรรคต่างๆ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์ แห่งภาควิชาวิศวกรรมเกษตรที่กรุณาเชื้อเพื่อให้ยืมอุปกรณ์ OR1400 Oscillographic Recorder เพื่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอาคม สุวรรณกิจ และคุณศราวุธ ฤทธินันท์ ที่ให้ยืมคอมพิวเตอร์เพื่อพิมพ์งานวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จ

ขอขอบคุณ คุณวีรศักดิ์ สนั่นภา คุณลัดไทย ไทโยธิน คุณเอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์ คุณสุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์ สมาชิกศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล.ทุกคน และคุณมนัส รอดผล ที่ให้ความช่วยเหลือแบ่งเบาภาระในทุกๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นกำลังกายหรือกำลังสมอง

อย่างไรก็ดี - สิ่งที่คลั่งคลั่งให้เกิดความอดทนต่อความยากลำบากต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็คือ พ่อ แม่ และพี่สาวที่คอยให้กำลังใจตลอดเวลา

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณามอบทุนสนับสนุนการวิจัย

ประโยชน์และคุณค่าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กระผมขอบใจแก่ พ่อ แม่ พี่สาว และผู้ที่ต้องการวิจัยในหัวข้อเดียวกันนี้ต่อไป

ศรีเมฆ รัตนชัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
ศัพท์เทคนิค	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วิวัฒนาการและความสำคัญของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	1
1.2 ทฤษฎีของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบมวลและสปริง.....	6
1.3 ข้อดีข้อเสียของตัวตรวจจับอัตราเร่งประเภทตัวต้านทานเพียโซ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบตัวต้านทานเพียโซ.....	13
2.1 โครงสร้างของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	13
2.2 กลศาสตร์ของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	14
2.2.1 กรณีอัตราเร่งคงที่ (static deformation)	15
2.2.2 การตอบสนองของระบบภายใต้อัตราเร่งไม่คงที่.....	16
2.2.2.1 การสั่นอิสระภายใต้การหน่วง (Viscously damped free vibration).....	16
2.2.2.2 การสั่นแบบหน่วงภายใต้แรงบังคับแบบคลื่นไซน์.....	18
2.3 ปรากฏการณ์สภาพต้านทานเพียโซ (Piezoresistive effect).....	20
2.3.1 โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน.....	20
2.3.2 สภาพต้านทานเพียโซในซิลิกอนชนิดเอ็น.....	24
2.3.3 สภาพต้านทานเพียโซในซิลิกอนชนิดพี.....	27
2.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซกับความเค้น.....	27
2.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสารเจือและสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซ.....	33
2.4 ตำแหน่งการวางตัวต้านทานบนคานยื่น.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การอ่านสัญญาณอัตราเร่งและการแปลผล.....	36
บทที่ 3 การกักขังลิทอนแบบแอนไอโซโทรปิก.....	3
3.1 ปฏิบัติการกักขังลิทอน.....	39
3.2 โครงสร้างอะตอมของลิทอน.....	42
3.3 การชดเชยมุม.....	45
3.3.1 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	47
3.3.2 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา.....	47
3.3.3 การชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยม.....	48
3.4 การควบคุมการกักด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	52
3.5 การกักด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา.....	56
บทที่ 4 การออกแบบตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	4
4.1 การคำนวณลักษณะเฉพาะของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	63
4.1.1 ความถี่ธรรมชาติของคานที่ความกว้างคานต่างๆกัน.....	63
4.1.2 ความถี่ธรรมชาติของคานที่ความยาวคานต่างๆกัน.....	63
4.1.3 จุดออกแบบที่เหมาะสม.....	65
4.2 การจำลองแบบการกักแบบแอนไอโซโทรปิก.....	71
4.3 การออกแบบตัวต้านทาน.....	80
4.4 วัสดุและลำดับการสร้าง.....	81
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	92
5.1 การทดลองกักขังลิทอนด้วยสารเคมีต่างๆ.....	92
5.1.1 การกักแบบไม่ใช่ไฟฟ้าเคมี.....	92
5.1.1.1 EPD.....	92
5.1.1.1.1 ผลของความเข้มข้นของ EPD.....	93
5.1.1.1.2 ผลของอุณหภูมิสารละลาย.....	95
5.1.1.1.3 ผลของการกวนและไม่กวนสารละลาย.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1.1.4 ความสามารถในการนำกลับมาใช้และความ สามารถทำซ้ำ.....	96
5.1.1.1.5 การปรับปรุงอัตราการกัดและคุณภาพ ไดอะแฟรม.....	97
5.1.1.2 KOH.....	98
5.1.1.2.1 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นสารละลายต่อ การกัด.....	98
5.1.1.2.2 ความสามารถในการนำกลับมาใช้ และการทำซ้ำ.....	101
5.1.1.3 ข้อพิจารณาเชิงเรขาคณิตของการกัดส่วนมวลตรวจสอบของตัว ตรวจจับอัตราเร่ง.....	102
5.1.2 การกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	109
5.2 ผลการกัดด้วยพลาสมาไวพิกิริยา.....	114
5.3 การวัดลักษณะเฉพาะของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	119
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	129
เอกสารอ้างอิง.....	136
ภาคผนวก.....	138
ภาคผนวก ก หน่วยมาตรฐาน	139
ภาคผนวก ข ค่าคงที่ทางฟิสิกส์	140
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของซิลิกอนที่ 300 เคลวิน.....	141
ภาคผนวก ง การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์.....	143
ภาคผนวก จ กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน.....	146
ภาคผนวก ฉ การคำนวณระยะเห $y(x)$ ของคานอื่น.....	151
ภาคผนวก ช ตารางค่า Complementary Error Function.....	153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ประวัติผู้เขียน.....	155



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	5
1.2	ข้อดีข้อเสียของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอนแต่ละประเภท.....	12
2.1	สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซของซิลิกอนชนิดพีและเอ็น (10^{-12} cm ² /dyne) ที่สภาพต้านทาน ($\Omega.cm$) ต่างกัน.....	26
2.2	สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซ [π_{ij}] ในโคออร์ดิเนตใดๆ ($\pi_A = \pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}$)	29
2.3	สัมประสิทธิ์แนวขวางและสัมประสิทธิ์ตามยาวของซิลิกอนระนาบต่างๆ.....	30
3.1	ตัวอย่าง ตัวกักสำหรับซิลิกอน และหน้ากากป้องกันที่เหมาะสม	40
3.2	มุมระหว่างระนาบ {HKL} กับ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของระนาบต่างๆ..	43
3.3	ตัวกักพลาสมาสำหรับซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์.....	58
4.1	ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของคานต่อ ระยะเห ความถี่ธรรมชาติ ความไว.....	70
4.2	ขนาดของคาน ($w \times L =$ ไมครอน ไมครอน).....	70
4.3	อัตราการกักซิลิกอน(ไมครอนต่อชั่วโมง)ในระนาบต่างๆสำหรับตัวกักตามฐานข้อมูลของ Caltech.....	71
5.1	ผลการทดสอบความสามารถนำ EPD ที่ใช้แล้วมากัดซ้ำ.....	96
5.2	อัตราการกักซิลิกอนไดออกไซด์โดยประมาณที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ.....	99
5.3	ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบความสามารถนำ KOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ที่ใช้แล้วมากัดซ้ำ.....	101
5.4	ขนาดต่างๆของมุมชดเชยเพื่อชดเชยมุมเมื่อกักไดอะแฟรมลึกลับประมาณ 380 ± 20 ไมครอน.....	106
5.5	ผลการทดสอบชั้นป้องกันต่างๆ.....	107
5.6	ลำดับการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างภาคอินพุตซึ่งเป็นแรงดันที่ขั้วลำโพงกับภาคเอาต์พุตซึ่งเป็นขนาดขยอกคลื่นสูงสุดของการตอบสนองต่ออิมพัลส์	125
6.1	ข้อเปรียบเทียบสารละลายกักแอนไอโซโทปิก.....	129

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โนโมแกรมของการสั่นแบบฮาร์มอนิกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และขนาดของอัตราเร่งต่อขนาดของการขจัด (ด้านซ้ายมือของแผนภาพ)และความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และขนาดของอัตราเร็วต่อการขจัด(ด้านขวามือของแผนภาพยกตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่มีการขจัดแบบฮาร์มอนิกเท่ากับ 0.03 นิ้ว ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จะมีขนาดอัตราเร่งเท่ากับ 7.7 g หรือ ถ้าทราบว่าการขจัดแบบฮาร์มอนิกเท่ากับ 0.10 นิ้ว ที่ ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์ จะมีขนาดอัตราเร็วเท่ากับ 25.1 นิ้วต่อวินาที เป็นต้น	3
1.2	ระบบมวลและสปริง.....	4
1.3	โครงสร้างสปริงแบบต่างๆ ในตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดซิลิกอน (ก)แท่งคานยื่น (ข)แบบสะพาน (ค) แบบคานบิด (torsion bar)	6
1.4	การจัดของระบบมวลและสปริง.....	6
1.5	การตอบสนองต่อการสั่นแบบฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ.....	7
1.6	ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก.....	8
1.7	ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบตัวต้านทานเพียโซ.....	9
1.8	ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบตัวเก็บประจุ.....	9
1.9	ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบช่องนำแสง.....	9
1.10	ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบสนามแม่เหล็ก.....	10
1.11	ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบกระแสทันเนล.....	10
2.1	โครงสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบคานยื่น (ก)คานบน (ข)คานข้าง(แนว BB') (ค)คาน ข้าง (แนว AA') และการจัดอันเนื่องจากแรงกระทำ F_x ณ จุดกึ่งกลางมวล.....	13
2.2	การตอบสนองของระบบสั่นอิสระภายใต้การหน่วง.....	15
2.3	ตัวคุณการตอบสนองการขจัดและมุมวิภาคของระบบที่มีการหน่วงเมื่อถูกขับด้วยแรงแบบคลื่นไซน์.....	19
2.4	แถบพลังงาน $E(k)$ ของซิลิกอน (ก)ทิศทาง [100] (ข) [111]	21
2.5	ผิวพลังงานเท่ากันของซิลิกอน.....	22
2.6	การเกิดสภาพต้านทานเพียโซในสารกึ่งตัวนำ.....	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.7	ภาพฉายวัลเลย์ของซิลิกอนลงบนปริภูมิ k ในทิศทาง[100]ของผลึก BEP = Band Edge Point E_f = ระดับพลังงานเฟอร์มิ.....	25
2.8	สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซบนผลึกซิลิกอนระนาบ (100) (ก)ชนิดเอ็น (ข)ชนิดพี	30
2.9	กราฟพลอตระหว่าง $P(N,T)$ และ N ที่อุณหภูมิ T ต่างๆกัน.....	34
2.10	วงจรวีรสโตนบริคซ์พื้นฐาน(ในที่นี้ $R_1 = R_2 = R$ เป็นตัวต้านทานภายนอก $R_3 = R_4 = R_5$ เป็นตัวต้านทานของตัวตรวจจับอัตราเร่ง)	37
3.1	พันธะในอะตอมซิลิกอนระนาบต่างๆ (ก)ระนาบ (100) (ข) ระนาบ (111) (ค)ระนาบ (110) (ถูกสรุหมายถึงทิศทางการเข้าไปกัดของสารละลายแอนไอโซโทรปิก)	42
3.2	อัตราการกัดซิลิกอนระนาบ (100) ด้วย KOH	44
3.3	การกัดแบบแอนไอโซโทรปิก.....	45
3.4	การเกิดการเซาะมุมเมื่อบริเวณเลือกกัดเป็นมุมเปิด (ก)แบบสำหรับกัดรูปทรงเกาะ (ข)ผลของการกัดตามทฤษฎี (ค)การเซาะมุม (ง)ปลายเข็มที่เกิดจากการเซาะมุม	45
3.5	ความผิดพลาดจากระนาบผลึกเริ่มต้นผิดพลาดประมาณ ± 1 องศา	46
3.6	รูปทรงที่คลาดเคลื่อนเมื่อวางด้านไม่ขนานกับทิศทาง $<110>$ [3.9].....	46
3.7	อัตราการเซาะมุมตามข้อมูลของ Bean.....	48
3.8	การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	48
3.9	การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา.....	49
3.10	(ก)ภาพถ่ายจาก SEM แสดงมุมที่เกิดการกัดเซาะ (ข)ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบ (212) และระนาบ (111) ที่ตัดกับระนาบ (100).....	49
3.11	อัตราการเซาะมุมตามข้อมูลของ Bean.....	50
3.12	(ก)วิธีการคำนวณมุมชดเชยแบบสามเหลี่ยม (ข) เทคนิคการสร้างมาสก์มุมชดเชย แบบสามเหลี่ยม.....	50
3.13	(ก)เซลล์กัดแบบ 2 อิเล็กโตรด (ข) แบบ 3 อิเล็กโตรด.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.14	ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันของการกัดแบบไฟฟ้าเคมีบนซิลิกอนชนิดเอ็นและพี ระบาย (100) ใน EPD.....	54
3.15	กราฟบันทึกความหนาแน่นกระแสและเวลาในการกัดเพื่อสร้างเมมเบรนโดยวิธีหยุดกัดที่รอยต่อพีเอ็น.....	55
3.16	ระบบพื้นฐานของการกัดแบบ RIE.....	56
3.17	พารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อการกัดด้วยพลาสมา (nE เป็นความหนาแน่นพลังงานของอิเล็กตรอน $I(E)$ เป็นฟังก์ชันการกระจายพลังงานอิเล็กตรอน N คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน)	60
3.18	ผลของการเติมสารเจือลงในซิลิกอน เจือไนโตรเจนคือ RF 13.56 MHz คาโอดแบบอะลูมิเนียม 79.8% CF ₄ /19.2%O ₂ /4%Ar อัตราการไหลเท่ากับ 50 sccm ความดัน 25 มิลลิทอร์).....	61
4.1	ความถี่ธรรมชาติขึ้นกับความกว้างค่าต่างๆของคาน.....	63
4.2	ความถี่ธรรมชาติของคานขึ้นกับความยาวค่าต่างๆของคาน.....	64
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเห (y_M/g) ความถี่ธรรมชาติ f_n และความไวต่อ 1 g กับความหนาของคาน (เลือกที่ความยาว 300 ไมครอน กว้าง 240 ไมครอน และมวล $M = 1.14 \times 10^{-6}$ กิโลกรัม $c_1 = 880$ ไมครอน และ $b = 100$ ไมครอน (พลอตตามสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.4)).....	66
4.4	y_M , S และ f_n ที่ความกว้างคานต่างๆกัน ที่อัตราเร่ง $a_r = 1g$ กำหนดให้คานหนา 20 ไมครอน ยาว 300 ไมครอน มวล $M = 1.14 \times 10^{-6}$ กิโลกรัม $c_1 = 880$ ไมครอน $c_2 = 0$ และ $b = 100$ ไมครอน (พลอตตามสมการที่ (4.2) –(4.4)).....	67
4.5	ผลรวมของมวล M ที่มีต่อ y_M , S และ f_n ของระบบภายใต้อัตราเร่ง 1 g คำนวณที่มวล $M_n = 1.14$ มิลลิกรัม คานหนา = 20 ไมครอน กว้าง = 240 ไมครอน ยาว = 300 ไมครอน $c_1 = 880$ ไมครอน $c_2 = 0$ และ $b = 100$ ไมครอน (พลอตตามสมการที่ (4.2) ถึง (4.4)).....	68
4.6	y_M , S และ f_n ที่แปรตามความยาวคาน (ก) M คงที่ (ข) M และ f_n คงที่.....	69
4.7	การออกแบบมวลและคานของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	70
4.8	มาตราที่ออกแบบเพื่อทดสอบการชดเชยมุม (1 ช่องตารางเท่ากับ 20 ไมครอน).....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลการจำลองแบบการกัดส่วนมวลซิลิกอนที่มีการชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อ กัดด้วย EPD เป็นเวลารวม 1.500 ชั่วโมง จะพบว่าเหลือส่วนมวลอยู่น้อยมาก.....	74
4.10 ผลการจำลองแบบการกัดส่วนมวลซิลิกอนที่มีการชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อ กัดด้วย KOH เป็นเวลารวม 2.000 ชั่วโมง.....	76
4.11 มาสก์สำหรับมุมชดเชยแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา.....	77
4.12 ผลรวมการจำลองแบบสำหรับมาสก์ชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศาเมื่อกัด ด้วย EPD จนถึงเวลา 1.500 ชั่วโมง (แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง) จะพบว่าส่วนที่ เป็นมวลได้หายไป	77
4.13 ผลรวมการจำลองแบบสำหรับมาสก์ชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศาเมื่อกัด ด้วย KOH จนถึงเวลา 1.500 ชั่วโมง (แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง) จะพบว่ายัง เหลือส่วนมวลอยู่.....	77
4.14 ผลรวมการจำลองแบบสำหรับมาสก์ชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยมเมื่อกัดด้วย EPD จน ถึงเวลา 1.500 ชั่วโมง (เส้นนอกสุดคือมาสก์ แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง) จะพบ ว่าเหลือส่วนมวลอยู่น้อยมาก.....	78
4.15 ผลรวมการจำลองแบบสำหรับมาสก์ชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยมเมื่อกัดด้วย KOH จน ถึงเวลา 1.500 ชั่วโมง (เส้นนอกสุดคือมาสก์ แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง) จะพบ ว่าเหลือส่วนมวลอยู่เป็นจำนวนมาก.....	78
4.16 แพทเทิร์นมาสก์สำหรับกำหนดบริเวณไดอะแฟรมและส่วนมวลของตัวตรวจจับ อัตราเร่ง (ส่วนนอกสุดเป็นบริเวณไดอะแฟรม ส่วนที่อยู่ข้างในเป็นมวลที่มีการชด เชย).....	79
4.17 ผลรวมจำลองแบบการกัดแพทเทิร์นในรูปที่ 4.15 ด้วย KOH จาก 0.000 จนถึงเวลา 2.000 ชั่วโมง พบว่ามีส่วนมวลเหลืออยู่น้อยมาก.....	79
4.18 การออกแบบตัวต้านทาน (ก)ตัวต้านทานชดเชยอุณหภูมิ (ข)ตัวต้านทานเพียโซ.....	80
4.19 มาสก์อุปกรณ์หมายเลข B3 ของตัวตรวจจับอัตราเร่ง เส้นที่ทาบเขถึงแพทเทิร์นด้าน หน้า และเส้นประ หมายถึงแพทเทิร์นด้านหลังของอุปกรณ์.....	80
4.20 ลำดับขั้นตอนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.21	ไดอะแกรมแสดงลำดับการสร้างและภาคตัดขวางสำหรับมาสก์ทั้ง 7 ลำดับ (หมายเหตุ ให้รอยตัดผ่านกลางคานและมีแสดงตัวด้านทานชดเชยอุณหภูมิในภาคตัดขวางและขึ้น).....	86
5.1	ลักษณะคล้ายผิวสัมผัสของไดอะแฟรมซิลิกอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50: 8: 16 ที่ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง(กำลังขยาย 200 เท่า)	94
5.2	ซิลิกอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50: 12: 16 ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 400 เท่า)	94
5.3	ภาพจาก SEM ของภาคตัดขวางไดอะแฟรมซิลิกอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50: 8:16 ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงแสดงให้เห็นความลาดเอียง.....	94
5.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิของ EPD 50:8:16.....	95
5.5	กราฟแสดงอัตราการกัดซิลิกอนระนาบ (100) ด้วยสารละลาย EPD อัตราส่วน 50:8:16 ที่อุณหภูมิช่วง 90 ถึง 110 องศาเซลเซียส เมื่อเติมและไม่เติมไพราซีน.....	97
5.6	ภาพถ่ายและภาคตัดขวางไดอะแฟรมซิลิกอน ระนาบ (100) ด้วยสารละลาย EPD 50:8:16 ที่ 100 องศาเซลเซียสเมื่อมีการผสมไพราซีน.....	97
5.7	อัตราการกัดซิลิกอนด้วยสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ.....	100
5.8	สภาพพื้นผิวของซิลิกอนระนาบ (100) ที่ถูกกัดด้วย KOH ในเงื่อนไขต่างๆ (ก) 2M ที่อุณหภูมิ 75°C (ข) 4M ที่ 65°C (ค) 2M ที่ 75°C เติม IPA จนอิ่มตัว (ง) 2M ที่ 85°C เติม IPA จนอิ่มตัว.....	100
5.9	การกัดเพื่อเลือกชนิดมุมชดเชยเมื่อกัดด้วย EPD และ KOH เป็นเวลา 120 นาที.....	103
5.10	การกัดเพื่อเลือกชนิดมุมชดเชยเมื่อกัดด้วย EPD และ KOH เป็นเวลา 240 นาที.....	104
5.11	ความบกพร่องที่เกิดจากการกัดด้วย EPD.	105
5.12	ขนาดของมุมชดเชยไม่สามารถขยายได้เกินกว่ากึ่งหนึ่งของด้านที่สั้นที่สุดของความกว้างมวล.....	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.13	ภาพถ่ายของมวลซิลิกอน (ก) เมื่อกัดเฉพาะเพื่อสร้างไดอะแฟรม (ข) การกัดที่เกิดความลาดเอียง บาง ส่วนจะทะลุแล้ว (รอยสีขาว) บางส่วนยังกัดไม่ทะลุ (ค) คานถูกกัดจนทะลุแต่บางส่วนยังไม่ทะลุ และ (ง) (ภาพด้านหน้า) คานถูกกัดทะลุทำให้แพทเทิร์นอะลูมิเนียมถูกกัดเสียหาย (จ) เกิดรอยหักตรงรอยต่อของส่วนมวลและคาน.....	108
5.14	ไดอะแฟรมซิลิกอนที่ถูกกัดด้วยไฮดราซีนความเข้มข้น 50% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 100°C.....	109
5.15	ชุดกัดด้วยไฟฟ้าเคมี.....	110
5.16	การทดลองกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	110
5.17	ค่ากระแสตามเวลาเมื่อกัดไดอะแฟรมด้วยสารละลาย EPD อัตราส่วน 50:8:16 ที่อุณหภูมิ 100°C.....	111
5.18	ค่ากระแสตามเวลาเมื่อกัดด้วย 4M KOH ที่อุณหภูมิ 75°C (ก) เมื่อโครงสร้างเป็นไดอะแฟรมล้วน ไบอัสที่ 1.2 โวลต์ (ข) เมื่อโครงสร้างเป็นไดอะแฟรมและมวล ไบอัสด้วย 1.0 โวลต์ (ค) เมื่อโครงสร้างเป็นไดอะแฟรมและมวล ไบอัสด้วย 1.5 โวลต์.....	112
5.19	ความสำคัญของแรงดันไบอัสต่อกระแสป้องกัน และ อัตราการกัดโดยวิธี ECE จากสารละลาย 4 M KOH ที่อุณหภูมิ 75°C.....	113
5.20	ภาพถ่าย SEM แสดงไดอะแฟรมของซิลิกอนจะได้รับการปรับปรุงเมื่อกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	114
5.21	ภาพถ่าย SEM แสดง (ก) ร่องที่กำหนดขอบเขตคาน(ด้านหน้า) (ข) คานขึ้นและมวล (ด้านหลัง)	114
5.22	ความลึกของหลุมเมื่อกัดด้วย RIE ของ SF ₆	115
5.23	ภาพถ่าย SEM ของไดอะแฟรมเมื่อกัดด้วย RIE ใน SF ₆ (ก) 0 นาที่ (ข) 4 นาที่ (ค) 8 นาที่.....	116
5.24	จุดเสียของลวดลายอะลูมิเนียมเนื่องจากวางแพทเทิร์นไว้ชิดกับขอบหลุมต่ำกว่า 40 ไมครอน.....	117
5.25	ชีพวัดตรวจจับอัตราเร่ง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง.....	118
5.26	วงจรวัดสัญญาณจากตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	120
5.27	การทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับอัตราเร่ง.....	121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.28	การวิเคราะห์การตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ขนาด 15 โวลต์จากลำโพง.....	122
5.29	ตัวคุณการจัดของระบบคานขึ้นและมวดตรวจสอบที่ความถี่ต่างๆ.....	124
5.30	การตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ขนาด 15 Vpeak ที่ความถี่ต่างๆ (Horizontal = 500 ms/Div. Vertical = 20.00 mV/Div.) (ก) 500 Hz (ข) 1.00 kHz (ค) 2.00 kHz และ (ง) 3.50 kHz	125
5.31	ความไวในการตอบสนองต่ออัตราเร่งในช่วงเชิงเส้นของอุปกรณ์จากผลการทดลอง (เส้นทึบ)เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีมวดตามที่ออกแบบ (แสดงด้วยเส้นประ)	127
6.1	หลุมด้านหลังควรถักถักประมาณ 300 ไมครอนเพื่อลดความเสี่ยงต่อความเสียหาย...	126
ง-1	ความหนาออกไซด์ ณ อุณหภูมิต่างๆในกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง.....	144
ง-2	ความหนาออกไซด์ ณ อุณหภูมิต่างๆในกระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น.....	145
จ-1	ความสามารถในการแพร่ของสารต่างๆในซิลิกอน.....	146
จ-2	Solid solubility (N_o) ของสารเจือใดๆในซิลิกอน ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	147
จ-3	การคำนวณความหนาแน่นอะตอม N_{ac} เมื่อทราบค่าสภาพต้านทาน.....	148
ฉ-1	คานขึ้น.....	151
ฉ-2	โมเมนต์ในคานขึ้น.....	151

ศัพท์เทคนิค

อัตราเร่ง	Acceleration
ความเร็ว	Velocity
การขจัด	Displacement
ระยะเห	Deflection
มวลสั่นไหว	Seismic mass
มวลตรวจสอบ	Proof mass
การตรวจสอบการสั่น	Vibration monitoring
การกระตุก	Jerk
การสั่นเชิงไกล	translational vibration
การสั่นเชิงหมุน	rotational vibration
เวกเตอร์ลัพธ์	resultant of motion vector
สมบัติความไวในแนวตั้งฉากกับแกนหลัก	cross-axis sensitivity
เครื่องวัดการสั่นของแผ่นดินไหว	seismograph
แอมพลิจูด	Amplitude
ตัวคูณของการขจัด	Displacement response factor
วัฏภาคล่าหลัง	Phase lag
มุมวัฏภาค	Phase angle
โนโมแกรม	Nomogram
สภาพคล่อง	Mobility
สภาพต้านทาน	Resistivity
ตัวต้านทานเพียโซ	Piezoresistors
สภาพต้านทานเพียโซ	Piezoresistivity
สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซ	Piezoresistive coefficient
สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามยาว	Longitudinal piezoresistive coefficient
สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซแนวขวาง	Transverse piezoresistive coefficient
แฟกเตอร์ความต้านทานเพียโซ	Piezoreistance factor
พลังงานไอออไนซ์	Ionization energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

เพียโซอิเล็กตริก	Piezoelectric
โคไซน์ทิศทาง	Direction cosine
องค์ประกอบเรขาคณิต	Geometrical factor
ปรากฏการณ์ฮอลล์	Hall effect
ปรากฏการณ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน	Thermoelectric effect
สภาพต้านทานเชิงแม่เหล็ก	Magnetoresistive
การจัดแบบฮาร์มอนิก	Harmonic displacement
ไมโครแมชีน	Micromachine
วิธีกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี	Electrochemical etching: ECE
ความแข็งแกร่ง	Stiffness
ค่าคงที่สปริง	Spring constant
สัมประสิทธิ์การหน่วง	Damping coefficient
การกำทอน	Resonant
เลขคลื่น	Wave number
สภาพคล่อง	Mobility
สภาพนำ	Conductivity
ช่องว่างแถบพลังงาน	Energy gap
แถบพลังงาน	Energy band
แถบยินยอม	Allowed band
แถบต้องห้าม	Forbidden band
มวลยังผล	Effective band
มวลยังผลตามยาว	Longitudinal effective mass
มวลยังผลแนวขวาง	Transverse effective mass
แถบวาเลนซ์	Valence band
แถบนำ	Conduction band
แถบแยกตัว	Split band
ระดับพลังงานเฟอร์มิ	Fermi energy
ขอบเขตแถบพลังงาน	Band edge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

ปริภูมิ k	k -space
ผิวพลังงาน	Energy surface
อิเล็กตรอน	Electron
โฮล	Hole
โฮลหนัก	Heavy hole
โฮลเบา	Light hole
แผนภาพแถบพลังงานหลายวัลเลย์	Many-valley energy band
การข้ามภายในวัลเลย์	Intravalley transformation
การข้ามระหว่างวัลเลย์	Intervalley transformation
เวลาผ่อนคลาย	Relaxation time
พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการเสียรูป	Deformation potential
ผลึกเดี่ยว	Monocrystalline, single crystalline
การแพร่ด้วยความร้อน	Thermal diffusion
เกจแฟกเตอร์	Gage factor
ความเค้น	Stress
ความเครียด	Strain
ความเค้นตกค้าง	Residual stress
วัสดุแกร่ง	Robust material
ฮิสเทอรีซิส	Hysteresis
วงจรวีรสโตนบริดจ์	Wheat-stone bridge
ความไว	Sensitivity
การวางตัว	Orientation
สัญญาณต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้	Minimum Detectable Signal :MDS
ไอออนถูกขัง	Trapped ion
ไอออนเคลื่อนที่ได้	Mobile ion
กระแสปรสิต	Parasitic current
บริเวณเอ็นแฮนซ์เมนต์	Enhancement zone
ชั้นกลับ	Inversion layer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

เขตปลอดพาหะ	Depletion zone
ประจุอิสระ	Space charge
การมอดูเลตเนื่องจากประจุต่าง	Space Charge Induced Modulation: SCRIM
การกัดด้วยสารละลาย	Wet chemical etching
การกัดแบบไอโซโทรปิก	Isotropic etching
การกัดแบบแอนไอโซโทรปิก	Anisotropic etching
สถานะออกซิเดชัน	Oxidation state
อนุมูลไฮดรอกซิล	Hydroxyl group
สารประกอบเชิงซ้อน	Complexing agent
แขนว่าง	Dangling bond
พันธะหลัก	Back bond
การเซาะมุม	Corner undercutting
การชดเชยมุม	Corner compensation
มุมเปิด	Convex corner
มุมปิด	Concave corner
น้ำหนักอะตอม	Atomic weight
สภาพยอม	Permittivity
กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน	Thermal oxidation
กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	Dry oxidation
กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น	Wet oxidation
กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน	Thermal diffusion
การขับลึก	Drive-in
การไบอัสไปหน้า	Forward bias
การไบอัสกลับ	Reverse bias

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วิวัฒนาการและความสำคัญของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

อัตราเร่ง (acceleration) นั้นเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ซึ่งหมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว (velocity) อัตราเร่งนั้นเป็นทั้งผลจากการเคลื่อนที่ภายใต้แรงกระทำ หรือในนัยกลับกัน จากกฎของนิวตันระบุว่าวัตถุใดๆจะคงสภาพเฉื่อย หรือรักษาความเร็วไว้จนกว่าจะถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร่งในทิศทางใดๆดังสมการที่ (1.1)

$$F = ma \quad (1.1)$$

เมื่อ F เป็นแรงภายนอกที่มากระทำต่อมวลเฉื่อย m ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่ง a ในทิศทางเดียวกับ F (การพิมพ์ตัวหนา หมายถึงปริมาณเวกเตอร์)

อัตราเร่งนอกจากจะปรากฏในรูปอัตราเร่งที่คงที่ เช่น แรงโน้มถ่วง หรือแรงหนีศูนย์กลางเมื่อเคลื่อนที่วงรีบริเวณทางโค้ง เป็นต้น แต่อัตราเร่งยังสามารถปรากฏในรูปที่ไม่คงที่ตลอดเวลา เช่น การสั่น การเฝ้าตรวจสอบการสั่น (vibration monitoring) มีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากการสั่นนั้นเป็นลักษณะที่ปรากฏในการจذب อัตราเร็ว อัตราเร่ง การกระตุก (jerk) และแรงกลทั่วไป เป็นต้น

การสั่นนั้นอาจเป็นการสั่นเชิงเส้น (linear) หรืออาจเป็นการสั่นเชิงมุม ซึ่งอาจจะเรียกว่าการสั่นแบบไถล (translational vibration) (เช่น การสั่นของสปริงที่ยึดและหัดในแกนอ้างอิงหนึ่งๆ) และการสั่นแบบหมุน (rotational vibration) (เช่น การบิดแล้วปล่อยให้หมุนรอบแกนๆหนึ่ง) การที่จะทราบรายละเอียดเกี่ยวกับการสั่นได้โดยสมบูรณ์นั้นเป็นสิ่งที่ซับซ้อน เนื่องจากการสั่นสามารถเกิดขึ้นได้หลายทิศทางและต้องมีจุดอ้างอิงสำหรับการสั่นด้วย โดยปกตินิยมอ้างอิงแบบพิกัดฉาก xyz แต่การสั่นสามารถเป็นไปได้ว่าจะไถลหรือเกิดการหมุนได้ในทิศทางทั้ง 6 ซึ่งการเฝ้าติดตามอาจต้องใช้ตัวตรวจจับถึง 6 ตัว แต่โดยทั่วไป เวกเตอร์ลัพธ์ (resultant of motion vector) ของการสั่นจะมีทิศทางที่แน่นอน ทิศทางหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถใช้ตัวตรวจจับเพียง 1 ตัวสำหรับทิศทางนั้นๆ อย่างไรก็ดี ตัวตรวจจับส่วนมากจะมีความไวในการวัดในแนวตั้งฉากได้เช่นกัน ซึ่งเรียกว่าคุณสมบัติความไวในแนวตั้งฉากกับแกนหลัก (cross-axis sensitivity)

อัตราเร่งนั้นมีผลต่อการดำรงชีวิตอย่างกว้างขวาง เนื่องจากทุกสิ่งย่อมได้รับผลกระทบจากแรงภายนอกที่มากระทำเสมอ ไม่ว่าจะเป็นอัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง หรือแรงจากปรากฏการณ์หรือจากสิ่งต่างๆ ที่อยู่รอบตัว วัตถุอาจได้รับความเสียหายเมื่อได้รับแรงหรือเคลื่อนที่ภายใต้อัตราเร่ง ตัวอย่างของอัตราเร่งที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้แก่ อัตราเร่งจากแผ่นดินไหว อัตราเร่งหรืออัตราหมุนจากการขับขี้อยนต์ การสั่นของโครงสร้างอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ หรือการสั่นของเครื่องจักรต่างๆ นอกจากนี้อัตราเร่งของแขนขา หรืออวัยวะต่างๆ ที่ผิดปกติก็มีผลต่อความปลอดภัยในร่างกายด้วยเช่นกัน จึงได้มีการพยายามที่จะสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งเพื่อที่จะสามารถทำนายพฤติกรรมอัตราเร่งและทำการเตือนภัยได้ล่วงหน้า ตัวตรวจจับอัตราเร่งจึงได้ถูกสร้างให้มีขนาดและความสามารถต่างกัน ขึ้นอยู่กับบริเวณหรือประเภทงานที่จะวัด ซึ่งอาจจะมีขนาดใหญ่ เช่น เครื่องวัดการสั่นของแผ่นดินไหว (seismograph) ไปจนถึงตัวตรวจจับอัตราเร่งขนาดเล็ก $2 \times 2 \text{ mm}^2$ และเบา เช่น ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอน ซึ่งสามารถใช้งานได้กว้างขวาง วิธีการสร้างนั้นสามารถผนวกโครงสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งเข้ากับเทคนิคการสร้างวงจรรวม ซึ่งจะทำให้สร้างชิพที่มีวงจรประมวลสัญญาณร่วมกับส่วนที่วัดอัตราเร่งออกมาได้ ทำให้ข้อจำกัดทางด้านขนาดของอุปกรณ์ และวัสดุที่นำมาสร้างลดลงไปได้ อีกทั้งเป็นการประหยัดเนื่องจากสามารถสร้างชิพเป็นปริมาณมากในระดับอุตสาหกรรมวงจรรวมได้

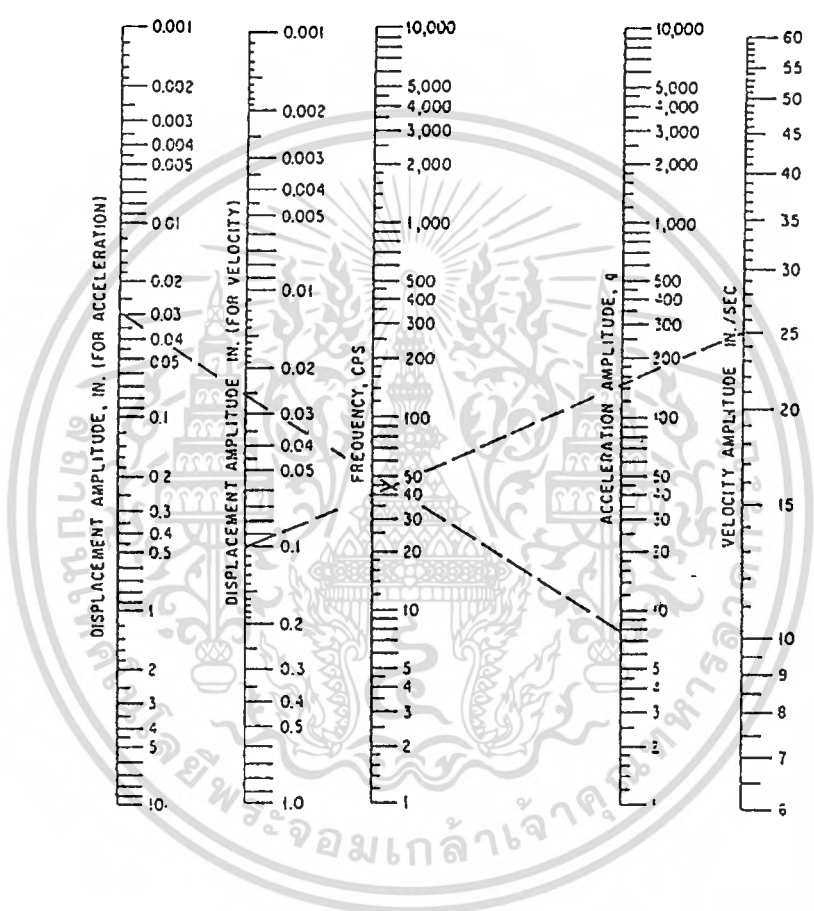
จากความสัมพันธ์ ของการจัด อัตราเร็ว และอัตราเร่ง ถ้าการจัดเป็นฟังก์ชันไซน์ซอซอด์ที่มีความเร็วเชิงมุมของคลื่นเท่ากับ ω ถ้าพิจารณาเฉพาะขนาดของแอมพลิจูด จะพบว่า

การจัด	$x = A \sin(\omega t)$	
อัตราเร็ว	$dx/dt = \omega A \cos(\omega t)$	(1.2)
อัตราเร่ง	$d^2x/dt^2 = -\omega^2 A \sin(\omega t) = -\omega^2 x(t)$	

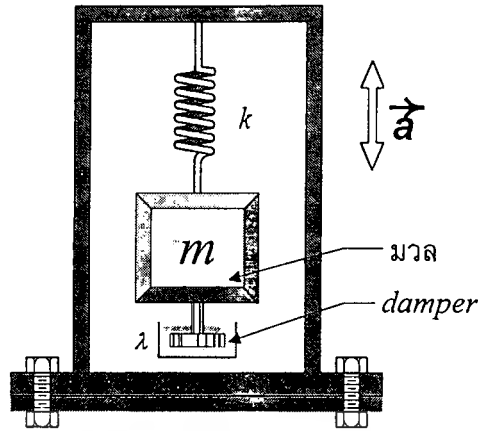
จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสามดังแผนภาพโนโมแกรม (nomogram) ดังรูปที่ 1.1[1]

โครงสร้างของตัวตรวจจับอัตราเร่งนั้น จะเป็นระบบของมวลและสปริงเพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ (1.1) และแสดงดังรูป 1.2 โดยมวล m ที่ติดกับสปริงนั้นจะเกิดการขจัดเมื่อระบบเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่ง a ส่วนวิธีที่จะวัดการขจัดของมวลนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธี อาทิ วัดจากการขจัดของมวลโดยตรง[2] วัดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อ หรือคุณสมบัติทางกายภาพภายในระบบเอง เช่น วัดจากการเปลี่ยนแปลงตัวต้านทานเพียโซ วัดจากคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) วัดจากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

สภาพต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistive) ปรากฏการณ์แรงเคลื่อนเนื่องด้วยความร้อน (thermoelectric) รวมถึงการเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุ (capacitive) [3]



รูปที่ 1.1 โนโมแกรมของการสั่นแบบฮาร์มอนิกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และขนาดของ อัตราเร่งต่อขนาดของการขจัด (ด้านซ้ายมือของแผนภาพ) และความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่และขนาดของอัตราเร็วต่อการขจัด(ด้านขวามือของแผนภาพ) ยกตัวอย่าง เช่น การ เคลื่อนที่มีการขจัดแบบฮาร์มอนิกเท่ากับ 0.03 นิ้ว ที่ความถี่ 50เฮิรตซ์จะมี ขนาดอัตราเร่ง เท่ากับ 7.7 g หรือ ถ้าทราบว่าการขจัดแบบฮาร์มอนิกเท่ากับ 0.10 นิ้ว ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์ จะมีขนาดอัตราเร็วเท่ากับ 25.1 นิ้วต่อวินาที เป็นต้น [1]



รูปที่ 1.2 ระบบมวลและสปริง

นอกจากเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมแล้ว ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอนยังต้องอาศัยเทคนิคการสร้างไมโครแมชีน(micromachine)ซึ่งต้องใช้กระบวนการกัดด้วยสารเคมี ก๊าซ หรือการกัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า(electro-chemical etching)

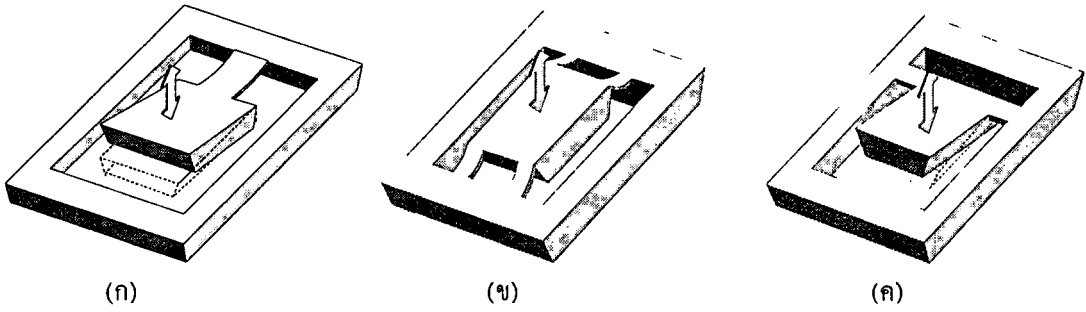
นอกจากขนาดที่กระทัดรัดแล้ว ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอนนั้นยังมีความสามารถสูง มีความแม่นยำ และมีความเชื่อถือได้สูง จึงทำให้ขีพวงจรถ่ายจับอัตราเร่งได้รับความนิยม และมีมูลค่าการตลาดสูง ดังจะพบได้ว่ามีบทบาทเป็นอันมากต่อการแพทย์ การขนส่ง การศึกษา การพาณิชย์ และการบันเทิง ซึ่งการประยุกต์ใช้งานขีพวงจรถ่ายจับอัตราเร่งจะแสดงดังตารางที่ 1.1

ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอนนั้นมีขนาดเล็ก จึงตอบสนองต่อการใช้งานที่มี loading effect เล็กๆ และมีช่วงความถี่ใช้งานที่กว้าง รูปร่างของตัวตรวจจับอัตราเร่งนั้นสามารถยึดหลักการเคลื่อนที่และพลวัต(dynamic)ของโครงสร้างนั้นได้ดังรูปที่ 1.3 อันประกอบด้วยแบบคานยื่น(cantilever beam) สะพาน(bridge) หรือทอร์ชันบาร์(torsion bar) โดยถ้ามีการเพิ่มมวลสั่นไหว(seismic mass) เข้าไป จะช่วยเพิ่มความไวในการรับรู้มาก โดยโครงสร้างดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่เหมือนสปริง ซึ่งความแข็งของสปริงขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างเอง และโดยวิธีไมโครแมชีนสามารถสร้างให้มวลและส่วนที่เป็นสปริงมีขนาดที่ต่างกันมาก ซึ่งช่วยให้เกิดความไวในการรับรู้สูง ขึ้นมาก จึงสามารถวัดอัตราเร่งที่มีขนาดเล็กๆ เช่น หนึ่งในล้านของแรงโน้มถ่วง ($\mu g = 1 \times 10^{-6} g$) และเนื่องจากซิลิกอนนั้นมีความแข็งแรง (stiffness) มากแม้ว่าเมื่อมีโครงสร้างที่บอบบาง จึงสามารถวัดอัตราเร่งได้สูงจนถึง $1000g$ [4]ได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกโครงสร้างแบบคานยื่นเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีพลวัตทางพลวัตไม่ซับซ้อน ดังจะได้วิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับอัตราเร่ง [4]

งานที่เกี่ยวข้อง/ (ข้อพิจารณา)	การประยุกต์ใช้
ยานกรรม (เชื่อถือได้ ราคาถูก อายุการใช้งาน สิ่งแวดล้อม ที่เลวร้าย)	— การควบคุมถุงลมนิรภัย (air bag) — การควบคุมการขับเคลื่อน — การนำร่อง (navigation) — การควบคุมระบบเบรก ABS
อากาศยาน (เชื่อถือได้ อายุการใช้งาน สิ่งแวดล้อมที่เลว ร้าย)	— การควบคุมการขับเคลื่อน — ศึกษาการร่อนถลา — การนำวิถี
การแพทย์ (ความเชื่อถือได้ ขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ)	— ศึกษาการเคลื่อนไหวผนังหัวใจก่อนหัวใจวาย — ศึกษาการเคลื่อนตัวผนังมดลูกก่อนจะคลอดลูก โดยปกติ หรือมีการแท้ง — การวัดสภาวะเคลื่อนไหวของร่างกาย แขน ขาผู้ ป่วยที่เป็นโรคเคลื่อนไหวไม่ปกติ เช่น โรคพาร์ กินสัน (Parkinson disease)
การบินเชิง (ราคาถูก ขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ)	— เครื่องสวมศีรษะ (Headset) และถุงมือ — โรงภาพยนตร์สมจริง (simulation theater) — ระบบป้องกันกระตุก (anti-jitter) ในกล้องถ่ายวิ ดีโอ
การศึกษา (เชื่อถือได้ ขนาดเล็ก)	— ศึกษาการเคลื่อนตัวภูเขา น้ำแข็งก่อนแตกตัว — ปากกาจำลองเซ็นได้
อื่นๆ	— วัดการสั่น — stabilized platform สำหรับงานโยธา — navigation ในระบบ Geometrical Positional System — ระบบหุ่นยนต์

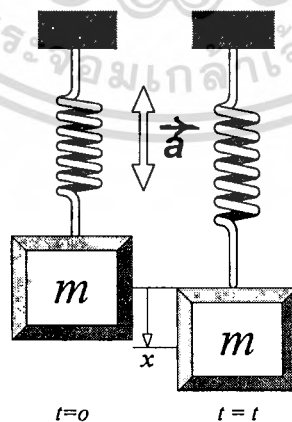
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 โครงสร้างสปริงแบบต่างๆ ในตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (ก)แบบคานยื่น (ข) แบบสะพาน (ค) แบบคานบิด (torsion bar)

1.2 ทฤษฎีของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบมวลและสปริง

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 1.1 แล้วว่าส่วนประกอบที่สำคัญของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กก็คือ มวล m และสปริงซึ่งสมมติให้มีค่าคงที่สปริงเท่ากับ k บรรจุอยู่ในกระบอกที่บรรจุของเหลวที่ทำให้เกิดการหน่วง (damping fluid) ที่มีสัมประสิทธิ์การหน่วงเท่ากับ λ เพื่อลดอันตรายจากการกำทอน (resonant) ของระบบ การตอบสนองของสปริงต่อแรงภายนอกก็ถือการยืดหรือหดตัวของสปริงอันเนื่องมาจากแรงตามสมการนิวตันนั่นเอง การวัดการขจัด (displacement) ของมวล m สัมพันธ์กับกลองที่บรรจุของเหลวที่มีการเคลื่อนที่ก็เป็นการวัดอัตราเร่งนั่นเอง เพื่อเป็นการง่าย จะสมมติในเบื้องต้นว่าสปริงนี้ไร้มวล มีความไวต่ออัตราเร่งในแนวเดียวกับตัวสปริง และสปริงเคลื่อนที่โดยไร้ความฝืด ดังแสดงรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การขจัดของระบบมวลและสปริง

การขจัด $x(t)$ ณ เวลา t ใดๆ จะเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$ma = m\ddot{x}(t) + \lambda\dot{x}(t) + kx(t) \quad (1.3)$$

ในสภาวะคงตัว(steady-state)การขี้ออกของสปริงจะมีความสัมพันธ์กับอัตราเร่งคือ

$$\frac{x}{a} = \frac{m}{k} \quad (1.4)$$

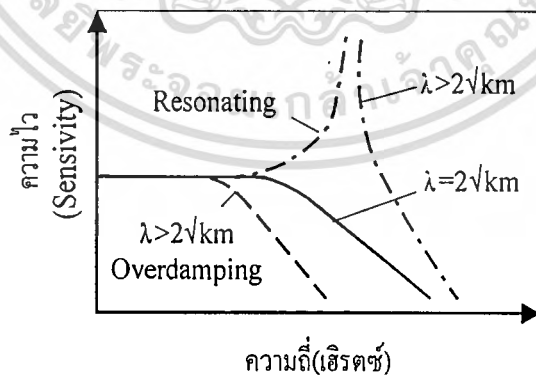
สมการที่ (1.4) จะบอกถึงความไวของตัวตรวจจذبอัตราเร่ง x/a ซึ่งจะแปรผกผันกับ m/k ซึ่งอัตราส่วน m/k นี้จะเป็นค่าความถี่กำทอนธรรมชาติ f_r (natural resonant frequency) ของระบบที่ไม่มี การหน่วง นั่นคือ

$$f_r = 2\pi(m/k)^{-1/2} \quad (1.5)$$

จากสมการ (1.5) จะพบว่าถ้าต้องการความไวสูงขึ้นก็จะตอบสนองต่อความถี่ที่ต่ำลง นอกจากนี้การหน่วงจะทำให้การตอบสนองต่อความถี่เปลี่ยนไปเช่นกัน

การหน่วงนั้นจะทำให้การตอบสนองความถี่เปลี่ยนไปได้เช่นกัน ในกรณีหน่วงเกิน (overdamping) จะทำให้ช่วงความถี่ตอบสนองแคบลง ส่วนกรณีหน่วงขาด (underdamped) ก็จะทำให้เกิด peaking ขึ้นดังรูปที่ (1.5) ในกรณีที่ต้องการให้มีช่วงตอบสนองความถี่ที่แบนราบ (flat band frequency) รวมถึงหลีกเลี่ยงการแตกหัก ณ ความถี่กำทอนควรให้การหน่วงมีค่าดังนี้

$$\lambda \geq 2(km)^{1/2} \quad (1.6)$$



รูปที่ 1.5 การตอบสนองต่อการสั่นแบบฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ

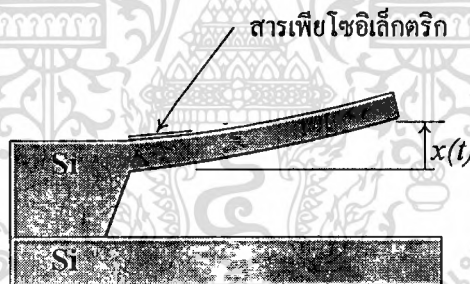
นิยามสัมประสิทธิ์ความหน่วงวิกฤติ $\lambda_c = 2m\omega_n$ และนิยามอัตราส่วนความหน่วง (Damping ration) $\zeta = \lambda/\lambda_c$ ซึ่งนิยมใช้ในการบอกลักษณะการตอบสนองภายใต้การหน่วงต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดการขจัดของมวลนั้น สามารถวัดได้สองวิธีหลักๆคือ การวัดการขจัดโดยตรง หรือ การวัดโดยอ้อม โดยวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในสปริง หรือจากคุณสมบัติอื่นที่สามารถวัดการขจัดนั้นได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งด้วยซิลิกอน และสร้างให้มีขนาดเล็กเพียง $2 \times 2 \text{ mm}^2$ จึงไม่สามารถวัดการขจัดได้โดยตรง จึงใช้วิธีวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างคานยื่นขณะที่มีการเห (deflection) แทน

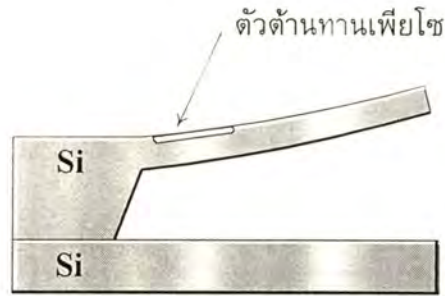
วิธีวัดการเหของโครงสร้างคานยื่นขณะที่เคลื่อนที่ภายใต้อัตราเร่งนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น

(ก) วิธีเพียโซอิเล็กทริก บริเวณปลายคานด้านที่ไม่เคลื่อนที่จะสร้างองค์ประกอบที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกขึ้น เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ดังรูปที่ 1.6 เมื่อคานเห ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบริเวณผิวของสารเพียโซอิเล็กทริกนั้นได้ การวัดสัญญาณเอาต์พุตได้จากแรงดันตกคร่อมชั้นสารเพียโซอิเล็กทริกนี้ได้ อย่างไรก็ตามประจุที่เกิดขึ้นจะสูญหาย หรือเกิดเป็นกระแสรั่วขึ้น อีกทั้งไม่สามารถใช้งานวัดอัตราเร่งสถิต (static acceleration) ได้



รูปที่ 1.6 ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก

(ข) วิธีตัวต้านทานเพียโซ จะสร้างตัวต้านทานเพียโซด้วยการแพร่สารเจือด้วยความร้อนขึ้นบริเวณปลายคานด้านที่ไม่เคลื่อนไหวดังรูปที่ 1.7 เมื่อคานเกิดการเหความเครียดที่เกิดขึ้นจะทำให้ความต้านทานดังกล่าวเปลี่ยนไป เนื่องจากการสร้างใช้เทคโนโลยีวงจรรวมจึงสามารถสร้างเป็นวงจรมอนอลิธิก (monolithic) ที่มีขนาดเล็กขึ้นได้



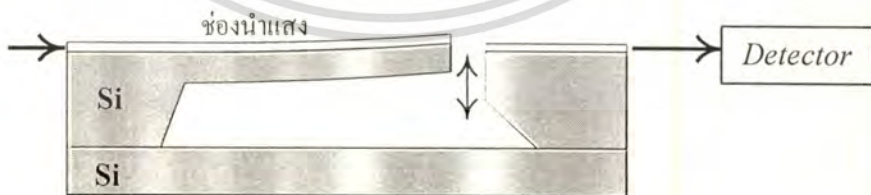
รูปที่ 1.7 ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบตัวต้านทานเพียโซ

(ค) วิธีวัดค่าเก็บประจุ ผิวของคานด้านล่างหรือทั้งสองด้านจะเคลือบโลหะไว้ เมื่อคานเหว่งจะทำให้ค่าเก็บประจุของตัวกลางระหว่างขั้วโลหะของคานและฐานรองเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ โดยแสดงดังรูปที่ 1.8



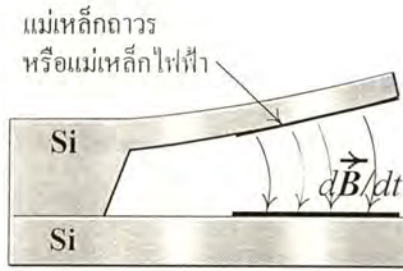
รูปที่ 1.8 ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบตัวเก็บประจุ

(ง) วิธีทางแสง จะสร้างช่องนำแสง (light wave-guide) ขึ้นบนผิวด้านบนของคานยื่น และมีที่ตรวจจับแสงที่ปลายคานอีกด้านหนึ่งดังรูปที่ 1.9 เมื่อคานเหว่งจะทำให้ความเข้มแสงเปลี่ยนไป



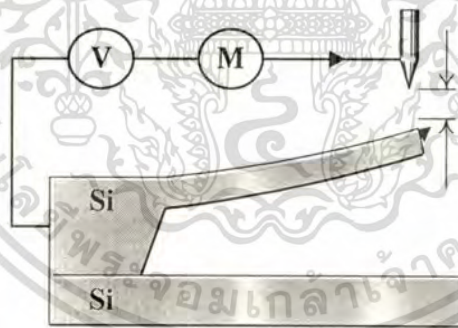
รูปที่ 1.9 ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบช่องนำแสง

(จ) วิธีทางแม่เหล็ก บริเวณปลายอิสระจะสร้างแม่เหล็กถาวร หรือแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น การเหว่งของคานจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตรวจจับได้ ณ บริเวณด้านล่างของคานเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบสนามแม่เหล็ก

(จ) วิธีกระแสทันแนล (tunneling current) จะมีรูปร่างของอุปกรณ์ตามรูปที่ 1.11 บริเวณปลายอิสระด้านบนของคานจะเคลือบโลหะไว้ โดยมีระยะห่างระหว่างเข็มโลหะหนึ่งเท่ากับ x_d ซึ่งมีค่าประมาณ 10 อังสตรอม ความต้านทานในระยะห่างดังกล่าวจะมีค่าประมาณ $R \cdot \exp(-2\kappa x)$ เมื่อ R ประมาณ 10 เมกกะโอห์ม ซึ่งเป็นค่าความต้านทานเมื่อเข็มสัมผัส การวัดแบบกระแสทันแนลก็คือการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานอย่างหนึ่ง เพียงแค่ความไวของการวัดแบบนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวคานแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถวัดการเหวี่ยงของคานได้ในระดับ 2-3 อังสตรอมได้ กระแสที่ไหลผ่านปลายเข็มจะขึ้นกับความต้านทานที่ปลายเข็มนั้นเอง



รูปที่ 1.11 ตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบกระแสทันแนล

1.3 ข้อดีข้อเสียของตัวตรวจจับอัตราเร่งประเภทตัวต้านทานเพียโซ

ปรากฏการณ์ตัวต้านทานเพียโซเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุซึ่งค่าสภาพต้านทาน (resistivity) ของก้อนผลึกจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแรงเค้นจากภายนอก วัสดุหลายอย่างเมื่อได้รับแรงเค้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพคล่อง (mobility) ของประจุพาหะตามปริมาตรที่เปลี่ยนไป การที่ปริมาตรเปลี่ยนไปจะมีผลกระทบต่อช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ระหว่างแถบนำ (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band) ของวัสดุนั้น แต่ปรากฏการณ์ตัวต้านทานเพียโซนั้นจะพบการเปลี่ยนแปลงได้เด่นชัดกว่ามากในการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทาน ซึ่งจะอธิบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบใช้ประโยชน์จากการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยทฤษฎีต้นแบบแถบพลังงานแบบหลายวัลเลย์ (many valley-model) วัสดุทุกประเภทจะพบปรากฏการณ์ตัวต้านทานเพียโซได้เด่นชัดไม่เท่ากัน ซึ่งจะพบได้มากในสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลึกเดี่ยว (monocrystalline) ของซิลิกอนซึ่งจะมีคุณสมบัติทางกลที่ดีด้วย จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้สร้างเป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น ใช้วัดความดัน การไหล แรง และอัตราเร่ง

หลังจากการค้นพบปรากฏการณ์ดังกล่าว ได้มีการศึกษาถึงกลไกของปรากฏการณ์รวมไปถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจจับชนิดตัวต้านทานเพียโซขึ้นอย่างกว้างขวาง อาทิ การนำเอาเทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (thermal diffusion) มาสร้างหัววัดแรงดันบนไดอะแฟรมของซิลิกอน การใช้งานในยุคนั้นเป็นการใช้เกจวัดความเครียด (strain gage) แบบซิลิกอนแทนแบบโลหะ ซึ่งจะพบข้อดีเมื่อเทียบกับโลหะคือ[5]

- เกจแฟกเตอร์ (gage factor) ของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าในโลหะหลายเท่า
- ซิลิกอนเป็นวัสดุที่แกร่ง (robust material)
- ซิลิกอนไม่เกิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis)
- ความเค้นที่เกิดขึ้นจะถ่ายทอดไปยังเกจตัวต้านทานได้อย่างสมบูรณ์
- ตัวต้านทานสารเจือนั้นจะมีความลึกจำกัดเฉพาะที่ผิวเท่านั้น (ประมาณ 0.1 ไมครอน) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด
- สามารถสร้างวงจรวัดอย่างง่ายคือวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ที่มีตัวต้านทานเข้าคู่กัน (matching) ได้อย่างสมบูรณ์บนชิปเดียวกันได้
- สามารถสร้างตัวตรวจจับที่มีขนาดเล็ก
- สามารถสร้างเป็นปริมาณมาก (mass fabrication) เนื่องจากใช้เทคโนโลยีวงจรรวมจึงมีราคาถูก
- นอกจากนี้ยังสามารถสร้างวงจรอื่นๆ เช่น วงจรขยายสัญญาณหรือวงจรชดเชยอุณหภูมิลงบนชิปเดียวกันได้ ช่วยลดการต่อเชื่อมวงจรภายนอก ทำให้ลดความยุ่งยาก สัญญาณรบกวน ลดข้อจำกัดขนาดของพื้นที่ที่ทำการวัด ลดการ creep และ ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ได้

จากหัวข้อ 1.2 ได้กล่าวเปรียบเทียบโครงสร้างมวลและสปริงซึ่งนำมาประยุกต์สำหรับตัวตรวจจับอัตราเร่งประเภทต่างๆ อุปกรณ์ที่กล่าวในเบื้องต้นแต่ละประเภทยังมีข้อดีข้อเสียต่าง ๆ กัน ดังจะได้สรุปในตารางที่ 1.2 ดังนี้

ตารางที่ 1.2 ข้อดีข้อเสียของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอนแต่ละประเภท[2]

ประเภท	การเหนี่ย ยดูดที่วัดได้ (μm)	ข้อดี	ข้อเสีย
เพียโซอิเล็กทริก	11	- มีขนาดเล็ก - มีความไวสูง - ไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยง - การวัดไม่ซับซ้อน - สารเพียโซเชื่อมสภาพง่าย	- วัดอัตราเร่งสถิตไม่ได้ - ประจุสลายไปตามกาลเวลา
ตัวต้านทานเพียโซ	2	- การสร้างง่าย - การวัดไม่ซับซ้อน - วัดอัตราเร่งแบบสถิตได้ - มีความเป็นเชิงเส้นสูง	- ต้องใช้ไฟเลี้ยง - ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ - อาจมีการเสื่อมของสภาพต้านทานเพียโซตามกาลเวลา
ตัวเก็บประจุ	43	- มีความไวสูง - มีความละเอียดในการวัดสูง - ไม่มีผลเนื่องจากอุณหภูมิ	- ต้องใช้ไฟเลี้ยง - การวัดซับซ้อน - อูกรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอก - มีความเสถียรสูง
ช่องนำแสง	0.3	- มีความแม่นยำสูง - มีความละเอียดในการวัดสูง - สัญญาณวัดไม่เปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมตามกาลเวลา	- การสร้างซับซ้อน - มีปัญหาจากการงอเริ่มแรกของคาน - การวัดซับซ้อน - อาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านด้วยสายตา - ชุดการทดลองวัดมีขนาดใหญ่
สนามแม่เหล็ก	2	- มีความละเอียดในการวัดสูง - สัญญาณวัดไม่เปลี่ยนหรือเสื่อมตามกาลเวลา	- อูกรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอก - สัญญาณต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้มีค่าสูง
กระแสทันแนล	10^{-3}	- สามารถวัดสัญญาณได้ต่ำสุด - มีความละเอียดในการวัดสูง	- การคำนวณซับซ้อน - เกิดการเสื่อมของโลหะปลายเข็มและที่เคลือบบนคานตามกาลเวลา

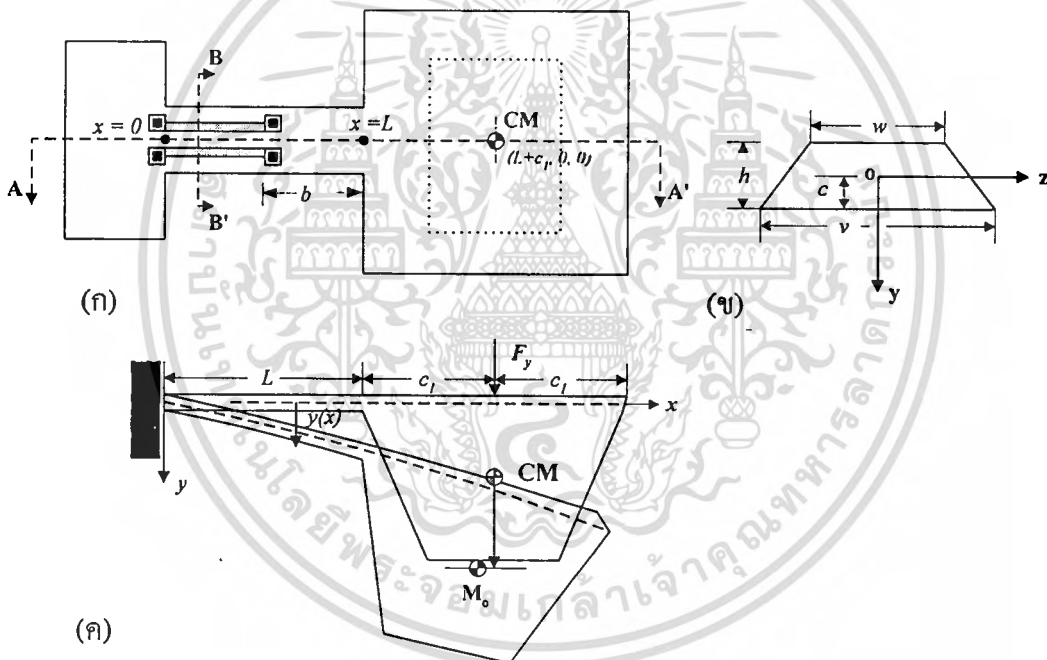
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบตัวต้านทานเพียโซ

2.1 โครงสร้างของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ด้วยเทคนิคการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก กานขึ้นจะมีภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งมีความสมมาตรกับแกน y สมมติในเบื้องต้นว่าการซ้อนทับ(alignment)ของด้านต่างๆมีความถูกต้องแม่นยำ รูปร่างของกานถูกต้องและมีความเรียบสม่ำเสมอ ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดขนาดความกว้างยาว หนาของกานและมวลโดยสัญลักษณ์ตามรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบกานขึ้น (ก)ด้านบน (ข)ด้านข้าง(แนว BB') (ค) ด้านข้าง (แนว AA') และการขจัดอันเนื่องมาจากแรงกระทำ F_y ณ จุดกึ่งกลางมวล

2.2 กลศาสตร์ของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

จากรูปที่ 2.1 จุดกำเนิดแกน xyz อยู่จุดกึ่งกลางของคานตรงรอยต่อระหว่างคานและฐานรองมวลพอดี ถ้าให้อัตราเร่ง $\vec{a} = a_x\hat{i} + a_y\hat{j} + a_z\hat{k}$ เป็นอัตราเร่งของระบบ จะก่อให้เกิดแรง $\vec{F} = (M + m)\vec{a}$ กระทำ ณ จุด CM ทำให้คานมีการขจัดทั้งแกน xyz รวมทั้งเกิดโมเมนต์รอบแกนต่างๆด้วย โดยจะสมมุติในเบื้องต้นว่าแรงหรือโมเมนต์ทั้งหมดเสมือนกระทำที่ปลายคานขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ [6]

แรงที่กระทำต่อระบบในแนวแกน xyz

$$F_x = -(ma_x + Ma_x) \quad (2.1)$$

$$F_y = -(ma_y + Ma_y) \quad (2.2)$$

$$F_z = -(ma_z + Ma_z) \quad (2.3)$$

โมเมนต์ที่กระทำต่อระบบในแนวแกน xyz

$$M_x = Ma_y - Ma_zc_2 \quad (2.4)$$

$$M_y = -Ma_xc_3 + (ma_zp + Ma_zc_1) \quad (2.5)$$

$$M_z = -Ma_xc_2 + (ma_y p + Ma_y c_1) \quad (2.6)$$

เมื่อ

a_x = อัตราเร่งในแนวแกน x

a_y = อัตราเร่งในแนวแกน y

a_z = อัตราเร่งในแนวแกน z

c_1 = ระยะจากปลายคานถึงจุดศูนย์กลางมวลของมวล M ในแนวแกน x

c_2 = จุดศูนย์กลางมวลของมวล M ในแนวแกน y

c_3 = จุดศูนย์กลางมวลของมวล M ในแนวแกน z

m = มวลของฐานรองมวล หรือ กระเดื่อง (paddle)

M = มวลเพื่อตรวจสอบ (proof mass)

$(L+p,0,0)$ = จุดศูนย์กลางมวลของกระเดื่อง

$(L+c_1,0,0)$ = จุดศูนย์กลางมวลของมวลตรวจสอบ

h = ความหนาของคาน

L = ความยาวของคาน

w, v = ความกว้างด้านบนและด้านล่างของคาน

b = ระยะระหว่างปลายตัวต้านทานกับรอยต่อของคานและมวล

$L-b$ = ความยาวตัวต้านทาน

ระนาบของคานและกระเดื่องคือระนาบ (100) ขอบเอียงเป็นระนาบ (111) กระเดื่องและคานจะมีโคออร์ดิเนตตามแกน y และ z เดียวกัน ในกรณี c_2 และ c_3 อยู่ในแกน x ค่า M_x และพจน์แรกของ M_y และ M_z จะเท่ากับศูนย์

ในหัวข้อต่อไปจะทำให้ทราบว่าผลจากแรงและโมเมนต์อื่นนอกจาก F_y และ M_z จะมีผลต่อการตอบสนองน้อยมาก ดังนั้นในการคำนวณความไว (Sensitivity) ต่ออัตราเร่งในแกนอื่นอาจละเลยได้

ตำแหน่งการวางตัว (orientation) ของตัวด้านทานเพียโซมีความสำคัญเช่นกัน จึงควรวางตัวด้านทานในทิศทางที่เกิดความเค้นสูงสุดตามทฤษฎี ซึ่งก็คือทิศทาง $\langle 110 \rangle$ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

2.2.1 การเหนี่ยวนำด้วยแรงสถิตย์

การเหของคานเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้ (ภาคผนวก F)

$$y(x) = \begin{cases} \frac{F_y x^2}{2EI_z} \left(L - \frac{x}{3} + c_1 \right), & 0 \leq x \leq L \\ \frac{F_y L^2}{2EI_z} \left(\frac{2}{3} L + c_1 \right) + \left[\frac{F_y L^2}{2EI_z} + \frac{F_y c_1 L}{EI_z} \right] (x - L), & L \leq x \leq L + 2c_1 \end{cases} \quad (2.7)$$

โดย $F_y = \text{static load}$

$I_z =$ โมเมนต์ของความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคานรอบแกน z

$$= \frac{1}{12} w h^3 \text{ ถ้าอนุमानว่าพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก}$$

$$= \frac{h^3 (w^2 + 4vw + v^2)}{36(v + w)} \text{ สำหรับพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal)}$$

เมื่อปล่อยให้คานกลับสู่สมดุลจะเกิดการสั่นชั่วคราวตามแบบสปริง โดยจะมีความถี่ธรรมชาติซึ่งขึ้นกับอัตราส่วน $f = c_1/L$ ดังนี้

$$\omega_n \cong \sqrt{\frac{EI_z}{ML^3}} \sqrt{\frac{2 + 6f + f^2}{\frac{2}{3} + 4f + \frac{1}{2}f^2 + 14f^3 + 8f^4}} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) รากที่สองในพจน์ที่สองจะเป็นตัวกำหนดความถี่ธรรมชาติของระบบ นั่นคือ ถ้าคานสั้นลงในขณะที่มีมวลมีขนาดเท่าเดิมก็จะได้ความถี่ธรรมชาติสูงขึ้น ในทางกลับกัน ถ้ากำหนดให้ความยาวของคานและขนาดของมวลคงที่รากที่สองในพจน์แรกจะกำหนดความถี่ธรรมชาติขึ้นมา

แทนเนื่องจาก I_z นั้นขึ้นกับพื้นที่หน้าตัด โดยถ้าคานกว้างมากคานจะสั่นด้วยความถี่ที่สูงขึ้นแต่การไม่วางกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงความยาวของคานจะเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติได้ในอัตราที่เร็วกว่าการเลือกเปลี่ยนแปลงความกว้างของคาน เช่นเดียวกันถ้าเปลี่ยนแปลงความหนาของคานจะเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติในสัดส่วนที่เร็วกว่าตัวแปรอื่นๆ (ดูรายละเอียดในบทที่ 4)

2.2.2 การตอบสนองของระบบภายใต้อัตราเร่งไม่คงที่

ในการใช้งานตัวตรวจจับอัตราเร่ง สภาพอัตราเร่งมักจะไมคงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น การห้ามล้ออย่างกะทันหัน หรือการวัดการสั่นเพื่อตรวจสอบสภาพของท้องถนน ตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคานภายใต้อัตราเร่งไม่คงที่คือสัมประสิทธิ์การหน่วง λ การคำนวณสัมประสิทธิ์การหน่วงมีหลักการว่า ถ้าให้แรงซึ่งทราบพฤติกรรมแน่นอน (เช่น สัญญาณไซน์ สัญญาณพินเคิล หรือสัญญาณพัลส์) แก่ระบบ และทำการวัดการตอบสนอง เช่นการขจัด หรือความถี่กำทอน หรือวัดมุมวิถีภาคที่เลื่อนออกไป ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์การขจัดเมื่อให้แรงที่ทราบพฤติกรรมแน่นอนแก่ระบบ ดังจะจำแนกได้ดังนี้

2.2.2.1 การสั่นอิสระภายใต้การหน่วง (Viscously damped free vibration)

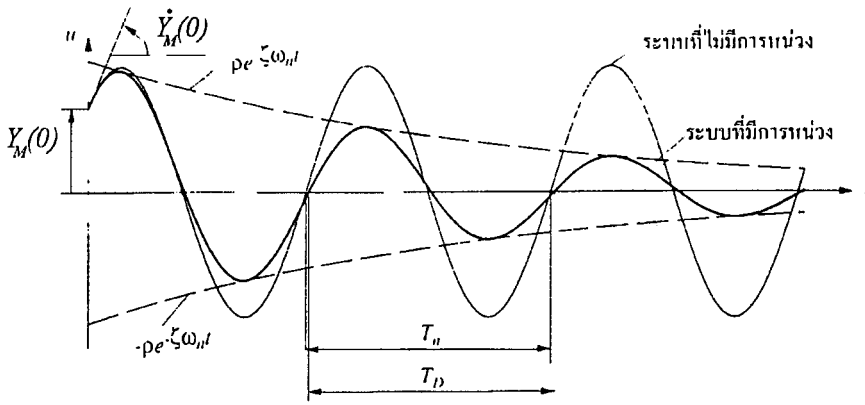
เมื่อดึงสปริงออกจากจุดสมดุลหยุดนิ่ง และปล่อยแรงนั้นออกไป ระบบจะเกิดการตอบสนองขึ้นแต่จะมีแอมพลิจูดลดลงเรื่อยๆตามเวลาที่ผ่านไป ลักษณะการตอบสนองที่มีการหน่วงจะมีสมการทั่วไปของการขจัดดังนี้

$$y_M(t) = e^{-\zeta \omega_n t} \left[y_M(0) \cos \omega_D t + \left(\frac{\dot{y}_M(0) + \zeta \omega_n y_M(0)}{\omega_D} \right) \right] \quad (2.9)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \text{ เป็นความถี่ของระบบภายใต้การหน่วง} \quad (2.10)$$

$$\text{และคาบของการหน่วง } T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.11)$$

และพลอตกราฟดังรูปต่อไปนี้



รูป 2.2 การตอบสนองของระบบสั่นอิสระภายใต้การหน่วง

พารามิเตอร์ที่อ่านได้จากกราฟนั้น ได้แก่

- (1) $y'_M(0)$ สร้างได้จากลากเส้นสัมผัสของกราฟ ณ เวลา $t=0$
- (2) เมื่อพิจารณาการห่อหุ้ม (envelop) ตามสมการที่ (2.9) อัตราส่วนของแอมพลิจูดของลูกคลื่นที่ n ต่อลูกคลื่นที่ $n+1$ ซึ่งห่างกันเท่ากับ T_D จะเป็นดังนี้

$$\frac{Y_M(n)}{Y_M(n+1)} = \exp\left(\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อใส่ลอการิทึมฐานธรรมชาติในสมการที่ (2.12) จะนิยาม δ เป็นส่วนลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmic decrement) ดังนี้

$$\delta = \ln \frac{Y_M(n)}{Y_M(n+1)} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.13)$$

ถ้าสัมประสิทธิ์การหน่วงมีค่าน้อย (< 0.2) จะพบว่า $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1$ ดังนั้นจะประมาณได้ว่า

$$\delta \approx 2\pi\zeta \quad (2.14)$$

นอกจากนี้สมการที่ (2.14) ยังใช้หาความถี่ธรรมชาติตามสมการที่ (2.10) ได้อีก นอกจากนี้ระยะ $y_M(0)$ คือการเหวี่ยงแรกสุดก่อนที่จะมีการสั่นซึ่งจะคำนวณอัตราเร่งหรือแรงกระทำ ณ เวลา 0 ได้โดยกลับไปใช้สมการที่ (2.7) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_M(0) = \left\{ \frac{ML^2}{2EI_z} \left(\frac{2}{3}L + c_1 \right) + c_1 \left(\frac{ML^2}{2EI_z} + \frac{Mc_1L}{EI_z} \right) \right\} a_y \quad (2.15)$$

2.2.2.2 การสั่นแบบหน่วงภายใต้แรงบังคับแบบคลื่นไซน์

ถ้าให้แรงกระทำ $F(t) = F_o \sin(\omega t - \Phi)$ แก่ฐานที่ติดตัวตรวจจับอัตราเร่งไว้ การขจัดของฐานจะทำให้มวลตรวจสอบ M เกิดการขจัดด้วยเช่นกัน การขจัดของมวลตรวจสอบ $y_M(t)$ จะมีสมการทั่วไป ดังนี้

$$y_M(t) = \frac{F_o}{k} R_d \sin(\omega t - \Phi) \quad (2.16)$$

เรียก R_d ว่าตัวคูณของการขจัด (Displacement response factor) โดย

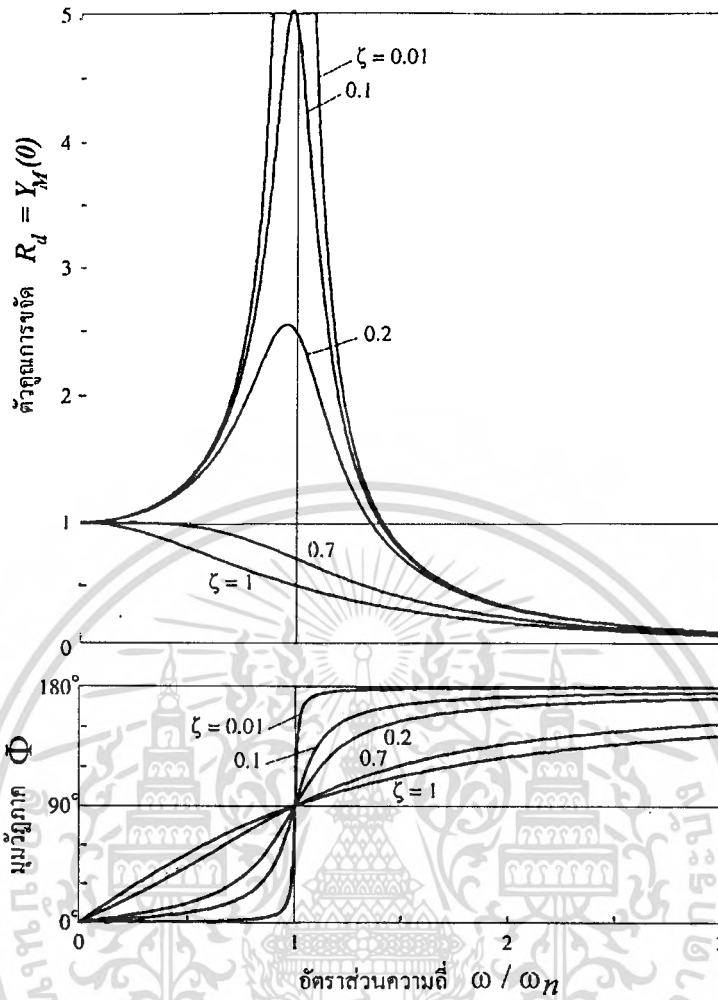
$$R_d = \left(\left[1 - (\omega/\omega_n)^2 \right]^2 + \left[2\zeta(\omega/\omega_n)^2 \right]^2 \right)^{-1/2} \quad (2.17)$$

และ Φ เป็นวัฏภาคล่าหลัง (phase lag) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\Phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right\} \quad (2.18)$$

ในรูปที่ 2.3 เป็นกราฟของ R_d และ Φ เมื่อพลอตเทียบกับอัตราส่วน ω/ω_n ภายใต้ตัวกลางที่มีองค์ประกอบการหน่วงต่างๆ กันดังรูปที่ 2.3

ในช่วงความถี่ต่ำ $\omega/\omega_n \ll 1$ ระยะขจัดของสปริงที่ค่าใกล้เคียงกับระยะขจัดของแรงภายนอก มุมวัฏภาคมีค่าประมาณ 0 นั่นคือสัญญาณกระตุ้นและการตอบสนองจะอยู่ในมุมวัฏภาคเดียวกัน หรือใกล้เคียงกันมาก ที่ความถี่สูงๆ $\omega/\omega_n \gg 1$ แอมพลิจูดจะมีค่าลดลงอย่างมากจนเข้าใกล้ค่าคงที่ นั่นคือไม่ว่าจะให้แรงเป็นเท่าใด การตอบสนองจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากสัญญาณอัตราเร่งของสปริงและสัญญาณกระตุ้นมีมุมวัฏภาคกลับกัน 180 องศาทำให้มีการหักล้างสัญญาณกันตลอดเวลา ดังนั้นตัวตรวจจับอัตราเร่งจึงไม่ใช่อุปกรณ์วัดสัญญาณที่ความถี่สูง



รูปที่ 2.3 ตัวคูณของการขจัดและมุมวิถีภาคของระบบที่มีการหน่วงเมื่อถูกขับด้วยแรงแบบคลื่น
ไซน์

ถ้าติดตัวตรวจจับอัตราเร่งกับวัตถุที่ต้องการวัดอัตราเร่ง ในขณะที่วัตถุมีแอมพลิจูดของ
อัตราเร่งในแกน y เท่ากับ $\ddot{y}_{obj}(t)$ มวลของตัวตรวจจับอัตราเร่งจะมีการขจัดเท่ากับสมการดังต่อไปนี้

$$y_M(t - \Phi) = - \left[\left(\frac{1}{\omega_n^2} \right) R_d \right] \ddot{y}_{obj}(t) \quad (2.19)$$

ซึ่งจะพบว่าอัตราเร่งของสิ่งที่จะวัดนั้นสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากการขจัดของมวล M เพียงแต่
ต้องคูณด้วย $-R_d/\omega_n^2$ นั้นเอง แต่สัญญาณอัตราเร่งที่อ่านค่าได้จะมีมุมเลื่อนออกไปเท่ากับ Φ และ
มีเวลาตอบสนองช้าลงเท่ากับ Φ/ω ตัวแปร R_d และ Φ เป็นสิ่งที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่บังคับ
ระบบ แต่ค่า ω_n^2 นั้นคงที่และไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของระบบแต่อย่างใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวตรวจจับอัตราเร่งนั้นต้องการให้ R_d และ Φ เป็นอิสระต่อความถี่กระตุ้นให้มากที่สุดเนื่องจากในสัญญาณอัตราเร่งอาจประกอบด้วยฮาร์มอนิกของสัญญาณมากมาย นั่นคือต้องการให้ผลของการวัดมีความใกล้เคียงกับสัญญาณที่วัดมากที่สุด โดยยอมให้มีมุลำหลังที่คงที่ซึ่งโดยปกติมุลำหลังดังกล่าวจะมีค่าน้อยมาก ถ้าพิจารณากราฟของ R_d ในรูปที่ 2.3 จะพบว่าบริเวณ $\omega/\omega_n \ll 0.5$ (ที่ $\zeta \leq 0.7$) ค่า R_d มีค่าประมาณ 1 มีค่าผิดพลาดประมาณ 2.5% และมีค่า Φ ค่อนข้างเป็นเชิงเส้นซึ่งอาจถือได้ว่า Φ/ω มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงประมาณได้ว่าตัวตรวจจับอัตราเร่งที่ดีนั้นควรใช้งานในช่วงความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติครึ่งหนึ่ง โดยอนุญาตให้เกิดการหน่วงได้ไม่เกิน 70% และไม่เหมาะสมใช้งานที่ความถี่สูงๆ

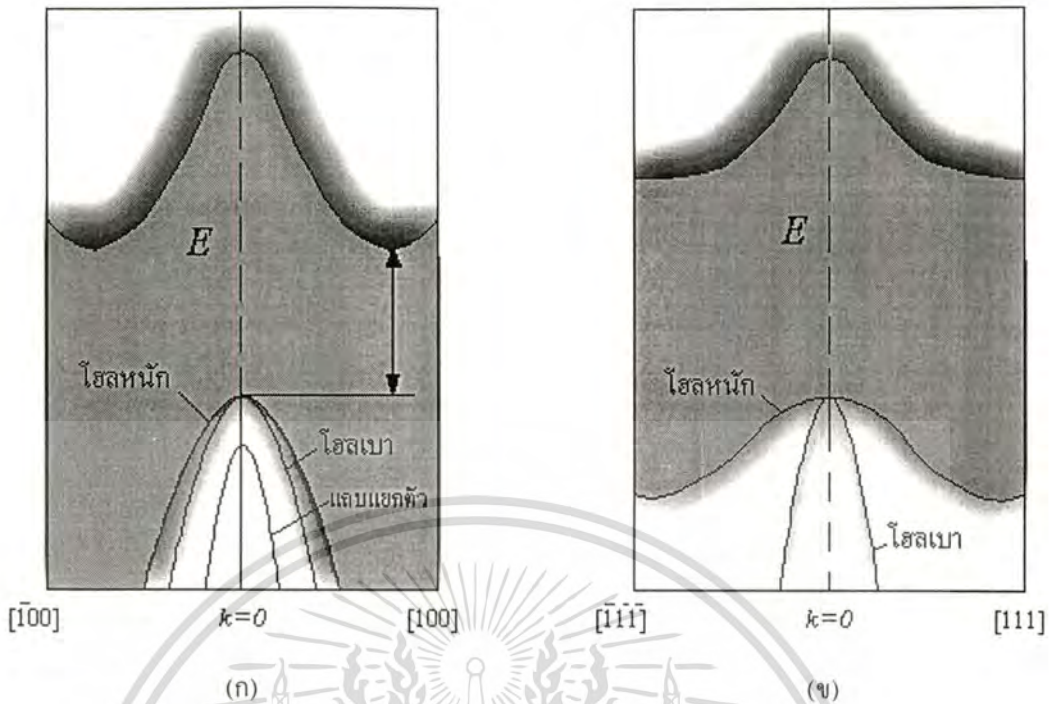
2.3 ปรากฏการณ์สภาพต้านทานเพียโซ (Piezoresistive effect)

2.3.1 โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน[8] [9]

จากสมการคลื่นซึ่งบอกความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในผลึก ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เป็นไปได้ $E(k)$ ของอิเล็กตรอนที่กำลังเคลื่อนที่ไปในทิศทางระบุด้วยเวกเตอร์เลขคลื่น (wave number) $\vec{k}$ ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนจะถูกกระทบด้วยความเป็นคาบของผลึกเอง ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการกระจายสถานะพลังงานของตัวเองใหม่ จึงเกิดแถบพลังงานยินยอม (allowed band) สองแถบที่ถูกคั่นด้วยช่วงพลังงานที่ไม่สามารถที่สถานะอยู่ได้หรือเรียกว่าแถบต้องห้าม (forbidden band) แถบที่เคยมีสถานะอิเล็กตรอนอยู่จนเต็มเมื่ออุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์เรียกว่าแถบวาเลนซ์ (valence band) ส่วนแถบยินยอมถัดไปซึ่งจะมีสถานะอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งเรียกว่าแถบนำ (conduction band)

ความสัมพันธ์ระหว่าง E และ k ในสารกึ่งตัวนำค่อนข้างซับซ้อน ค่าความยาวคลื่น λ ของฟังก์ชันคลื่น ที่ยอมให้มีได้ในผลึกก้อนหนึ่งนั้นจะเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม a ไปจนถึงความยาวอนันต์ เนื่องจาก $k = 2\pi/\lambda$ ดังนั้นในทิศทางหนึ่งๆ ค่า k จึงสามารถมีได้ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง $2\pi/a$

ซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำประเภท indirect band gap หรือมีจุดต่ำสุดของแถบนำที่ $k \neq 0$ โดยมีจุดต่ำสุดอยู่ที่ $[k_x, k_y, k_z] = \frac{2\pi}{a}[0.85, 0, 0] \quad \frac{2\pi}{a}[0, 0.85, 0] \quad \frac{2\pi}{a}[0, 0, 0.85]$ และทิศผกผันจุดต่ำสุดทั้งหกเรียกว่าวลเลย์ (valley) แทนสัญลักษณ์ด้วย v ในรูปที่ 2.4 เป็นแถบพลังงาน $E(k)$ ของซิลิกอนตามทิศทาง $[100]$ และ $[111]$



รูปที่ 2.4 แถบพลังงาน $E(k)$ ของซิลิกอน (ก)ทิศทาง [100] (ข) [111]

บริเวณใกล้ขอบของแถบนำ ($k = k_0$ ใดๆ) จะเขียนระดับพลังงาน $E(k, k_0)$ ได้ดังนี้

$$E(k_i, k_0) = E(k_0) + \hbar^2 \sum_{i=x,y,z} \frac{(k_i - k_{0i})^2}{2m_i^*} \quad (2.20)$$

โดย i แทนองค์ประกอบตามแกน xyz ของ $\vec{k}$ สำหรับซิลิกอนนั้น k_0 ก็คือเวกเตอร์ทั้งหกโดยมีค่า $E(k_0) = 1.1$ อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งจะเขียนแถบพลังงานได้เป็น

$$E(k) = 1.1 + \left(\frac{\hbar^2 k_l^2}{2m_l^*} + \frac{\hbar^2 k_t^2}{2m_t^*} \right) \quad (2.21)$$

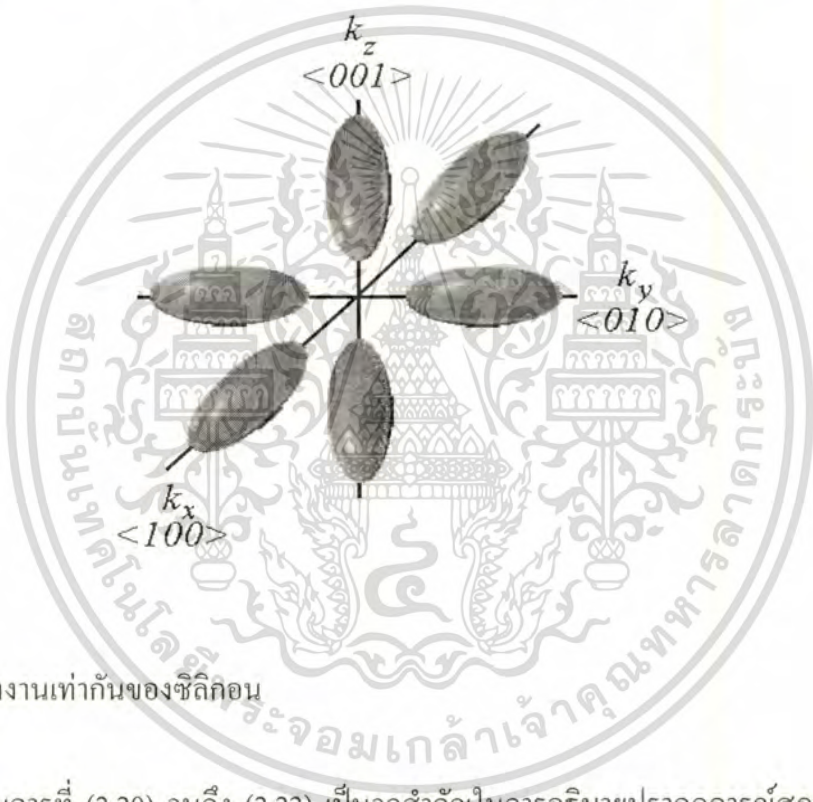
จากสมการ (2.21) จะปรากฏว่าไม่ว่าจะเคลื่อนที่ไปทางใดอิเล็กตรอนจะมีมวลประสิทธิผล (effective mass) สองชนิดคือ มวลประสิทธิผลตามยาว m_l^* (longitudinal effective mass) และมวลประสิทธิผลแนวขวาง m_t^* (transverse effective mass) ขึ้นเสมอ ซึ่ง $m_l^* = 0.98m_0$ และ $m_t^* = 0.19m_0$ เมื่อ m_0 เป็นมวลอิเล็กตรอนในสุญญากาศ $= 9.101 \times 10^{-31}$ กิโลกรัม

จากสมการ (2.20) จะเขียนสมการผิวพลังงาน (energy surface) ในแกน k_x, k_y, k_z ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} E(k_x, A) - 1.1 &= \frac{\hbar^2}{2m_0} \left[\frac{(k_x - A)^2}{0.98} + \frac{(k_y - A)^2}{0.19} + \frac{(k_z - A)^2}{0.19} \right] \\ E(k_y, A) - 1.1 &= \frac{\hbar^2}{2m_0} \left[\frac{(k_x - A)^2}{0.19} + \frac{(k_y - A)^2}{0.98} + \frac{(k_z - A)^2}{0.19} \right] \\ E(k_z, A) - 1.1 &= \frac{\hbar^2}{2m_0} \left[\frac{(k_x - A)^2}{0.19} + \frac{(k_y - A)^2}{0.19} + \frac{(k_z - A)^2}{0.98} \right] \end{aligned} \tag{2.22}$$

เมื่อ $A = 0.85(\frac{2\pi}{a})$ และ $a = 0.53$ อังสตรอม สมการ (2.22) เป็นสมการของทรงรี (ellipsoid) ซึ่งเรียกว่าสมการผิวพลังงาน (Energy Surface) และเขียนเป็นรูปคล้ายรูปที่ 2.5 ดังนี้



รูป 2.5 ผิวพลังงานเท่ากันของซิลิกอน

จากสมการที่ (2.20) จนถึง (2.22) เป็นจุดสำคัญในการอธิบายปรากฏการณ์สภาพต้านทานเพียโซในซิลิกอนชนิดเอ็นเนื่องจากอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ใช้เวลาในแถบนำ

เนื่องจากโฮลเป็นพาหะหลักในสารกึ่งตัวนำชนิดพี โฮลในแถบวาเลนซ์จะเป็นผู้กำหนดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดพี จากรูปที่ 2.4 จะพบว่าแถบวาเลนซ์จะแตกออกอย่างน้อยสองสาขา (branch) คือสาขาของโฮลหนัก (heavy hole) ซึ่งเป็นแถบที่กว้างกว่าแถบของโฮลเบา(light hole) สาขาทั้งสองมีจุดยอดตรงกันที่ $k_0 = 0$ สาขาที่สามที่แยกตัวออกจากสองสาขาแรก สาขาที่สามนี้ไม่มีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติสภาพต้านทานเพียโซ ในการคำนวณจะละเลยสาขาที่สามนี้ไปในทิศทาง $[111]$ นั้นจะพบว่าแถบโฮลเบาจะมีความแตกต่างมากกว่าในทิศทาง $[100]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่ผลึกได้รับแรงกระทำจากภายนอก นอกจากจะทำให้ระยะระหว่างโมเลกุลเปลี่ยนไปบ้างแล้ว ก็ยังทำให้เกิดการกระจายตัวของประจุพาหะขึ้นใหม่ทั้งในแถบนำและแถบวาเลนซ์ ทำให้ช่องว่างแถบพลังงานเปลี่ยนแปลง รวมทั้งสภาพคล่อง (mobility) ก็เปลี่ยนแปลงด้วย ในที่สุดสภาพนำ (Conductivity) หรือสภาพต้านทาน (resistivity) ก็มีการเปลี่ยนแปลงด้วย ในรูปที่ 2.6 แสดงลำดับเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพนำเมื่อผลึกได้รับแรงกระทำจากภายนอก



รูปที่ 2.6 การเกิดสภาพต้านทานเพียโซในสารกึ่งตัวนำ

ก่อนที่สารกึ่งตัวนำจะได้รับแรงกระทำ สภาพนำจะเท่ากันในทุกจุดของผลึก เมื่อได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพนำสัมพันธ์กับทิศทางดังนี้

$$\frac{\delta\sigma_{ij}}{\bar{\sigma}} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \left[en\mu_{ij}'' \frac{\delta n}{n} + en\mu_{ij}^p \frac{\delta p}{p} \right] + \frac{1}{\bar{\sigma}} \left[en\mu_{ij}'' \frac{\delta\mu_{ij}''}{\mu_{ij}''} + en\mu_{ij}^p \frac{\delta\mu_{ij}^p}{\mu_{ij}^p} \right] \quad (2.23)$$

เมื่อ $\bar{\sigma} = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ เป็นค่าเฉลี่ยสภาพคล่องในทิศทางตามแกนหลักของผลึก

e = ประจุอิเล็กตรอนอิสระ = 1.66×10^{-19} คูโลมบ์

n = ความเข้มข้นอิเล็กตรอน (อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

p = ความเข้มข้นของโฮล (อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\mu_{ij}'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^6 n_i \mu_{ij,i}''$ = ค่าเฉลี่ยสภาพคล่องของอิเล็กตรอนจากทุกวิถีในแถบนำ

$\mu_{ij}^p = \frac{1}{p} \sum_B p_B \mu_{ij,B}^p$ = ค่าเฉลี่ยสภาพคล่องของโฮลจากทุกสาขาในแถบวาเลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แรงเค้นยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับช่องว่างแถบพลังงาน ΔE_{Γ} ต่อหน่วยความเค้นซึ่งทำให้เกิดการกระจายจำนวนประชากรประจุพาหะขึ้นใหม่ ส่งผลให้สภาพด้านทานเปลี่ยนไปด้วย

นิยาม ค่าคงที่สภาพด้านทานเพียโซ เป็นสภาพด้านทานภายในเนื้อสารที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหนึ่งหน่วยความเค้น ใช้สัญลักษณ์ Π โดย

$$\Pi = \frac{\Delta E_{\Gamma}}{k_B T} \frac{r}{1+r} \frac{1+b}{1+rb} = \frac{\Delta E_{\Gamma}}{k_B T} f(r) \quad (2.24)$$

เมื่อ $r = p/n$ อัตราส่วนจำนวนโฮลต่ออิเล็กตรอน

$b = \mu_p/\mu_n$ อัตราส่วนสภาพคล่องของโฮลต่ออิเล็กตรอน

k_B = ค่าคงที่ของโบลซ์มาน (Boltzmann Constant)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

$f(r)$ จึงเป็นตัวประกอบที่บอกให้ทราบว่า สัมประสิทธิ์สภาพด้านทานเพียโซจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเจือ

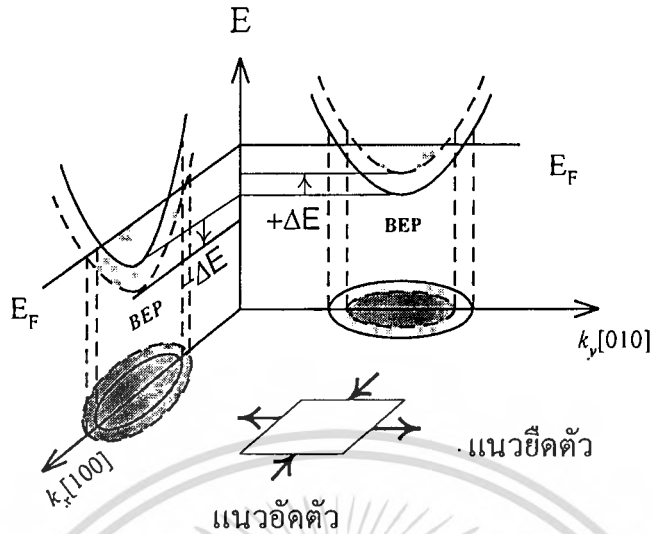
2.3.2 สภาพด้านทานเพียโซในซิลิกอนชนิดเอ็น -

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการกระจายตัวของอิเล็กตรอนจะกำหนดคุณสมบัติสภาพด้านทานในซิลิกอนชนิดเอ็น สมการที่ (2.12) นั้นมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

$$\delta\sigma_{ij} = \sum_{v=1}^6 en\mu_{ij}^v (1 + \alpha_{ij}^v) \left(\frac{\delta n_v}{n_v} \right) + \sum_{v=1}^6 en\mu_{ij}^v (1 + \alpha_{ij}^v) \left[\frac{\delta(1/m_{ij}^v)}{(1/m_{ij}^v)} \right] \quad i,j = x,y,z \quad (2.25)$$

ในพจน์แรกแสดงการถ่ายโอนของอิเล็กตรอนทั้งภายในวัลเลย์ (intravalley transform) และระหว่างวัลเลย์ (intervalley transform) ซึ่งทำให้เวลาผ่อนคลาย (relaxation time) เปลี่ยนแปลงด้วยสัดส่วน α_{ij}^v ในพจน์ที่สองแสดงผลจากการเปลี่ยนแปลงมวลประสิทธิผลในวัลเลย์ต่างๆ

ผลึกด้านที่มีความยาวเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนย่อมมีสภาพคล่องสูงกว่าด้านที่มีการอัดตัวอิเล็กตรอนในวัลเลย์ด้านที่ถูกยึดออกจะย้ายไปสู่วัลเลย์ในด้านการเกิดการอัดตัว (ในสภาวะดังกล่าวสมมติให้แรงดันภายนอกเท่ากันทุกจุด ไม่มีการให้พลังงานอื่นใดกับผลึก ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิหรือการฉายแสงเป็นต้น)



รูปที่ 2.7 ภาพฉายวิถีของซิลิกอนลงบนปริภูมิ k ในทิศทาง [100] ของผลึก

BEP = Band Edge Point

E_F = ระดับพลังงานเฟอร์มี

เงาของกราฟจากแกนพลังงานเมื่อฉายภาพวิถีลงสู่ปริภูมิ k (k -space) ดังรูปที่ 2.7 จะเป็นวงรี ขณะที่อิเล็กตรอนย้ายจากทิศทาง [010] ซึ่งมีการยืดตัวของผลึกมาสู่ทิศทาง [100] ที่มีการอัดตัวของผลึกนั้น ประชากรอิเล็กตรอนในทิศทาง [100] จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ลดลงในทิศทาง [010] การยืดออกในทิศทาง [010] นั้นเปรียบเสมือนผลึกได้รับพลังงานปริมาณหนึ่งสมมุติเท่ากับ $+\Delta E$ จุดต่ำสุดของพาราโบลาจะยกสูงขึ้นด้วยพลังงาน $+\Delta E$ $-\Delta E$ จุดต่ำสุดของวิถี [100] จึงปรับตัวลดลง การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับพลังงานนี้ทำให้รูปร่างทรงรีของผิวพลังงานเปลี่ยนไปด้วย Bir และ Pikus [10] ได้แสดงให้เห็นระดับพลังงานที่เพิ่มและลดลงของแต่ละวิถีเมื่อเกิดความเครียด แต่จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดในวิถี [010] ก็ยังมีพลังงานไม่สูงไปกว่าระดับเฟอร์มี ในขณะเดียวกัน ด้าน [100] ก็เปรียบเสมือนสูญเสียพลังงานออกไปเท่ากับ ϵ_{ij} นั้นเนื่องมาจากขนาดของมวลเปลี่ยนไป ผนวกกับการใช้พลังงานศักย์ในการเปลี่ยนขนาดภายนอก(หรือพลังงานที่ทำให้รูปทรงเสียไป) มีสมการดังนี้

$$\begin{aligned}\delta E_1 = \delta E_4 &= \Xi_u(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + \Xi_u\epsilon_{xx} + \Xi_m\epsilon_{yz}k_yk_z \\ \delta E_2 = \delta E_5 &= \Xi_u(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + \Xi_u\epsilon_{yy} + \Xi_m\epsilon_{zx}k_zk_x\end{aligned}\quad (2.26)$$

$$\delta E_3 = \delta E_6 = \Xi_u(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) + \Xi_u\epsilon_{xx} + \Xi_m\epsilon_{xy}k_xk_y$$

เมื่อ δE_i เป็นระดับพลังงานที่เปลี่ยนไปในแต่ละวิถี

Ξ_u และ Ξ_m เป็นพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการเลี้ยวรูป (deformation potential)

Ξ_m เป็นพลังงานในการเปลี่ยนแปลงมวลประสิทธิผลเมื่อได้รับแรงดัน

Smith[11] ได้ทำการทดลองวัดสภาพต้านทานผลึกซิลิกอนเมื่อใส่แรงดึงแก่ผลึกในทิศทางต่างๆ และได้ข้อสรุปว่า สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซจะแบ่งออกเป็นสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามยาว π_l (Longitudinal piezoresistive coefficient) และสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซแนวขวาง π_t (Transverse piezoresistive coefficient) ซึ่งจะปรากฏพร้อมกันแม้ว่าจะให้แรงเค้นตามยาว (Longitudinal stress component) เพียงแรงเดียวเท่านั้น โดยมีความสัมพันธ์ว่า

$$\Delta R / R = \sigma_l \pi_l + \sigma_t \pi_t \quad (2.27)$$

สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซจะมีค่าเป็นเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับทิศทางของตัวต้านทานบนผลึกรวมทั้งชนิดและความเข้มข้นของสารเจือด้วย นอกจากนี้ทิศทางต่างๆยังทำให้ค่าองค์ประกอบความแข็ง s_{ij} (stiffness compliacne หรือ elastic compliance) นั้นต่างกัน ความต้านทานในแต่ละทิศทางจึงเกี่ยวข้องกับความแข็งนี้ด้วย

สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซที่สำคัญสำหรับผลึกซิลิกอนมูลฐานจะประกอบด้วย π_{11} , π_{12} และ π_{44} เมื่อวางตัวต้านทานไปในทิศทางใดก็ตามสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซ π_l และ π_t จะสามารถคำนวณได้จาก π_{11} , π_{12} และ π_{44} ได้เสมอ โดย

$$\left. \begin{aligned} \pi_{11}'' &= -\frac{2E_u(s_{11}-s_{12})}{3k_B T} \frac{1-r_\mu}{2+r_\mu} (1+\alpha) \\ \pi_{12}'' &= -\frac{1}{2} \pi_{11}'' \\ \pi_{44}'' &= -\frac{E_u s_{44} m_l}{2+r_\mu} \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

เมื่อ $r_\mu = \mu_l / \mu_t$

m_l = มวลประสิทธิผลตามขวาง

S_{11} , S_{12} และ S_{44} = Elastic Compliance ของซิลิกอน

จากผลการทดลองของ Smith ได้เสนอสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซของซิลิกอนชนิดพีและเอ็นที่สภาพต้านทานต่างกันดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซของซิลิกอนชนิดพีและเอ็น ($10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{dyne}$) ที่สภาพต้านทาน ($\Omega \cdot \text{cm}$) ต่างกัน [11]

ชนิด	สภาพต้านทาน	π_{11}	π_{12}	π_{44}	$\frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	$\frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})$
n-Si	11.7	-102.2	+53.4	-13.6	-31.2	-17.6
p-Si	7.8	+6.6	-1.1	+138.1	+76.8	-66.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สภาพต้านทานเพียโซในซิลิกอนชนิดพี

เมื่อผลึกถูกแรงกระทำจากภายนอกจะเกิดการเสียรูปและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของโฮลในแถบวาเลนซ์ทั้งสอง การเสียรูปผลึกนั้นนอกจากต้องอาศัยพลังงานส่วนหนึ่งแล้วก็จะทำให้โฮลเกิดการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง แต่เนื่องจากโฮลมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนทำให้พลังงานจลน์ของโฮลขณะที่มีการเคลื่อนที่หรือย้ายสถานะมีผลกระทบต่อการกระจายพลังงานของระบบ ซึ่งจะปรากฏว่าการย้ายที่อยู่ของอิเล็กตรอนในซิลิกอนชนิดเอ็นนั้นเกิดเป็นพลังงานจลน์ที่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัสดุได้ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีนั้นทำให้สถานะของโฮลหนักและโฮลเบามีความสำคัญ สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซของซิลิกอนชนิดพีจะเป็นดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \pi_{11}^p &= -\frac{2}{3k_B T} \frac{r_p r_\tau r_m - 1}{r_p r_\tau r_m + 1} \frac{Bb(s_{11} - s_{12})}{(B^2 + C^2/5)^{1/2}} \\ \pi_{12}^p &= -\frac{1}{2} \pi_{11}^p \\ \pi_{44}^p &= \pi_{11}^p \frac{Dds_{44}}{Bb(s_{11} - s_{12})} \end{aligned} \right\} \tag{2.29}$$

เมื่อ $r_p = p_l / p_h$ = อัตราส่วนจำนวนโฮลเบาต่อโฮลหนัก
 $r_\tau = \tau_l / \tau_h$ = อัตราส่วนเวลาผ่อนคลายของโฮลเบาต่อโฮลหนัก
 $r_m = m_l / m_h$ = อัตราส่วนมวลประสิทธิผลของโฮลเบาต่อโฮลหนัก
 B, C, D, b, d = ค่าคงที่
 S_{11}, S_{12}, S_{44} = Elastic Compliance ของซิลิกอน

2.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซกับความดัน

พิจารณาตัวต้านทานตัวหนึ่งมีสภาพต้านทานเริ่มต้นเท่ากับ ρ_o มีความยาว L กว้าง d และหนา t มีกระแสไหลผ่านเท่ากับ I และมีแรงดันตกคล่อมตามแนวยาวเท่ากับ V ความต้านทาน R จะมีค่าดังนี้

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho_o L}{td} \tag{2.30}$$

ถ้าให้แรงที่มีค่าสม่ำเสมอ อาจทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$dR = d\left(\frac{\rho L}{td}\right) \tag{2.31}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{\delta\rho}{\rho} + \left(\frac{\delta L}{L} - \frac{\delta t}{t} - \frac{\delta d}{d} \right) \quad (2.32)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{\delta\rho}{\rho} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 \quad (2.33)$$

เมื่อ ε_1 , ε_2 และ ε_3 เป็นความเครียด ตัวต้านทาน R นี้สามารถวางตัวไปในทิศทางใดก็ได้บนแผ่นผลึกซิลิกอน ในสภาวะเริ่มต้นสภาพต้านทานมีลักษณะเป็นไอโซโทรปิกคือเท่ากันทุกจุด แต่เมื่อมีแรงมากระทำสภาพต้านทานจะไม่ใช้ค่าเดียวกันอีกต่อไป แต่จะมีค่าสัมพันธ์กับองค์ประกอบสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในตัวต้านทาน โดย

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \\ \dot{E}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\rho}_{11} & \dot{\rho}_{12} & \dot{\rho}_{13} \\ \dot{\rho}_{21} & \dot{\rho}_{22} & \dot{\rho}_{23} \\ \dot{\rho}_{31} & \dot{\rho}_{32} & \dot{\rho}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{J}_1 \\ \dot{J}_2 \\ \dot{J}_3 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

สัญลักษณ์ที่มีขีด (·) หมายถึงการอ้างอิงโคออร์ดิเนตใดๆที่ไม่ใช่แกนหลัก xyz ตามทิศทาง [100] [010] และ [001] กรณีที่ไม่มีแรงกระทำ เท็นเซอร์ $[\rho']$ จะปรากฏเพียง ρ_o ในแนวทะแยงมุมเท่านั้น ผลจากความเค้นจะทำให้สภาพต้านทานเปลี่ยนไป แต่สมการ (2.34) ยังคงเป็นไปตามกฎของโอห์มดังนี้

$$\frac{\dot{E}}{\rho_o} = (1 + \Delta') \dot{J} \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$\Delta' = \begin{bmatrix} \Delta\rho'_1/\rho_o \\ \Delta\rho'_2/\rho_o \\ \Delta\rho'_3/\rho_o \\ \Delta\rho'_4/\rho_o \\ \Delta\rho'_5/\rho_o \\ \Delta\rho'_6/\rho_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & \pi_{14} & \pi_{15} & \pi'_{16} \\ \pi_{21} & . & . & . & . & . \\ \pi_{31} & . & . & . & . & . \\ \pi_{41} & . & . & . & . & . \\ \pi_{51} & . & . & . & . & . \\ \pi_{61} & . & . & . & . & \pi_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_1 \\ \dot{\sigma}_2 \\ \dot{\sigma}_3 \\ \dot{\sigma}_4 \\ \dot{\sigma}_5 \\ \dot{\sigma}_6 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

สัญลักษณ์ $\dot{\sigma}_i$ ในที่นี้จะหมายถึงองค์ประกอบความเค้นที่กระทำต่อผลึก ส่วนเท็นเซอร์ $[\pi'_{ij}]$ นั้นเป็นเท็นเซอร์สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซซึ่งมีอยู่ 36 องค์ประกอบ แต่เนื่องจากความสมมาตรของผลึกซิลิกอนตามทิศทาง [100] [010] และ [001] ของผลึกระนาบ (100) สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซจะเหลือเพียงสามตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้วเบื้องต้น และจะเขียนเป็นเท็นเซอร์ $[\pi'_{ij}]$ ดังนี้ ด้านการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[\pi_{ij}] = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

เท็นเซอร์ $[\pi'_{ij}]$ สามารถเขียนจาก $[\pi_{ij}]$ ได้โดยการย้ายโคออร์ดิเนตจากแกนหลัก $[100] [010] [001]$ หรือ xyz ไปเป็น $x'y'z'$ โดยผ่านโคไซน์ทิศทาง (direction cosine) $[lmn]$ ชุดหนึ่ง ให้ $[B''_a]$ เป็น geometrical factor ซึ่งเป็นสมการพีชคณิตของ $[lmn]$ ชุดดังกล่าว ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของ $[\pi'_{ij}]$ จึงเขียนได้จาก $[\pi_{ij}]$ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ดังนี้

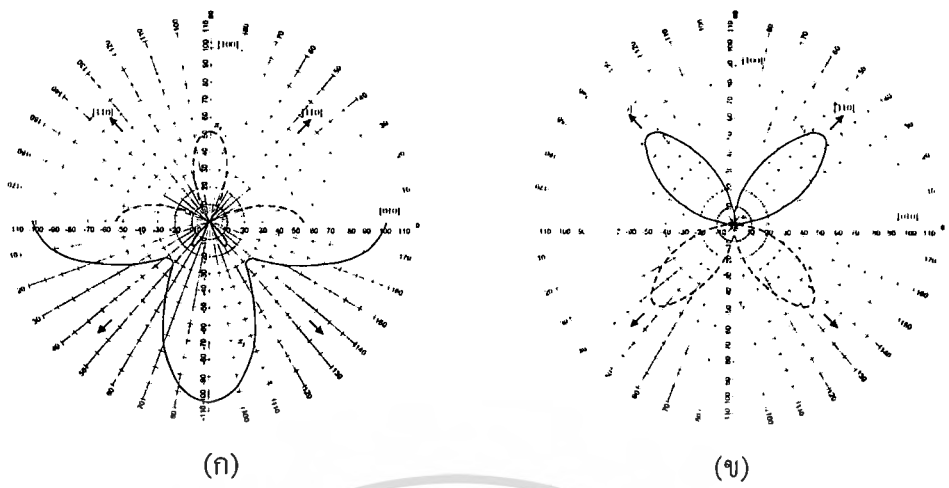
ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซ $[\pi'_{ij}]$ ในโคออร์ดิเนตใดๆ ($\pi_A = \pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}$) [12]

สัมประสิทธิ์	ความสัมพันธ์	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ความสัมพันธ์เดียวกัน
π'_{11}	$\pi_{11} - 2\pi_A(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + n_1^2 l_1^2)$	π'_{22}, π'_{33}
$\pi'_{12} = \pi'_{21}$	$\pi_{12} + \pi_A(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)$	$\pi'_{13} = \pi'_{31} \quad \pi'_{23} = \pi'_{32}$
$\pi'_{16} = 2\pi'_{61}$	$2\pi_A(l_1^3 l_2 + m_1^3 m_2 + n_1^3 n_2)$	$\pi'_{24} = 2\pi'_{42} \quad \pi'_{35} = 2\pi'_{53}$
		$\pi'_{26} = 2\pi'_{62} \quad \pi'_{34} = 2\pi'_{43} \quad \pi'_{15} = 2\pi'_{51}$
$\pi'_{36} = 2\pi'_{63}$	$2\pi_A(l_1 l_2 l_3^2 + m_1 m_2 m_3^2 + n_1 n_2 n_3^2)$	$\pi'_{14} = 2\pi'_{41} \quad \pi'_{25} = 2\pi'_{52}$
$\pi'_{46} = 2\pi'_{64}$	$2\pi_A(l_1 l_2^2 l_3 + m_1 m_2^2 m_3 + n_1 n_2^2 n_3)$	$\pi'_{54} = \pi'_{45} \quad \pi'_{65} = \pi'_{56}$
π'_{66}	$\pi_{44} + 2\pi_A(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)$	$\pi'_{44} \quad \pi'_{55}$

$[lmn]$ เป็นโคไซน์ทิศทางซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

ในรูปที่ 2.8 เป็นตัวอย่างผลการคำนวณและพลอต $[\pi'_{ij}]$ [13] ในทิศทางต่างๆของซิลิกอนระนาบ (100) ทั้งชนิดพีและเอ็นที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งได้ใช้ข้อมูลของสภาพต้านทานเพียโซหลักสามค่าจากผลการทดลอง Smith (ตารางที่ 2.2) ดังนี้ (หมายเหตุ: เส้นทึบคือ π_T เส้นประคือ π_L)



รูปที่ 2.8 สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซบนผลึกซิลิกอนระนาบ (100) (ก)ชนิดเอ็น (ข)ชนิดพี [13]

สัมประสิทธิ์ π_l และ π_t เรียกสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามยาว (longitudinal piezoresistive coefficient) และ สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซแนวขวาง (transverse piezoresistive coefficient)ตามลำดับ ในซิลิกอนชนิดเอ็นสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามยาวมีค่าสูงสุดตามทิศทาง [100] ในขณะที่ชนิดพีมีค่าสูงสุดตามทิศทาง [110] สัมประสิทธิ์ตามยาวในซิลิกอนชนิดพีนั้นแต่ก็มีค่าเป็นลบ นั่นหมายความว่าเมื่อผลึกมีการยืดตัวออกจะมีความต้านทานลดลง ตารางที่ 2.3 เป็นสัมประสิทธิ์แนวขวางและสัมประสิทธิ์ตามยาวของซิลิกอนระนาบต่างๆ

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์แนวขวางและสัมประสิทธิ์ตามยาวของซิลิกอนระนาบต่างๆ

ทิศทางตามยาว	π_l	ทิศทางตั้งฉาก	π_t
100	π_{11}	010	π_{12}
001	π_{11}	110	π_{12}
111	$(\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44})$	110	$1/3(\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})$
110	$1/2(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	111	$1/3(\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})$
110	$1/2(\pi_{11} + 2\pi_{12} + \pi_{44})$	001	π_{12}
110	$1/2(\pi_{11} + 2\pi_{12} + \pi_{44})$	110	$1/2(\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})$

จากสมการ (2.33) $\Delta R / R = \delta \rho / \rho + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3$ พจน์แรกคือสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานนั่นเอง แรงเค้นที่จะปรากฏบนคานตามสมการที่ (2.36) ก็คือ δ_x δ_y และ δ_z ตามแนวแกน xyz ตามลำดับ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวด้านทานจะวางในทิศทาง $\langle 110 \rangle$ หรือแนวแกน x ของคานยื่นนั่นเอง ดังนั้นสมการ (2.34) จะเขียนได้เป็น

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})\sigma_x + \pi_{12}\sigma_y + \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})\sigma_z + (\varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_z) \quad (2.39)$$

เมื่อคานเคลื่อนที่ภายใต้อัตราเร่ง $\mathbf{a} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}$ ใดๆ ความเค้นบนคาน ณ ตำแหน่งใดๆตามแกน x จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \sigma_x = & -a_x \left[\frac{m+M}{A} + \frac{Mc_2}{I_z} + \frac{Mc_3}{I_z} z \right] + a_y \left[\frac{(m+M)(L-x) + (mp + Mc_1)}{I_z} y \right] \\ & + a_z \left[\frac{(m+M)(L-x) + (mp + Mc_3)}{I_y} z \right] \quad \sigma_y = 0, \quad \sigma_z = 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

หาค่าเฉลี่ยตลอดความยาว $(L-b)$ ของตัวด้านทานโดยความสัมพันธ์ $\bar{\sigma}_x = \frac{\int_0^{L-b} \sigma_x dx}{\int_0^{L-b} dx}$ จะได้ค่าเฉลี่ยตามแกน x (ให้ $z=0$ ชั่วคราว) ดังนี้

$$\bar{\sigma}_x = -a_x \left[\frac{M+m}{A} + \frac{Mc_2}{I_z} (c-h) \right] + a_y \left[\frac{c-h}{I_z} \left\{ mp + Mc_1 + (m+M) \left(\frac{L+b}{2} \right) \right\} \right] \quad (2.41)$$

แทนสมการ (2.41) ลงในสมการ (2.33) จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} = & \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) \left[-a_x \left(\frac{m+M}{A} + \frac{Mc_2}{I_z} (c-h) \right) + a_y \left(\frac{c-h}{I_z} \left(mp + Mc_1 + M \frac{L+b}{2} \right) \right) \right] \\ & + \varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_z \end{aligned} \quad (2.42)$$

สมการ (2.42) ยังจะประมาณได้ต่อไปว่า $m+M \cong M$ $c_I \cong p$ และ $v \cong w$ และ $c \cong h/2$ จะพบว่า

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) \left[-a_x \left(\frac{M}{A} + \frac{c-h}{I_z} Mc_2 \right) + a_y \left(\frac{c-h}{I_z} \left(Mc_1 + \frac{L+b}{2} \right) \right) \right] \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าคานบางมากเมื่อเทียบกับความกว้าง ($h \ll w$) และประมาณว่าพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ($v \cong w$) จะพบว่าอัตราส่วนความไวต่ออัตราเร่งในแกน x ต่อแกน y จะเป็นดังนี้

$$\frac{\Delta R / R|_{a_x}}{\Delta R / R|_{a_y}} \approx \left\{ \frac{h}{12(2c_1 + L + b)} - \frac{2c_2}{2c_1 + L + b} \right\} \frac{a_x}{a_y} \quad (2.44)$$

เพื่อลดความไวในแกน x ควรจะให้คานมีความสมมาตรที่สุด ($c_2 \ll 2c_1 + L + b$) อีกทั้งควรให้คานมีความบางมากๆ

สมการที่ (2.44) นั้นประมาณเพียงพจน์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาดตามนิยามความเครียด ε_1 , ε_2 และ ε_3 ในการคำนวณผลจากความเครียดดังกล่าวสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (σ) และความเครียด (ε) ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s'_{11} & s'_{12} & s'_{13} & s'_{14} & s'_{15} & s'_{16} \\ s'_{21} & \ddots & & & & \vdots \\ s'_{31} & & \ddots & & & \vdots \\ s'_{41} & & & \ddots & & \vdots \\ s'_{51} & & & & \ddots & \vdots \\ s'_{61} & \dots & \dots & \dots & \dots & s'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

เทนเซอร์ $[S_{ij}]$ ในทิศทาง $[100]$ $[010]$ และ $[001]$ นั้นคล้ายกับเทนเซอร์ $[\pi_{ij}]$ ในทิศทางดังกล่าว ส่วน $[S'_{ij}]$ ในทิศทางใดๆนอกเหนือจากทิศทางทั้งสามนั้นจะเขียนได้จากตัวแปรที่เหลือสามตัวคือ s_{11} , s_{12} และ s_{44} เช่นเดียวกับลักษณะของ $[\pi_{ij}]$ ส่วนองค์ประกอบของ $[\sigma]$ จะปรากฏเพียง σ_x และ τ_{xy} ดังนั้นคำนวณ ε_1 , ε_2 และ ε_3 จากสมการ (2.45) แทนลงในสมการ (2.42) โดยมีสมมุติฐานว่าคานขึ้นและมวลสามารถสร้างได้อย่างสมมาตร ดังนั้นความไวในแกน x จึงละทิ้งได้ ดังนั้นจึงเขียนสมการความไว ได้ดังนี้

$$\frac{\Delta R}{R} = \left\{ \left[\frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) - (s_{12} + \frac{1}{2}s_{44}) \right] \left[M(c_1 + \frac{L+b}{2} \left(\frac{c-h}{I_z} \right)) \right] \right\} a_y \quad (2.46)$$

$$S_o = \frac{\Delta R / R}{a_y} = \left[\frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) - (s_{12} + \frac{1}{2}s_{44}) \right] \left[M \left(c_1 + \frac{L+b}{2} \frac{c-h}{I_z} \right) \right] \quad (2.47)$$

S_o เรียกความไว มีหน่วยเป็น โอห์ม.วินาที.เมตร⁻¹ ซึ่งนอกจากสามารถกำหนดด้วยขนาดเรขาคณิตแล้ว ยังขึ้นกับทิศทางผลึก และความเข้มข้นสารเจือด้วยการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารเจือและสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซ

สภาพต้านทานเพียโซของซิลิกอนระนาบ (100) ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีที่ความเข้มข้นสารเจือและอุณหภูมิใดๆ สามารถคำนวณด้วยสมการที่ (2.48) ต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} \Pi(N, T) &= P(N, T) \Pi(300K) \\ P(N, T) &= \frac{300}{T} \left(\frac{1}{1 + e^{E_A / k_B T}} \right) \left(\frac{1}{\ln(1 + e^{E_A / k_B T})} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

$\Pi(N, T)$ = สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามความเข้มข้นสารเจือ N ณ อุณหภูมิ T ใดๆ

$\Pi(300 K)$ = สัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเพียโซตามความเข้มข้นสารเจือ N ณ อุณหภูมิ 300 เคลวิน

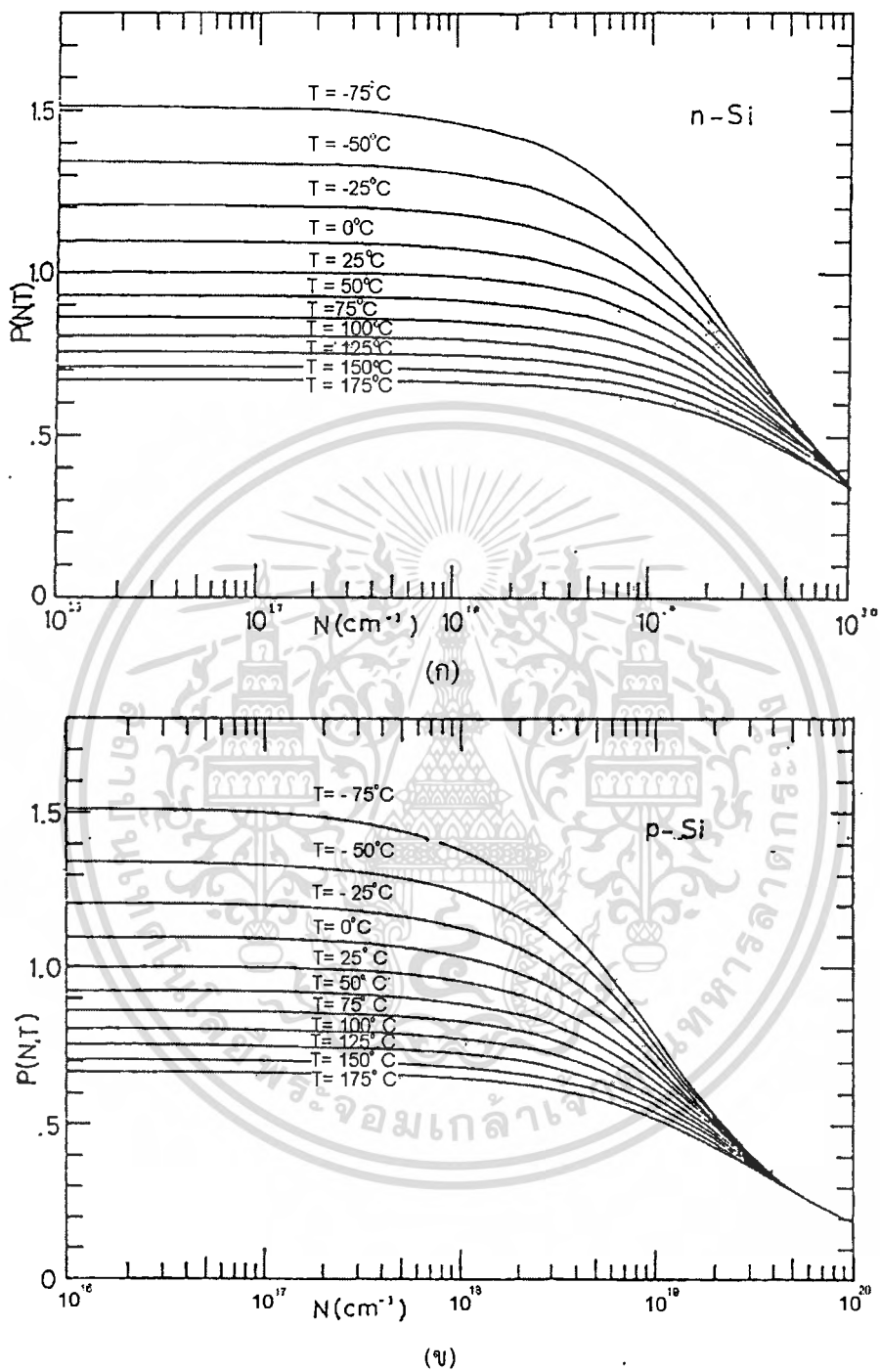
$P(N, T)$ = ตัวคูณสภาพต้านทานเพียโซ (piezoresistance factor) สามารถดูได้จากกราฟในรูปที่ 2.9

E_A = พลังงานไอออไนเซชันของสารเจือ = 45 MeV สำหรับโบรอน ที่อุณหภูมิห้อง

k_B = ค่าคงที่ของโบลซ์มานน์

ในซิลิกอนทั้งสองชนิดจะสังเกตได้ประการหนึ่งว่าสภาพต้านทานเพียโซค่อนข้างคงที่ในความเข้มข้นต่ำกว่า 10^{18} cm^{-3} และจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญถ้ามีการเติมสารเจือต่อไป เมื่อตัวต้านทานมีอุณหภูมิสูงขึ้นสภาพคล่องก็จะสูงขึ้นทำให้สภาพต้านทานเพียโซมีค่าลดลง การเติมสารเจือด้วยอัตราที่สูงเกินกว่า 10^{20} cm^{-3} จะพบว่าสภาพต้านทานนั้นเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิในสัดส่วนที่เท่ากัน ไม่ว่า ตัวต้านทานตัวใดจะได้รับความร้อนมากกว่า การเติมสารเจือมากเกินไปจะทำให้สภาพคล่องลดลงเนื่องจากไม่มีสถานะพลังงานเหลือมากพอ ดังนั้นประจุพาหะที่เกิดขึ้นใหม่เนื่องจากผลของความเค้นจะถือได้น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณสารเจือที่มีอยู่ ดังนั้นจึงไม่พบความแตกต่างทางอุณหภูมิ

จำนวนประจุพาหะหรือค่าความต้านทานมีความสำคัญในการใช้งานมาก ในซิลิกอนชนิดเอ็นนั้นถ้ามีการเติมสารเจือในปริมาณต่ำ แม้ว่าจะมีส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อความเค้นที่เกิดขึ้นสูงกว่าชิ้นงานที่มีการเจือสารมากกว่า แต่ก็เกิดสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนได้ง่าย ในซิลิกอนชนิดพีนั้นการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความเค้นที่ให้แก่วัสดุจะมีค่าสูงกว่าชนิดเอ็นความเครียดที่เป็นค่าบวกจะทำให้โฮลเบาซึ่งมีสภาพคล่องสูงกว่าโฮลหนักย้ายสถานะเป็นโฮลหนักมากขึ้น ความต้านทานโดยรวมจึงลดลง การที่เติมสารเจือมากเกินไป ($>10^{19} \text{ cm}^{-3}$) ทำให้ไอเล็กตรอนที่สามารถลอดขึ้นสู่แถบนำได้ลดจำนวนลง ซึ่งยังทำให้เกิดการหยุดกั (etch-stop) ขึ้นได้ ดังนั้นการสร้างไมโครเมชันบางชนิดอาจสร้างโครงสร้างบางอย่างด้วยการควบคุมความเข้มข้นสารเจือได้ แต่โครงสร้างที่ได้จะมีความเครียดตกค้าง (residual stress) ซึ่งทำให้ชิ้นงานงอ บิด หรือโค้งก่อนที่จะมีการใช้งานได้[16]



รูปที่ 2.9 ตัวคูณสภาพต้านทานเพียโซ $P(N,T)$ กับความเข้มข้นสารเจือ N
(ก)ซิลิกอนชนิดเอ็น (ข)ชนิดพี[13]

2.4 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานบนคานยื่น

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าตัวด้านทานประเภทสารกึ่งตัวนำนั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ง่าย ความไวของเซ็นเซอร์ควรมีค่าคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิใช้งาน รูปแบบหนึ่งของการนำตัวด้านทานเพียโซไปใช้ก็คือนำไปต่อเป็นวงจรวิสโตนบริดจ์ (Wheat-stone bridge) ในรูปที่ 2.1(ก)จะมีตัวด้านทานเพียโซสองคู่ต่ออนุกรมกันอยู่ คู่แรกประกอบด้วยตัวด้านทานเพียโซที่อนุกรมกันและวางอย่างสมมาตรและกับแกน x บนคาน ส่วนอีกคู่หนึ่งอยู่บริเวณฐานรองเพื่อชดเชยผลจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ ตัวด้านทานบนคาน

คู่ที่อยู่บนคานนั้นแต่ละตัวจะมีขอบขนานกับแนวแกน x โดยขอบด้านในห่างจากแนวแกน x เท่ากับ z_1 และขอบนอกมีระยะเท่ากับ z_2 ตัวด้านทานคู่นี้มีตำแหน่งทอดยาวตั้งแต่ $x = 0$ ไปจนถึง $x = L - b$ Yamada และคณะ [17] ได้เสนอว่า แม้ค่าความเค้นจะมี 1 ค่า ณ x ใดๆ แต่ก็ไม่วางตัวด้านทานไปในแนวแกน z เนื่องจากการวางตัวด้านทานแนวขวางจะเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นสูง

จากแนวคิดเรื่องสภาพด้านทานเพียโซตามขวาง ตัวด้านทานเพียโซจึงควรมีความไวต่ออัตราเร่งในแนว z ด้วย ในสมการที่ (2.42) ถึง (2.44) กำหนดให้ $z = 0$ ชั่วคราวเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเค้นในแนวเส้นตรงตามแกน x เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงตัวด้านทานที่มีความกว้างเป็นศูนย์นั้น ไม่มี สมการ (2.40) จึงต้องนำมาพิจารณาโดยเพิ่มเติมรายละเอียดแกน z ดังนี้

$$\frac{\Delta R / R|_{a_z}}{\Delta R / R|_{a_x}} = \frac{\left[(m+M) \frac{L+b}{2} + mp + Mc_1 \right] \frac{z_r}{I_y}}{\left[(m+M) \frac{L+b}{2} + mp + Mc_1 \right] \frac{c-h}{I_z}} = \frac{I_z}{I_y} \frac{z_r}{c-h} \approx \frac{h^2}{w^2} \frac{z_r}{c-h} \quad (2.49)$$

โดย z_r เป็นระยะกึ่งกลางตัวด้านทานถึงแกน x โดยการประมาณ $v \cong w$, $c = h/2$, $h = 0.001 \text{ cm}$, $w = 0.02 \text{ cm}$, $z_r = 0.003 \text{ cm}$ สมการ (2.49) จะประมาณเท่ากับ 1.5×10^{-2} ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสามารถละเลยได้

กรณีที่ตัวด้านทานไม่วางขนานกับทิศทาง $\langle 110 \rangle$ อย่างแท้จริง โดยมีมุมผิดพลาดเท่ากับ α_m จะทำให้สัมประสิทธิ์สภาพด้านทานเพียโซเปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.8 จะพบว่าสัมประสิทธิ์สภาพด้านทานเพียโซยังมีค่าใกล้เคียงค่าเดิมมากที่สุดเมื่อ $|\alpha_m|$ ไม่เกิน 1.5 เรเดียน ดังนั้นจึงสมควรที่จะวางแนวตัวด้านทานเพียโซให้ผิดพลาดไม่เกิน 1 เรเดียน และให้ค่า z_r ไม่เกิน $h - c$ หรือมีเงื่อนไขโดยทั่วไปดังนี้

$$\begin{aligned} |\alpha_m| &< 1 \text{ เรเดียน} \\ |z_r| &<< |h - c| \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h \text{ และ } c_2 \ll 2c_1 + L + b$ (2.50)

$h \ll w$

ตำแหน่งตัวต้านทานแม้ว่าจะอยู่บนผิวนอกสุด แต่ก็สร้างจากการเติมสารเจือจึงมีความลึกจากระยะแพร่ค่าหนึ่งเสมอ(ประมาณ 0.5 ถึง 1 ไมครอน) ซึ่งอาจถือว่ามีค่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความหนาของคาน (โดยประมาณเท่ากับ 10 ถึง 20 ไมครอน) จึงประมาณว่าชั้นของสารเจือนั้นไร้ความหนาได้ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ความลึกของรอยต่อมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับความหนาของคานจำเป็นต้องเฉลี่ยค่า π ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{\pi} = \frac{\int_{y=0}^{y=j} \pi(y) \sigma(y) dy}{\int_{y=0}^{y=j} \sigma(y) dy} \tag{2.51}$$

โดย y เป็นระยะตั้งฉากจากผิวหน้าลงไปเนื้อสาร $\sigma(x)$ เป็นสภาพนำซึ่งจะมีหน้าตัดข้าง (profile) ตามลักษณะการแพร่สารเจือ

นอกจากนี้ขอบของตัวต้านทานจากการแพร่สารเจือไม่สามารถควบคุมให้เป็นแถบสี่เหลี่ยม โดยแท้จริงได้ทำให้ความต้านทานมีความคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน

2.5 การอ่านสัญญาณอัตราเร่งและการแปลผล

วิธีหนึ่งที่นิยมคือการต่อตัวต้านทานเพียโซร่วมกับตัวต้านทานอื่นๆประกอบเป็นวงจรวิธสโตนบริดจ์ดังรูปที่ 2.10 ข้อดีของวงจรบริดจ์ก็คือสามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานได้ในช่วงไมโครโอห์ม หรือสามารถวัดความเครียดได้ในระดับหนึ่งในล้านเท่า (microstrain =10⁻⁶ เมตร/เมตร) การใช้ตัวต้านทานแบบสารกึ่งตัวนำนั้นมีความไวสูงเนื่องจากมีค่าเกจแฟกเตอร์ (gauge factor) ที่สูงจึงนิยมนำตัวต้านทานชนิดสารกึ่งตัวนำมาวัดความเครียดแทนวงจรเกจที่ใช้โลหะ

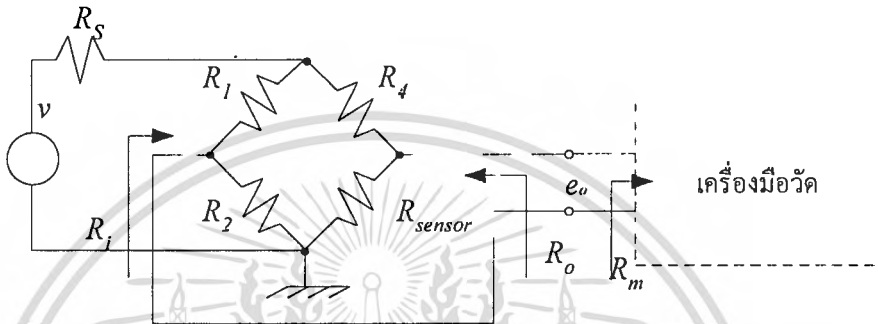
สมการแรงดันเอาต์พุต e_o ของวงจรจะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้[18]

$$e_o = v \left(\frac{1}{1 + R_x/R_i} \right) \left(\frac{1}{1 + R_o/R_m} \right) \left(\frac{a}{(1 + a)^2} \right) \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_{sensor}}{R_{sensor}} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] (1 - \eta) \tag{2.52}$$

เมื่อ v เป็นแรงดันไฟเลี้ยงที่ป้อนแก่วงจร R_s เป็นความต้านทานภายในแหล่งจ่ายไฟ R_i เป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้าของบริดจ์เมื่อมองจากแหล่งจ่าย R_o เป็นอิมพีแดนซ์ขาออกของวงจรบริดจ์เมื่อมองจาก

เครื่องมือวัดไปที่ตัววงจรบริดจ์ และ R_m เป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้าของเครื่องมือวัด อัตราส่วน $R_1/R_2 =$ ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_4/R_{sensor} = a$ เป็นเงื่อนไขสมดุลของวงจร และ η เป็นความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร กรณีที่ $R_1 = R_2 = R_{sensor} = R_4$ จะทำให้ $a/(a+1)^2$ เท่ากับ $1/4$ ถ้าเลือกตัวต้านทาน $R_2 = R_{sensor}$ เป็นตัวต้านทานสารกึ่งตัวนำซึ่งสร้างโดยขั้นตอนเดียวกันและถือว่ามีความเข้าคู่กันได้ (matching) โดยเลือก R_{sensor} เป็นตัวต้านทานบนคานและเลือก R_2 เป็นตัวต้านทานชดเชยอุณหภูมิ และเลือก $R_1 = R_4 = R$ เป็นตัวต้านทานใดๆ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ΔT ความต้านทานทั้งสองคู่จะเปลี่ยนค่าไปในอัตราส่วนที่เท่ากันในแต่ละคู่ ดังนั้นวงจรบริดจ์จึงมีความสมดุลอยู่ได้



รูป 2.10 วงจรวิธสโตนบริดจ์พื้นฐาน(ในที่นี้ $R_1 = R_4 = R$ เป็นตัวต้านทานภายนอก $R_2 = R_{sensor}$ เป็นตัวต้านทานของตัวตรวจจับอัตราเร่ง)

ในกรณีที่คาน R_{sensor} จะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ Δe_o ดังนี้

$$\Delta e_o = v \left(\frac{1}{1 + R_s/R_i} \right) \left(\frac{1}{1 + R_o/R_m} \right) \left(\frac{a}{(1+a)^2} \right) \left[\frac{\Delta R_{sensor}}{R_{sensor}} \right] (1-\eta) \quad (2.53)$$

ในกรณีทั่วไปนั้น $\eta \approx 0$, $R_s \ll R_i$ และถ้าอุปกรณ์วัดเป็นออสซิลโลสโคป R_m จะมีขนาดเป็นเมกะโอห์ม ในขณะที่ R_o ของวงจรบริดจ์มีขนาดอยู่ในช่วงกิโลโอห์ม ดังนั้นสามวงเล็บสุดท้ายจึงประมาณเท่ากับ 1 ดังนั้น สมการที่ (2.53) จะประมาณได้ว่า

$$\Delta e_o = \frac{v}{4} \left[\frac{\Delta R_{sensor}}{R_{sensor}} \right] \quad (2.54)$$

แทนสมการที่ (2.44) ลงในสมการที่ (2.54) จะได้สมการเอาต์พุตตามอัตราเร่งในแนว y ดังต่อไปนี้

$$\Delta e_o = \frac{v}{4} \left\{ \left[\frac{1}{2} (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) - (s_{12} + s_{44}) \right] \left[M \left(c_1 + \frac{L+b}{2} \cdot \frac{c-h}{I_z} \right) \right] \right\} a_v \quad (2.55)$$

ถ้าพลอตกราฟระหว่างอัตราเร่งและเอาต์พุตออกมาจะเป็นสมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับความไวของเซ็นเซอร์ต่ออัตราเร่ง 1 g ตามสมการดังต่อไปนี้

$$S_1 = \frac{1}{4} \left\{ \left[\frac{1}{4} (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) - (s_{12} + s_{44}) \right] \cdot M \left(c_1 + \frac{L+b}{2} \cdot \frac{c-h}{I_z} \right) \right\} V/V/g \quad (2.56)$$

ความชันตามสมการที่ (2.56) ยังสามารถใช้คำนวณเพื่อหาพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า เช่น มวล M ที่มีขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถชั่งด้วยตาชั่งได้และต้องทราบขนาดของคาน ในการสอบเทียบตัวตรวจจับอัตราเร่ง สามารถเลือกใช้สภาวะที่ก่อให้เกิดอัตราเร่งแก่ระบบได้หลายวิธี วิธีที่นิยมคือการใช้โต๊ะสั่น (Shake table) ที่สามารถสั่นในแนวดิ่งและให้แรงกระตุ้นซึ่งมีขนาดแอมพลิจูดและความถี่ของการสั่นที่แน่นอนและวัดการตอบสนองของระบบด้วยวงจรวิธสโตโนบริดจ์ และใช้สมการที่ (2.16) ถึง (2.19) เป็นสมการสำหรับวิเคราะห์ หรืออาจใช้วิธีให้แรงคล (impulse) ที่ทราบค่าแก่ระบบแล้ววัดการตอบสนองในขดคลื่นแรกและวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (2.12) ถึง (2.15) หรืออาจใช้วิธีหมุนเหวี่ยงตัวตรวจจับอัตราเร่งโดยให้แกนที่ไวต่ออัตราเร่งชี้ไปในแนวรัศมี ซึ่งอัตราเร่งก็คืออัตราเร่งตามแนวแรงหนีศูนย์กลางซึ่งมีค่าเท่ากับ $\omega^2 r$ เมื่อ ω เท่ากับความเร็วเชิงมุมและ r คือรัศมีจากแกนหมุนถึงตัวตรวจจับอัตราเร่ง

บทที่ 3

การกัดซิลิกอนแบบแอนไอโซโทรปิก

3.1 ปฏิกิริยาการกัดซิลิกอน

แม้ว่าได้มีความพยายามที่จะนำวิธีการและเทคนิคใหม่เพื่อนำมาสร้างอุปกรณ์ไมโครเมชีน แต่วิธีที่ประสบผลสำเร็จมากที่สุดคือการกัดซิลิกอนด้วยสารเคมีหรือกัดด้วยพลาสมา สารเคมีที่กัดกร่อนซิลิกอนได้นั้นมีมากมาย แต่ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยด่างผสมกับน้ำ อาทิ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) ไฮดราซีน (Hydrazine) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ส่วนก๊าซที่ใช้กัดในพลาสมา ได้แก่ CF_4 , SF_6 , Cl_2 และก๊าซฮาโล-หรือฟลูออโรคาร์บอนอื่นๆ เป็นต้น ตัวกัดเหล่านี้มีทั้งที่มีคุณสมบัติไอโซโทรปิก (isotropic etching) หรือแอนไอโซโทรปิก (anisotropic etching) อัตราการกัดอาจจะขึ้นกับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิสารละลาย ตัวกัดเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆ กันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกหน้ากักป้องกันการกัดที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นด้วยเช่นกัน ในตารางที่ 3.1 จะแสดงตัวอย่างของตัวกัดซิลิกอนรวมทั้งหน้ากักป้องกันการกัดที่เหมาะสมไว้ด้วย

สารละลายกัดที่สำคัญที่มีการรายงานกันส่วนมากก็คือ สารละลาย Ethylenediamine ผสม Pyrocatechol ในน้ำ DI หรือใช้ชื่อย่อว่า EPD หรือสารละลาย KOH ที่อาจผสม Isotropy alcohol ด้วยก็ได้ และสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) + กรดไนตริก (Nitric acid) + กรดอะซิติก (Acetic acid) หรือเรียกว่า HNA

สารละลายกัด EPD นั้นมีข้อดีหลายประการคือ (1) เป็นตัวกัดประเภทแอนไอโซโทรปิก (2) เป็นตัวกัดที่มีความเลือกกัดได้เด่นชัดที่สุด สามารถใช้หน้ากักป้องกันการกัดได้หลากหลายมากกว่า และ (3) ขึ้นกับความเข้มข้น ซึ่งอัตราจะเกือบเท่ากับศูนย์ถ้าความเข้มข้นโบรอนสูง

สารละลาย KOH นั้นเป็นตัวกัดที่ขึ้นกับทิศทางระนาบและมีความแตกต่างของอัตราการกัดระนาบ (100) ต่อ ระนาบ (111) สูงที่สุดทำและเกิด undercutting ได้ชั้นออกไซด์ต่ำที่สุด แต่ก็มีความจืดชืดเนื่องจาก KOH นั้นกัดซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยอัตราที่สูงจึงทำให้การกัดด้วย KOH ต้องอาศัยหน้ากักหรือการป้องกันแบบอื่น เช่น Si_3N_4

สารละลาย HNA นั้นเป็นสารละลายประเภทไอโซโทรปิก อัตราการกัดมีความแปรผันเป็นอย่างมากและยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือ อัตราส่วนผสมที่ต่างกันจะให้อัตราการกัดที่เปลี่ยนแปลงมาก หน้ากักสำหรับกรด HNA นั้น ไม่ว่า SiO_2 หรือ Si_3N_4 นั้นไม่สามารถป้องกันการกัดได้

ในระยะยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างสารละลายกัดสำหรับซิลิกอน และหน้ากากป้องกันที่เหมาะสม [25]

สารละลาย กัด	ส่วน ผสม	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการกัด ($\mu\text{m}/\text{min}$)	อัตราส่วนการกัด แอโนไอโซโทร ปิก ระบาย (100)/(111)	ความอิสระต่อความเข้มข้น ของสารเจือ	หน้ากากป้องกัน
HF HNO ₃ (water + CH ₃ COO H)	10 ml 30 ml 80 ml	22	0.7 - 3.0	1:1	$\leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ n หรือ p จะ ลดอัตราการกัดลง 150 เท่า	SiO ₂ (300 Å/ นาที)
	25 ml 50 ml 25 ml	22	40	1:1	ไม่ขึ้นต่อความเข้มข้น สารเจือ	Si ₃ N ₄
	9 ml 75 ml 30 ml	22	7.0	1:1	-----	SiO ₂ (700 Å/ นาที)
Ethylene diamine Pyrocate- chol (น้ำ)	750 ml 120 gr 100 ml 750 ml 120 gr 240 ml	115 115	0.75 1.25	35:1 35:1	boron $\geq 7 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ จะ ลดอัตราการกัดลง ประมาณ 50 เท่า	SiO ₂ (2 Å/นาที) Si ₃ N ₄ (1 Å/ นาที) Au, Cr, Ag, Cu, Ta
KOH (น้ำหรือ isopro- panol)	44 gr 100 ml 50 gr 100 ml	85 50	1.4 1.0	400:1 400:1	boron $\geq 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ จะ ลดอัตราการกัดลง ประมาณ 20 เท่า	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (14 Å/ นาที)
H ₂ N ₄ (น้ำหรือ isopro- panol)	100 ml 100 ml	100	2.0	----	ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นสาร เจือ	SiO ₂ Al
NaOH น้ำ	10 gr 100 ml	65	0.250-1.0	----	boron $\geq 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ จะ ลดอัตราการกัดลง ประมาณ 10 เท่า	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (7 Å/นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดซิลิกอนนั้นมีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอนคือ

- (1) การฉีดโฮลจากสารละลายเข้าสู่ ซิลิกอน เพื่อยกระดับสถานะออกซิเดชัน (oxidation - state) ของซิลิกอนเป็น Si^+
- (2) การรวมตัวของอนุมูล OH^- และซิลิกอนประจุบวก เป็นซิลิกอนออกไซด์ที่ละลายน้ำได้
- (3) การรวมตัวของซิลิกอนและองค์ประกอบในสารละลายกลายเป็น complexing agent
- (4) การดึงซิลิกอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายออกสู่น้ำ ทำให้ซิลิกอนถูกกัดออกไป

จากขั้นตอนทั้งสี่ สารเคมีที่จะกัดซิลิกอนได้ต้องแตกตัวให้โฮลกับซิลิกอนและตัวมันเองต้องมีอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นรวมทั้ง complexing agent นั้นต้องสามารถละลายได้ด้วยน้ำ ใน HNA นั้น กรดไนตริกจะเป็นผู้ที่ย้ายโฮลและอนุมูลไฮดรอกซิลออกมาอย่างรุนแรงมากในขณะที่ฟลูออรีนใน HF จะเข้ารวมตัวกลายเป็น H_2SiF_6 ที่ละลายน้ำได้

สำหรับ EPD นั้น Ethylene diamine จะรวมกับน้ำและให้โฮลแก่ซิลิกอน Pyrocatechol จะรวมกับซิลิกอนกลายเป็น $\text{Si}(\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2)_3$ ที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นถ้าไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ EPD จะไม่กัดซิลิกอน

สำหรับปรากฏการณ์การกัดแบบแอนไอโซโทรปิกในสารละลาย เช่น KOH นั้น ไม่ทราบกลไกที่แท้จริงได้ แต่เชื่อว่ามีกลไกดังต่อไปนี้ [26]

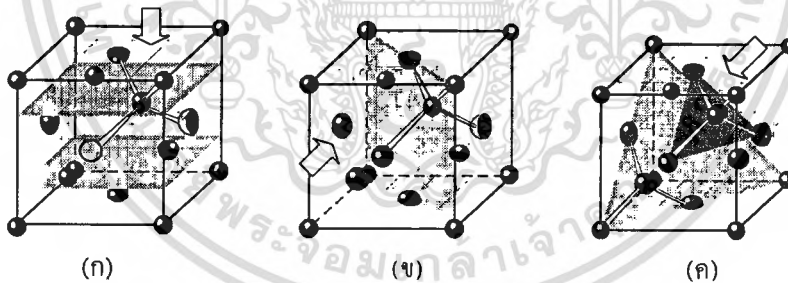
- (1) อนุมูลไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับกันแขวนว่าง (dangling bond) ของซิลิกอน สำหรับแขนยื่นของซิลิกอนในระนาบ (100) มีสองแขน ในขณะที่มีเพียงแขนเดียวในซิลิกอนระนาบ (111) ขั้นตอนนี้ใช้พลังงานไอออนในเซชันเพียง 0.35 อิเล็กตรอนโวลต์ [27] ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก
- (2) พันธะซิลิกอนหลัก (back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ (100) และเท่ากับ 3 สำหรับระนาบ (111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น $\text{Si}(\text{OH})_2^+$ หรือ SiOH^{3+} (เรียกอนุมูลซิลิกอนไฮดรอกไซด์) ปฏิกิริยานี้ถ้าให้พลังงานแก่ผลึกต่างกัน อัตราส่วนการกัดของระนาบต่างๆจะไม่เท่ากัน ที่อุณหภูมิใกล้เคียงคืออัตราการกัดระนาบ (110): (100): (111) เท่ากับ 160:100:1 แต่จะเท่ากับ 50:30:1 ที่อุณหภูมิห้อง
- (3) ซิลิกอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย
- (4) กรด Orthosilic acid แตกตัวเพื่อรวมกับน้ำ เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน

3.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิกอน

ในระนาบต่างๆของซิลิกอน จะมีจำนวนพันธะที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า(เหลือเป็นแขนยื่น) จำนวนพันธะที่กำลังถูกกัด และจำนวนพันธะที่จะถูกดึงออกสู่สารละลายเป็นขั้นตอนต่อไปไม่เท่ากัน กล่าวคือ [28]

- (1) ระนาบ (100) อะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่จะดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ
- (2) ระนาบ (111) จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้านั้นจึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด
- (3) ระนาบ (110) จะมีสามอะตอมอยู่ที่ผิวหน้า หนึ่งอะตอมอยู่ใต้ผิวหน้าและหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า แม้ว่าจะมีสองอะตอมที่มีพันธะร่วมกับอะตอมตรงกลางที่อยู่บนผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่อยู่ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดออกไปพร้อมกัน ระนาบ (110) จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงน้อยกว่าระนาบ (100) และระนาบ (111)

ในรูปที่ 3.1 เป็นจำนวนพันธะในแต่ละระนาบของซิลิกอน ซึ่งแบ่งความใกล้เคียง จากสารละลายเป็นสามระดับคือ อะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า อะตอมที่กำลังถูกกัด และอะตอมที่จะถูกกัดเป็นอันดับต่อไป



รูปที่ 3.1 พันธะในอะตอมซิลิกอนระนาบต่างๆ (ก)ระนาบ (100) (ข) ระนาบ (110) (ค)ระนาบ (111)
(ลูกศรหมายถึงทิศทางการเข้าไปกัดของสารละลายแอนไอโซโทรปิก)

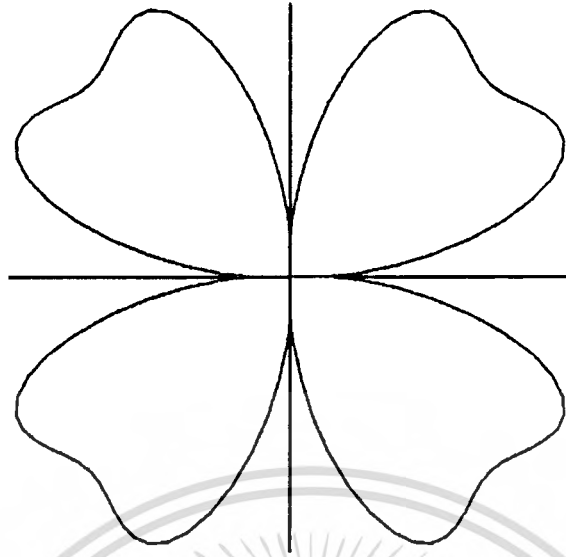
เนื่องจากการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกนั้นจะปรากฏการเลือกกัด ดังนั้นร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นรูปทรงที่มีเรขาคณิตที่แน่นอน ในตารางที่ 3.2 เป็นความสัมพันธ์ของมุมระหว่างระนาบ $\{HKL\}$ และระนาบ $\{hkl\}$ ซึ่งเป็นตารางที่ใช้ตรวจสอบว่า ระนาบที่เหลือจากการกัดควรเป็นระนาบใด

การวางบริเวณเลือกกัดเมื่อเทียบกับทิศทางหนึ่งๆเป็นสิ่งกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของหลุมที่เกิดจากการกัด นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาลักษณะการกัดของซิลิกอนระนาบ $\{hkl\}$ ใดๆเพื่อเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางในการออกแบบไมโครเมชีนให้มีรูปร่างลักษณะที่แปลกออกไป เพื่อให้เกิดเป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่ที่มีลักษณะเฉพาะ หรือเพื่อให้มีความไวสูงสุด ความพยายามในการกำหนดรู้พฤติกรรมการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกจึงได้เกิดซอฟต์แวร์ในการจำลองแบบการกัดเมื่อกำหนดอินพุตเป็นรูปทรงของพื้นที่เลือกกัด ในรูปที่ 3.2เป็นอัตราการกัดซิลิกอนระนาบ (100) ด้วย KOH [30]

ตารางที่ 3.2 มุมระหว่างระนาบ {HKL} กับ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของระนาบต่างๆ [5, 29]

{HKL}	{hkl}	มุมระหว่าง {HKL} และ {hkl}			
100	100	0.00	90.00		
	110	45.00	90.00		
	111	54.74			
	210	26.56	63.43	90.00	
	211	35.26	65.90		
	221	48.19	70.53		
	310	18.43	71.56	90.00	
	311	25.24	72.45		
	110	110	0.00	60.00	90.00
	111	35.26	90.00		
110	210	18.43	50.77	71.56	
	211	30.00	54.74	73.22	90.00
	221	19.47	45.00	76.37	90.00
	310	26.56	47.87	63.43	77.08
	311	31.48	64.76	90.00	
	411	10.00			
	113	64.7			
	115	74.2			
	117	78.6			



รูปที่ 3.2 อัตราการกัดซึลิกอนระนาบ (100) ด้วย KOH [30]

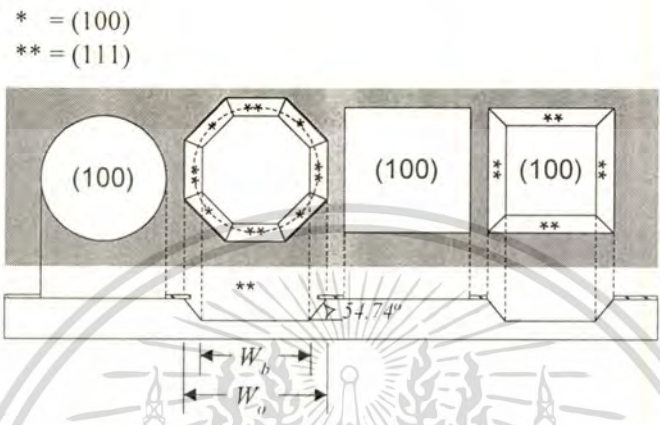
หลุมที่เกิดจากการกัดเมื่อเปิดช่องเลือกกัดบนระนาบผลึกที่ไม่เหมือนกัน จะมีความแตกต่างกัน แต่ผนังที่เกิดขึ้นก็คือระนาบที่มีอัตราการกัดช้าที่สุด สำหรับแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ถ้าเปิดช่องเลือกกัดเป็นวงกลม หลุมที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยผนังแปดด้าน ผนังสี่ด้านเอียงทำมุม 54.74° องสาขานานกับพื้นระนาบ (100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทาง $\langle 110 \rangle$ จากตารางที่ 3.2 พบว่าระนาบนั้นคือระนาบ (111) และยังมีระนาบ (100) ร่วมประกอบเป็นผนังดังรูปที่ 3.3 แต่ถ้าเปิดบริเวณเลือกกัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านทั้งสี่ขนานกับทิศทาง $\langle 110 \rangle$ จะได้ผนังสี่ด้านเป็นระนาบ (111) ทั้งหมด พื้นหลุมจะเป็นระนาบ (100) โดยความสัมพันธ์ของเรขาคณิตที่แน่นอนของมุมระนาบ (100) และ ระนาบ (111) จะพบว่า ถ้าเปิดปากหลุมมีความกว้างเท่ากับ W_o และทำการกัดจนได้ความลึกเท่ากับ h จะได้ขนาดของความกว้างกันหลุม W_b ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} W_o &= W_b + 2h/\tan(54.74^\circ) \cong W_b + \sqrt{2} \cdot h \\ h &= tR \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

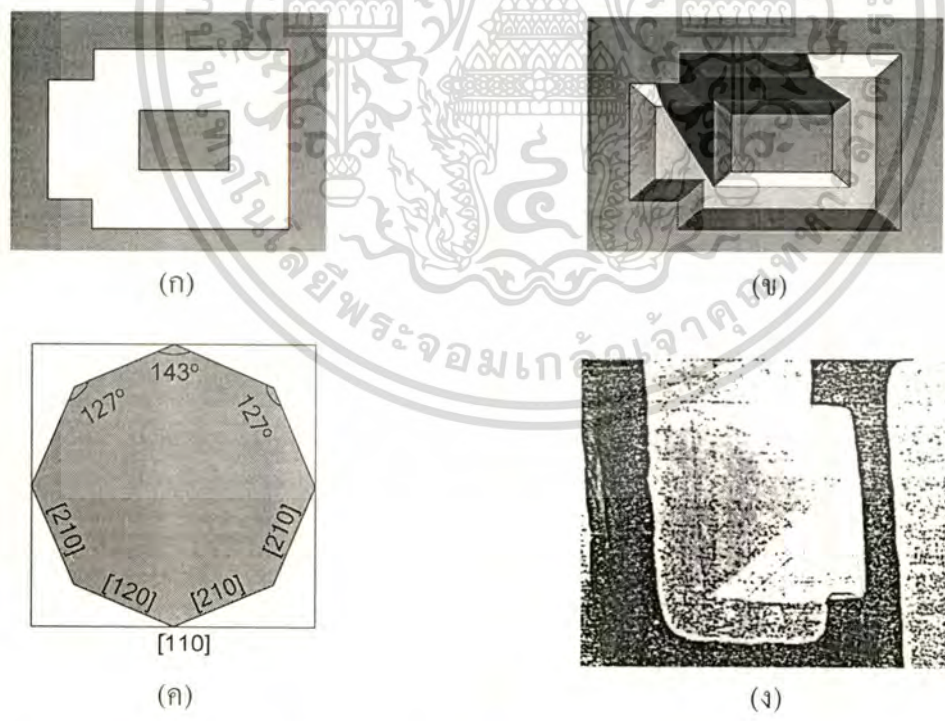
เมื่อ R เป็นอัตราการกัดในแนวตั้ง และ t เป็นเวลาในการกัด

จากข้อเท็จจริงดังกล่าวน่าจะเป็นไปได้ที่เลือกกัดซิลิกอนให้เป็นมีรูปทรงแบบเกาะ (mesa) ดังรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) แต่ในความเป็นจริงการกัดจะมีความผิดปกติตรงมุมเปิด (convex corner) และจะได้รูปร่างดังรูปที่ 3.4 (ค) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเซาะมุม (corner undercutting) ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับการสร้างไมโครแมชีนที่มีลักษณะเป็นเกาะ หรือประเภทที่มีมุมเปิด เช่น คานยื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการชดเชยมุม (corner compensation) เพื่อลดการเซาะมุมลง ถ้าไม่ทำการแก้ไขด้วยการชดเชยมุม รูปทรงเกาะจะถูกกัดบริเวณมุมมากจนกระทั่งเหลือเพียงรูปร่างคล้ายเข็ม ดังรูปที่ 3.4 (ง) อย่างไรก็ตาม รูปทรงแบบเข็มนี้อีกยังมีประโยชน์เมื่อต้องการไมโครแมชีนแบบปลายเข็ม เช่น งานกลึงจุดทัศนียภาพอิเล็กทรอนิกส์แบบกระแสด้านเนล [3]

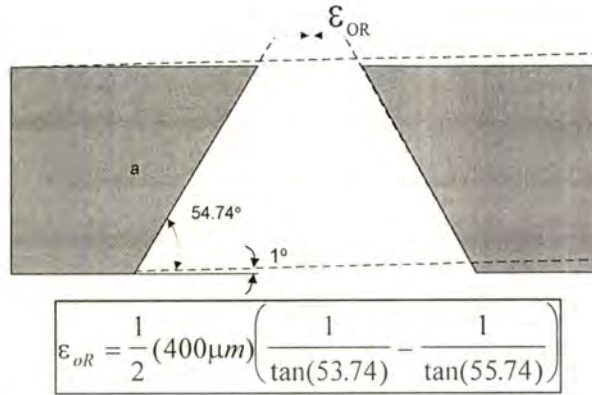


รูปที่ 3.3 การกัดแบบแอนไอโซโทรปิก



รูปที่ 3.4 การเกิดการเซาะมุมเมื่อบริเวณเลือกกัดเป็นมุมเปิด (ก)แบบสำหรับกัดรูปทรงเกาะ (ข)ผล การกัดตามทฤษฎี (ค)การเซาะมุม (ง)ปลายเข็มที่เกิดจากการเซาะมุม [3]

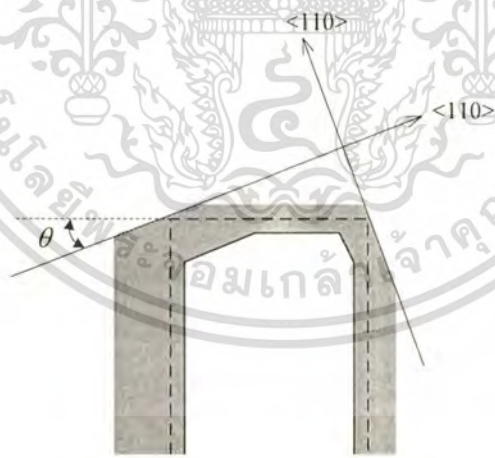
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ความผิดพลาดจากระนาบผลึกเริ่มต้นผิดพลาดประมาณ ± 1 องศา [31]

อย่างไรก็ดี ถ้าด้านของบริเวณ เลือดกัดไม่ขนานกับทิศทาง $\langle 110 \rangle$ หรือ แผ่นผลึกเริ่มต้นไม่ใช่ระนาบ (100) โดยแท้จริง ข้อจำกัดการออกแบบไมโครเมชีนอาจมีหลายปัจจัยที่เป็นอุปสรรคดังต่อไปนี้

- (1) ขนาดของกันหลุม หรือปากหลุมจะต่างไปจากที่คำนวณดังรูปที่ 3.5
- (2) รูปทรงจะผิดแปลกไปจากเดิม ดังรูปที่ 3.6 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 รูปทรงที่คลาดเคลื่อนเมื่อวางด้านไม่ขนานกับทิศทาง $\langle 110 \rangle$ [25]

- (3) ผนังทั้งสี่ด้านจะไม่ปรากฏว่าเป็นระนาบ (111) อย่างแท้จริง การปรากฏระนาบต่างๆเสริมขึ้นมา นั้นทำให้ผนังไม่เรียบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเกิด ณ บริเวณรอยต่อของไมโครเมชีน เช่น ไดอะแฟรม หรือคานที่บางมากอาจทำให้เกิดการสะสมความเครียด หรือสะสมประจุไฟฟ้าจำนวนมาก ทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) ผิวโคอะเฟรมอาจมีความลาดเอียงทำให้เกิดความเสียหายจากความเค้นสะสมหรือเกิดจุดที่เปราะบางเกินไปได้

อาจมีสาเหตุอื่นเช่น การกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอของสารละลายในขณะที่กัก หรือความไม่แน่นอนของทุกจุดบนผิวที่เปิดสู่สารละลาย หรือสิ่งสกปรกหรือออกไซด์ที่อาจขัดขวางอัตราการกักเป็นบางบริเวณได้ทำให้เกิดความผิดพลาดดังที่กล่าวมา แต่ทุกความผิดพลาดนั้นทำให้การออกแบบผิดแปลกออกไป หรือทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนถ้าใช้หลุมดังกล่าวเป็นบริเวณอ้างอิงสำหรับการซ้อนทับต้นแบบ (mask aligner) สำหรับมาส์กต่อไป

การควบคุมการกักแบบแอนไอโซโทรปิกจึงนับเป็นหัวใจของการสร้างไมโครเมชัน ในห้องปฏิบัติการต่างๆได้ทำการศึกษาเพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการ เทคนิคหรือความลับทางธุรกิจของการสร้างไมโครเมชันชนิดต่างๆ วิธีการที่หลากหลายจะทำให้ได้คุณภาพงานออกมาไม่เท่ากัน การควบคุมคุณภาพของการกักควรคำนึงถึงเงื่อนไขต่างๆดังต่อไปนี้

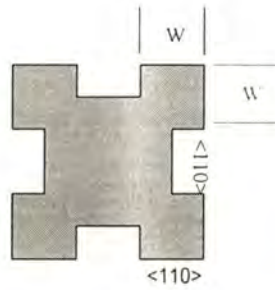
- (1) แผ่นฟิล์มเริ่มต้นควรไร้จุดเสียในระดับอะตอม การเลื่อนของระนาบทำให้เกิดรูพรุนซึ่งตรวจพบโดยการกักตรวจสอบด้วยสารละลายแอนไอโซโทรปิก[33]
- (2) แผ่นฟิล์มเริ่มต้นควรระนาบถูกต้องตามดัชนีที่บ่งบอก ควรมีความผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 1 องศา
- (3) ผิวเริ่มต้นควรเป็นผิวเรียบแบบกระจก เนื่องจากผิวขรุขระประกอบด้วยระนาบที่หลากหลาย ถ้าส่วนที่ขรุขระประกอบด้วยระนาบที่กักซ้ำเป็นจำนวนมากทำให้พื้นผิวที่กักเกิดความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น
- (4) สารละลายควรกระจายความเข้มข้นอย่างทั่วถึง อาจเพิ่มความสามารถในการกักด้วยการกวนสารละลายตลอดเวลา หรือด้วยการปั่นสารเคมีผ่านปั๊ม นอกจากนี้ควรรักษาความเข้มข้นให้คงที่ตลอดเวลาที่กักด้วยการเพิ่มเติมหม้อกลั่น (condenser tube) หรือ pH meter ที่มีการเติมสารละลายโดยอัตโนมัติ เป็นต้น
- (5) กรณีกักด้วยเคมีไฟฟ้า ควรรักษาศักดาไฟฟ้าเคมีให้คงที่ตลอดการกัก ซึ่งอาจเพิ่มเติมโพเทนทิโอแอสแตต (potentiostat) เพื่อรักษาการถ่ายเทประจุในสารละลายให้คงที่

3.3 การชดเชยมุม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการชดเชยมุมเป็นสามแบบดังนี้

3.3.1 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

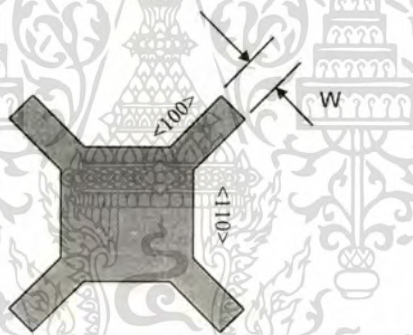
มุมชดเชยแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะเพิ่มด้านสี่เหลี่ยมออกจากหัวมุมด้านละเท่ากับ w ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

3.3.2 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา

ทำได้โดยการเพิ่มมุมเป็นแถบสี่เหลี่ยมที่มีด้านขนานกับทิศทาง $\langle 100 \rangle$ ดังรูปที่ 3.8 ขอบของด้านที่ ยื่นออกไปนี้คือระนาบ (100) ซึ่งเป็นระนาบเดียวกันกับพื้นหลุม ดังนั้นจึงมีอัตราการกัดเท่ากัน ความกว้าง W อย่างน้อยจึงเท่ากับสองเท่าของความลึกที่ต้องการกัด

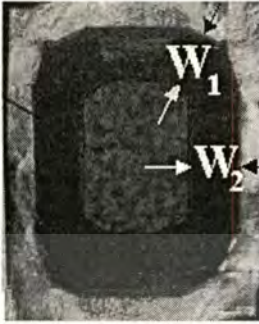


รูปที่ 3.8 การชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา

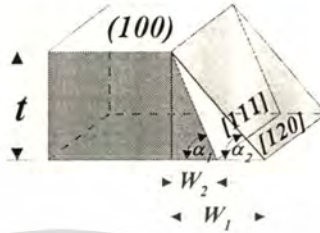
3.3.3 การชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยม [31]

พิจารณาจากการตัดกันของระนาบที่เหลือจากการกัดเซาะและระนาบ (100) จากการศึกษารายละเอียดของแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH ตามรูป 3.9(ก) พบว่าขนาด W_1 และ W_2 ขณะที่มีความลึก l ใดๆ ความสัมพันธ์ระหว่าง W_2 และ l เป็นไปตามสมการที่ (3.1) นั้นแสดงว่าระนาบนั้นเป็นระนาบ (111) มุมที่ถูกกัดเซาะไปแล้วนั้นจะมีขนาด 127 องศา ซึ่งสอดคล้องกับการตัดกันของกลุ่มทิศทาง $[210]$ และระนาบ (100) ของแผ่นผลึก เมื่อทำการวัดอัตราส่วนระหว่าง l และ W_1 จะพบว่าสอดคล้องกับการตัดกันของกลุ่มระนาบ $\{212\}$ และกลุ่มระนาบ $\{100\}$ จะเท่ากับ $\tan(48.1^\circ)$ ดังรูปที่ 3.9(ข) นั้นแสดงว่ามุมที่เหลือจากการถูกกัดเซาะไปนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยระนาบ $\{212\}$ ดังนั้นการชดเชยมุมก็คือการเพิ่มระนาบ $\{212\}$ ออกไปนั่นเองดังรูป 3.10(ก) โดยแสดงความสัมพันธ์ของด้านต่างๆดังรูป 3.10 (ข)

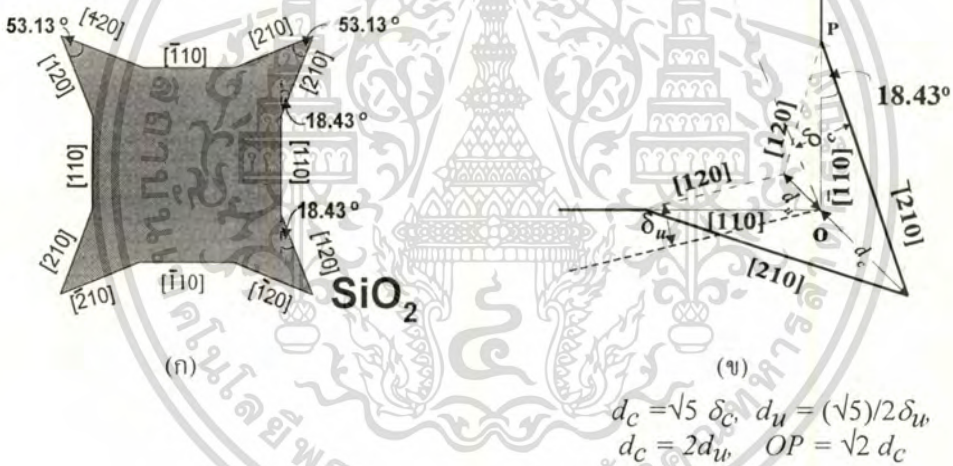


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 (ก)ภาพถ่ายจาก SEM แสดงมุมที่เกิดการกัดเซาะ (ข)ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบ $\{212\}$ และระนาบ $\{111\}$ ที่ตัดกับระนาบ $\{100\}$



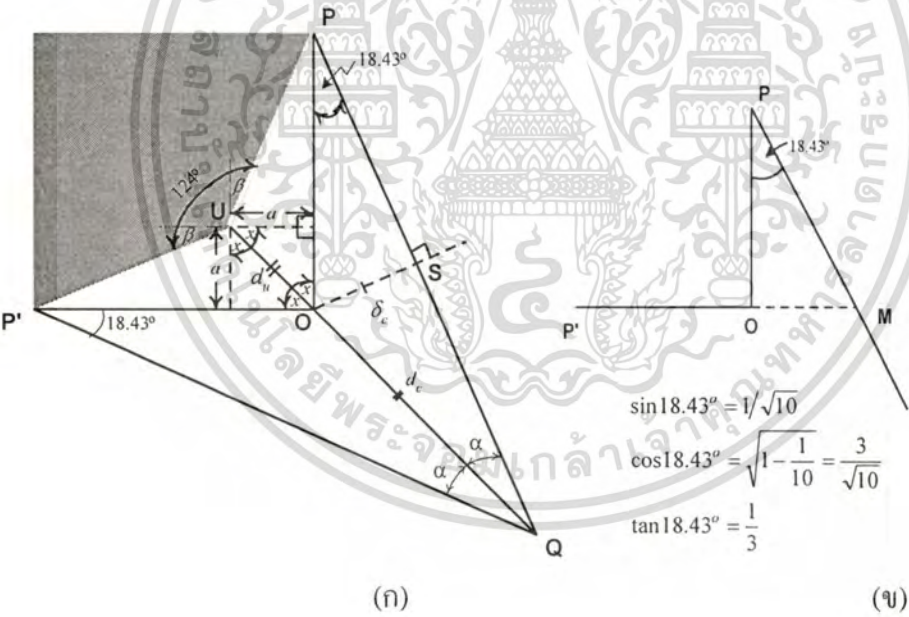
รูปที่ 3.10 (ก)การชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยม (ข)ความสัมพันธ์ของด้านต่างๆในมุมชดเชยแบบสามเหลี่ยม

วิธีการสร้างมาส์กชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยมนี้จะใช้ข้อมูลขนาดการเซาะมุมของ Bean[34] เพื่อกำหนดขนาดของด้านสามเหลี่ยมให้พอเหมาะกับความลึกที่จะกัดซึ่งแสดงข้อมูลลงในรูปที่ 3.11 และมีวิธีการคำนวณเป็นดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 อัตราการเซาะมุมตามข้อมูลของ Bean[34]



รูปที่ 3.12 (ก)วิธีการคำนวณมุมชดเชยแบบสามเหลี่ยม (ข) เทคนิคการสร้างมาสก์มุมชดเชยแบบสามเหลี่ยม

พิจารณา $\triangle OPG$

$$\frac{\sin \alpha}{OP} = \frac{\sin 18.43^\circ}{d_c} \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา $\triangle OPG$

$$\frac{\sin \alpha}{OP} = \frac{\sin 18.43^\circ}{d_c} \quad (3.3)$$

พิจารณา $\triangle OSQ$

$$\sin \alpha = \frac{\delta_c}{d_c} \quad (3.4)$$

แทน (3.4) ใน (3.3)

$$\begin{aligned} \frac{1}{OP} \left(\frac{\delta_c}{d_c} \right) &= \frac{1/\sqrt{10}}{d_c} \\ OP &= \sqrt{10} \delta_c \end{aligned} \quad (3.5)$$

จากความสมมาตรของการกักมุม จะได้รูปสามเหลี่ยม POU และ $P'OU$ ที่เท่ากันทุกประการ ลากเส้น UU' ขนานกับ PO จะได้ว่า

$$x = 45^\circ \quad \therefore d_u = \sqrt{2}a$$

พิจารณา $\triangle POU$

$$\begin{aligned} \frac{\sin \beta}{d_u} &= \frac{\sin x}{PU} = \frac{1}{\sqrt{2}PU} \\ PU &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{d_u}{\sin \beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{d_u}{1/\sqrt{10}} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\therefore PU = \sqrt{5}d_u \quad (3.6)$$

จาก $\triangle POU$

$$PU^2 = OP^2 + d_u^2 - 2OPd_u \cos 45^\circ$$

$$4d_u^2 = 10\delta_c^2 - 2\sqrt{5}\delta_c d_u$$

โดยการหาคำตอบรากที่สอง จะได้คำตอบว่า

$$d_u = \frac{\sqrt{5}}{2} \delta_c \quad (3.7)$$

หรือ

$$d_u = \frac{\sqrt{5}}{2} \delta_u \quad (3.8)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\boxed{PU = \sqrt{5}d_u = 5\delta_u = 5\delta_c} \quad (3.9)$$

ในการสร้างมาส์กของมูมชดเชย จำเป็นต้องทราบข้อมูลการเซาะมูม d_u ตามตารางในรูปที่ 3.11 ซึ่งจะประมาณความสัมพันธ์โดยสมมุติว่าการเซาะมูมเป็นเชิงเส้นกับความลึกดังนี้

$$d_u = -1.941 + 0.659h \text{ (ไมครอน)} \quad (3.10)$$

ขั้นตอนต่อไปต้องคำนวณระยะ δ_c จากสมการ (3.7) $\delta_c = \frac{2}{\sqrt{5}} d_u$ และคำนวณระยะ OP จากความสัมพันธ์

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin 90^\circ}{OP} &= \frac{\sin 18.43^\circ}{d_c} \approx \frac{1}{\sqrt{10}\delta_c} \\ OP &= \sqrt{10}\delta_c = 2\sqrt{\frac{10}{5}}d_u = 2\sqrt{2}d_u \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

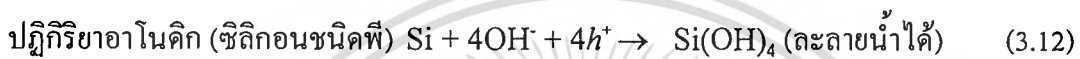
ลากเส้นตรงทำมุม 18.43 องศา จากจุด P และ P' มาบรรจบกันที่ Q ดังรูปที่ 3.12 (ข)จะได้มูมชดเชยแบบสามเหลี่ยมดังต้องการ

3.4 การควบคุมการกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

การควบคุมการกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Controlled Etching: ECE) นั้นสามารถลดความไม่แน่นอนของการกัดโดยวิธีจุ่มในสารละลายตามปกติได้ในระดับหนึ่ง โดยธรรมชาติทั่วไปของปฏิกิริยาของการกัดต้องมีการย้ายอิเล็กตรอนระหว่างตัวกัดกับวัสดุที่ต้องการกัด แต่ถ้าย้ายนั้นไม่สม่ำเสมอ ไม่ว่าจะโดยความบกพร่องของวัสดุเอง หรือความสม่ำเสมอของปฏิกิริยาตามตำแหน่งต่างๆหรือ ณ เวลาใดๆของตัวกัดเองจะทำให้เกิดความไม่แน่นอนในระดับหนึ่ง การใช้พลังงานศักย์ไฟฟ้าเข้าบังคับทิศทางการเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดการย้ายอิเล็กตรอนที่แน่นอนขึ้น ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่า ถ้าผิวเริ่มต้นมีความขรุขระมาก (RMS ประมาณ 15 ไมครอน) ทิศทางที่จะถูกกัดไม่สามารถกำหนดได้ชัดเจน แต่เมื่อใช้การควบคุมการกัดด้วยไฟฟ้าเคมีจะทำให้ความขรุขระลดลง (เหลือประมาณ 1 ไมครอน)[3]

การทดลองควบคุมการกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนั้น ได้ทำการทดลองกับซิลิกอนทั้งสามชนิดคือ (ก)ซิลิกอนชนิดพี (ข)ซิลิกอนชนิดเอ็น และ (ค)ซิลิกอนที่มีชั้นอีพิตรงกันข้ามกับฐานรอง เช่น ชั้นอีพิเทกเซลเอ็นบนฐานรองพี (หรือกลับกัน) โดยจะป้อนไฟเข้าที่ซิลิกอน เรียกซิลิกอนว่าแอโนด และมีขั้วไฟฟ้าที่เฉื่อยปฏิกิริยา (เช่น พลาตินัม ทองคำ หรือเสตนเลส) จุ่มลงในสารละลายทำหน้าที่รับกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดในสารละลาย เรียกขั้วนี้ว่า ขั้วคาโทด หรืออิเล็กโตรดนับ (Counter Electrode: CE) เซลล์แบบนี้เรียกว่าเซลล์แบบอิเล็กโตรด 2 ขั้ว ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.13(ก) ต่อมาทำการป้อนไฟแก่วงจรแล้ววัดค่ากระแสที่ไหลเข้าอิเล็กโตรดนับ พบว่าศักยะระหว่างซิลิกอนและสารละลายจะไม่คงที่แต่ขึ้นกับความเข้มข้นกระแสในสารละลาย ดังนั้นจะต้องเพิ่มจุดอ้างอิงใหม่คือวัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักดาของสารละลายเทียบกับขั้วอ้างอิงอันหนึ่งเรียกอิเล็กโตรดอ้างอิง (Reference Electrode: RE) เช่น อิเล็กโตรดคาลอเมลอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode :SCE) ดังแสดงในรูปที่ 3.13(ข) แบบ 3 อิเล็กโตรดนั้นจะมีวงจรควบคุมศักดาของสารละลาย (เมื่อเทียบกับ SCE) ให้คงที่ตลอดเวลา เรียกว่า โพเทนทิโอสเตต (potentiostat) สารละลายจะแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกไซด์ OH^- และจะฉีดไฮดรอกไซด์เข้าสู่ซิลิกอนจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่ผิวซิลิกอนทำให้กลายเป็นซิลิเกตที่ละลายน้ำได้หรือเกิดเป็นซิลิกอนออกไซด์ SiO_x ขึ้นบนขั้วซิลิกอน (ขั้วอานอด) ขณะเดียวกันก็เกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำขึ้นบริเวณขั้วคาโทดซึ่งจะเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเขียนเป็นปฏิกิริยา สมการอานอดิก และ คาโทดิกดังนี้

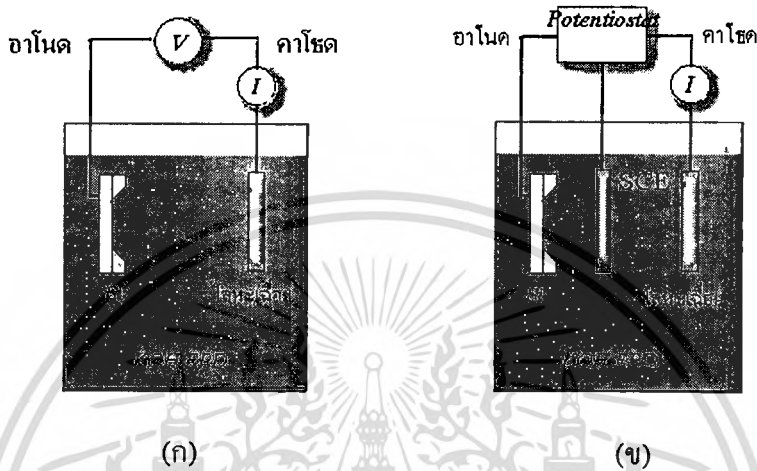


สำหรับกราฟศักดา-กระแสสำหรับซิลิกอนชนิดเอ็นและพีจะได้รูปกราฟคล้ายดังรูปที่ 3.14 [32] ในกรณีที่ใช้มาส์กเป็นออกไซด์และกัดด้วย EPD จะพบว่าซิลิกอนทั้งสองชนิดมีลักษณะเฉพาะของกราฟคล้ายกัน ถ้าพิจารณาจากค่าศักดาต้านขั้วสุดของกราฟ ขณะที่ให้โพลาร์ระบบจะสังเกตพบฟองอากาศเกิดขึ้นคือเกิดการกัดขึ้น เมื่อเลื่อนศักดามาทางค่าบวกมากขึ้นมาจนถึงศักดาค่าหนึ่ง (ประมาณ -0.3 โวลต์สำหรับซิลิกอนชนิดพี และประมาณ -0.9 โวลต์สำหรับชนิดเอ็น) กระแสจะพุ่งขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ J_{pass} เรียกกระแสสูงสุดนี้ว่ากระแสป้องกัน (passivation current) และนิยามศักดา ณ จุดดังกล่าวว่าศักดาป้องกัน (Passivation Potential: PP) ใช้สัญลักษณ์ V_{pp} ช่วงที่กระแสเริ่มไหลสูงขึ้นเรื่อยๆจะทำให้เกิดออกไซด์ที่มีความพรุนสูงขึ้นที่ผิวหน้า ช่วงที่เริ่มเกิดออกไซด์ซิลิกอนยังคงถูกกัดอย่างต่อเนื่อง แต่ออกไซด์ก็เกิดมากขึ้นตามค่ากระแสและมีความพรุนลดน้อยกว่าเริ่มแรก จนเมื่อถึงเวลาหนึ่งซึ่งค่ากระแสสูงสุดและอัตราการเกิดออกไซด์จะเอาชนะอัตราการกัดซิลิกอนแล้ว กระแสจะตกลงมาอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่กัดด้วย KOH กราฟจะไม่ตกมาอย่างรวดเร็วแต่จะใช้เวลายาวนานขึ้นเนื่องจากออกไซด์ถูกกัดได้เร็วกว่ากรณี EPD

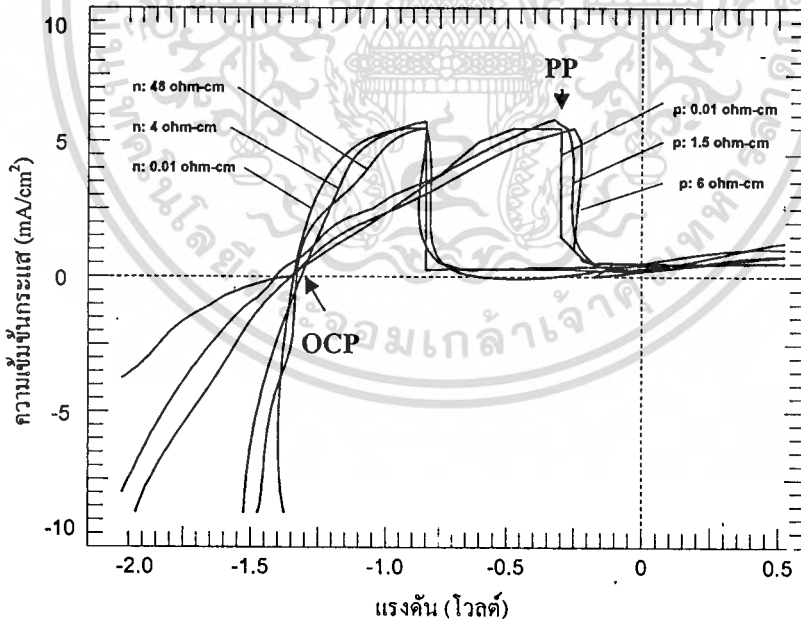
เมื่อป้อนศักดาไปทางลบมากขึ้น (more anodic bias) ถ้าสังเกตการเกิดฟองอากาศจะพบว่าการกัดจะหยุดลง นิยามจุดที่กระแสไม่ไหลเรียกว่าศักดาของวงจรเปิด (Open-Circuit Potential: OCP) พฤติกรรมหยุดกัด (etch-stop) ดังกล่าวนี้องเป็นประโยชน์สำหรับการควบคุมการกัดด้วยวิธีทางไฟฟ้า ถ้าต้องการให้เกิดการกัดควรป้อนไฟไปทางลบมากกว่าค่า PP (more cathodic bias) และเมื่อใดต้องการให้หยุดกัดต้องป้อนไฟไปทางบวกมากกว่า PP (more anodic bias) ค่า PP ของสารเจือชนิดพีจะเป็นค่าบวกมากกว่าของชนิดเอ็น ดังนั้นถ้าป้อนไฟเลี้ยงคงที่ค่าหนึ่งเป็นค่าลบมากกว่า PP ของชนิดเอ็น (สมมุติที่ -2.0 โวลต์) ซิลิกอนทั้งสองชนิดจะถูกกัด แต่ถ้าป้อนไฟเลี้ยงระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-0.89 และ -0.3 โวลต์ ซีลิกอนชนิดเอ็นจะถูกป้องกันแต่ฐานรองชนิดพีจะถูกกัดออกไปจนหมดและจะหยุดกัดเมื่อซีลิกอนชนิดพีถูกกัดจนหมดสิ้น เมื่อพลอตกราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสตามเวลาที่กัดจะได้ดังกราฟรูปที่ 3.15[32] จุดที่กระแสตกลงมาอย่างรวดเร็วถือว่าเป็นจุดสิ้นสุดการกัด ไดอะแฟรมซีลิกอนชนิดเอ็นที่ได้จะมีความหนาเท่ากับความหนาของชั้นอีพิแทกเซียล

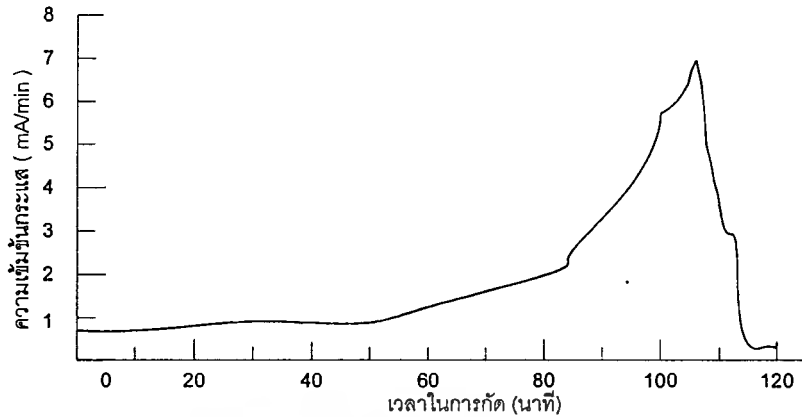


รูปที่ 3.13 (ก) เซลล์กัดแบบ 2 อิเล็กโตรด (ข) แบบ 3 อิเล็กโตรด



รูปที่ 3.14 ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันของการกัดแบบไฟฟ้าเคมีบนซีลิกอนชนิดเอ็นและพีระนาบ (100) ใน EPD [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 กราฟความหนาแน่นกระแสและเวลาในการกัดเพื่อสร้างเมมเบรนโดยวิธีหุคกัดที่รอยต่อพีเอ็น [31]

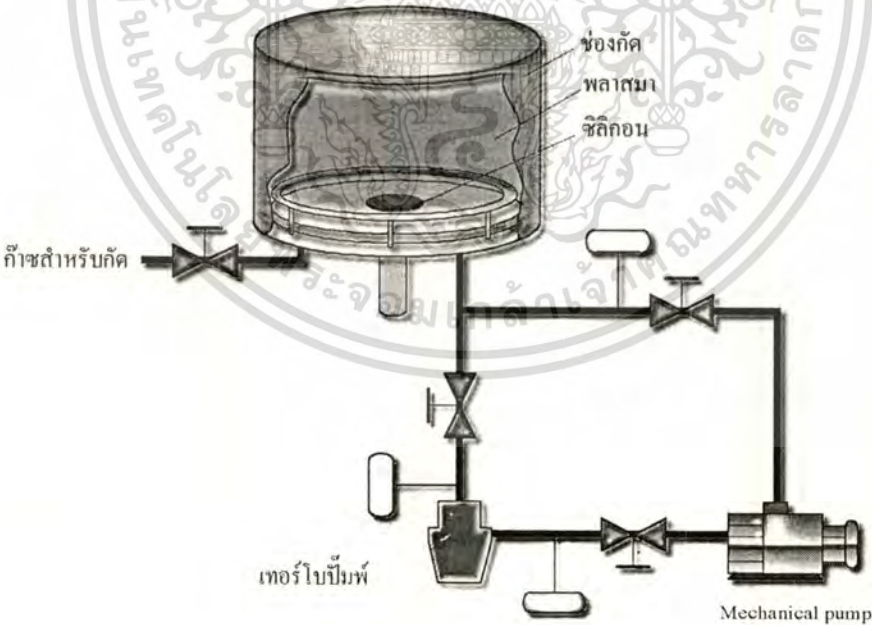
ปรากฏการณ์หุคกัดนั้นสามารถอธิบายกลไกโดยพิจารณาคัดจากกราฟในรูปที่ 3.14 โดยเริ่มตั้งแต่แกนลบซ้ายสุดมาจนขวาสุดของกราฟ ขณะที่ไบอัสทางซ้ายของ PP พฤติกรรมจะใกล้เคียงกับกฎของโอห์ม กระแสจะเพิ่มตามค่าศักดาที่ป้อนให้แก่วงจร เมื่อศักดาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงศักดาค่าหนึ่งเรียกศักดาเกิดออกไซด์ (Oxide Formation Potential: OFP) จะเกิดออกไซด์ขึ้นบริเวณผิวหน้าซิลิกอน ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเคมีที่ให้แก่ระบบนั่นเอง ออกไซด์ที่ได้จะมีความพรุน และมีความหนาประมาณ 5-10 อังสตรอม เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ณ PP ออกไซด์ที่เกิดมีความสมบูรณ์มากขึ้นและปกคลุมทั่วบริเวณผิวหน้าทำให้กระแสหยุดไหล ถ้าหยุดการป้อนไฟลงชั่วคราวออกไซด์ดังกล่าวจะถูกกัดหายไป การกัดจะดำเนินต่อไปได้อีก การเกิดออกไซด์กรณีนี้เรียกออกซิเดชันแอโนดิกออกซิเดชัน (Anodic oxidation) ออกไซด์ที่ได้จะไม่สมบูรณ์และไม่มีอัตราการเกิดที่แน่นอนจึงไม่เหมาะสมสำหรับการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วิธีการควบคุมการกัดด้วยไฟฟ้าเคมีนอกจากจะให้พื้นผิวสม่ำเสมอมากขึ้นแล้วยังสามารถควบคุมการหุคกัดได้อย่างอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามการกัดที่รวดเร็วเกินไปอาจก่อให้เกิดการลัดวงจรคุณสมบัติการหุคกัดโดยอัตโนมัติจะหมดลงและต้องทำการกัดโดยหาจุดสิ้นสุดที่ต้องการตามเวลาการกัด แม้ว่าจะไม่สามารถใช้ประโยชน์จากการหุคกัดที่รอยต่อได้แต่ก็ยังสามารถควบคุมการกัดให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นได้

การออกแบบตัวตรวจจับอัตราเร่งต้องผ่านขั้นตอนการกัดทั้งสองด้านของแผ่นเวเฟอร์ให้ ความลึกของหลุมกัดสัมผัสกันระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง ด้านหนึ่งจะต้องกัดเพื่อสร้างไดอะแฟรมบางดังนั้นควรใช้เทคนิคการควบคุมการกัดตามวิธีไฟฟ้าเคมีซึ่งวิธีการและผลการทดลองเปรียบเทียบจะเสนอในบทที่ 5 ผลการทดลองต่อไป

3.5 การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Ion Etching : RIE) [35]

ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ แม้ว่ากระบวนการกัดโดยใช้สารเคมีแบบน้ำยังมีความสำคัญต่อกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ แต่ในปัจจุบันกระบวนการกัดโดยใช้รีแอคทีฟพลาสมาได้ทวีความสำคัญยิ่งขึ้นโดยเฉพาะกับการสร้างวงจรรวมขนาดใหญ่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดด้วยพลาสมามีข้อดีเหนือการกัดด้วยสารเคมีแบบเดิมคือทิศทางการกัดที่แน่นอนกว่า และสามารถสร้างแบบในขั้นตอนโฟโตลิโธกราฟีได้แน่นอนแม่นยำกว่า นอกจากนี้ยังเหนือกว่าในด้านความสะดวก และสามารถแทรกกระบวนการกัดเข้ากับสายงานการผลิตได้สอดคล้องกันมากกว่า โดยเฉพาะขั้นตอนต่อเนื่องจากกระบวนการที่ผ่านระบบสุญญากาศ เช่นกระบวนการ ion beam epitaxy กระบวนการกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive etching) นั้นเป็นการกัดโดยผนวกพื้นฐานกายภาพของการฉาบ (sputtering) และกระบวนการเคมีที่เกิดจากไอออนที่ไวปฏิกิริยาเข้าด้วยกัน การศึกษาและทดลองต่างๆทำให้ได้ข้อมูลว่าก๊าซชนิดใดกัดเฉพาะสารชนิดใด และมีการกัดแบบเลือกกระนาบหรือไม่

เครื่องมือพื้นฐานสำหรับการเกิดการกัดแบบ RIE และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.16 ระบบพื้นฐานของการกัดแบบ RIE

ระบบพื้นฐานของการกัดแบบ RIE เป็นดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยช่องว่างซึ่งมีทางเข้าและทางออกของก๊าซ ด้านล่าง(หรือด้านบน)ภายในช่องว่างเป็นขั้วไฟฟ้าซึ่งจะคอยป้อนไฟตรงหรือไฟสลับเพื่อให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา กระบวนการเกิดพลาสมาจะอธิบายได้ดังนี้

1. การเกิดส่วนไวต่อปฏิกิริยา (active species generation) เมื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัวในระบบอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าเร่งจนมีพลังงานขนาดเพียงพอแก่การเกิดไอออนไนซ์ การชนกับโมเลกุลของก๊าซจะทำให้เกิดพลาสมาที่เรืองแสง ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งส่วนเป็นประจุบวก ประจุลบ อิเล็กตรอนและส่วนที่เป็นกลางทางไฟฟ้า แต่โดยรวมแล้วจำนวนประจุบวกและลบจะเท่ากันแต่มีสัดส่วนเทียบกับส่วนที่เป็นกลางแล้วมีจำนวนน้อยมาก (น้อยกว่า 1 %) จำนวนความหนาแน่นของส่วนที่เกิดการไอออไนซ์จะมีค่าประมาณ 10^4 - 10^{10} cm⁻³ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะมีสภาพคล่องสูงกว่าประจุบวก ดังนั้นจะแพร่ออกสู่ผิวหน้างานได้เร็วกว่า ดังนั้นผิวหน้างานจะมีศักดาเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา การแยกสภาพขั้วออกจากกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างหมู่พลาสมาและฐานรองโดยชี้ออกจากพลาสมาไปสู่(และตั้งฉากกับ)ผิวหน้างาน ไอออนที่มีประจุที่เดินทางมายังหรือหลุดออกจากผิวหน้างานจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ส่วนของพลาสมาที่มีสภาพเป็นกลางจะไม่เคลื่อนที่ตามอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น มันจึงสามารถเดินทางไปยังจุดใดๆที่ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นตรง ดังนั้นการ undercutting ภายใต้อนุภาค (mask layer) จึงเกิดขึ้นเนื่องจากส่วนที่เป็นกลางทางไฟฟ้านี้เอง

ก๊าซส่วนหนึ่งที่ถูกไอออไนซ์แล้วนั้นจะเป็นส่วนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเรียกว่าส่วนไวต่อปฏิกิริยา (reactive species) เช่น ไอออนของฟลูออไรด์เป็นส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยาสำหรับ SF₆ และไอออนของคลอรีนเป็นส่วนไวต่อปฏิกิริยาสำหรับ CF₄ ดังนั้นจึงเรียกการกัดแบบนี้ว่าการกัดโดยไอออนไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Ion Etching :RIE)

2. ส่วนไวปฏิกิริยาเคลื่อนที่จากกลุ่มก๊าซพลาสมาสู่ผิวหน้าของชิ้นงานที่กัด ซึ่งเกิดโดยกระบวนการแพร่ ถ้าผิวหน้าชิ้นงานที่กัดมีโครงสร้างสูงต่ำก็จะจำกัดอัตราการกัดลงได้

3. ผิวหน้างานจะดูดซับส่วนไวงาน (อะตอมฟลูออไรด์) ไว้ การระดมยิงอย่างต่อเนื่องของไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาในก๊าซพลาสมาจะช่วยให้การกัดสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง

4. ขั้นตอนทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอมชิ้นงานกับไอออนไวปฏิกิริยาเกิดเป็นผลผลิตชนิดใหม่ซึ่งสามารถระเหยออกไปจากผิวหน้าได้ สำหรับก๊าซที่มีฟลูออไรด์เป็นอนุผล อาจเกิดเป็น SiF₄ (ระเหยได้) หรืออาจเป็น SiF SiF₂ SiF₃ ซึ่งระเหยไม่ได้ อัตราการเกิดปฏิกิริยานี้จะมีค่าเท่ากับอัตราการทำปฏิกิริยานอกสภาวะพลาสมา ดังนั้นถ้าเพิ่มการระดมยิงด้วยไอออนจะสามารถเพิ่มการทำลายพันธะหลัก (backbone bonding) ของผิวหน้างานได้ดีขึ้น

5. กระบวนการดีสอรัป (Desorption) เมื่อเกิดส่วนที่ระเหยได้บนผิวหน้าแล้วจะเกิดการแพร่ออกสู่บรรยากาศของพลาสมาทำให้ผิวหน้าหลุดออกและเกิดการกัดขึ้น ขั้นตอนนี้สำคัญที่สุด

ในขั้นตอนการกัดทั้งหมด ซึ่งต้องการให้มีความดันไอของสารที่ระเหยออกไปมีค่าสูง ณ อุณหภูมิของผิวงาน (โดยทั่วไปจะต่ำกว่า 100°C) ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการกัดได้โดยการระดมยิงผิวงานด้วยไอออน

6. การสูบลำอากาศภายในออกสู่ภายนอกจะช่วยให้เกิดการพัดพาสิ่งที่จะระเหยออกจากผิว ถ้าไม่มีการสูบลำอากาศออกไปจากระบบจะทำให้เกิดสารโพลีเมอร์ขึ้นบนผิวหน้าแทนที่

สิ่งสำคัญในการพิจารณาเลือกชนิดของตัวกัดสำหรับพลาสมานั้นยังคงเป็น (1)ทิศทางที่ขึ้นงานถูกกัด (Directivity) หรือสถานะแอนไอโซโทรปิกของการกัด และ (2)สภาพเลือกกัดวัสดุ (Selectivity) ก๊าซแต่ละชนิดเมื่อเกิดเป็นพลาสมาแล้วอัตราการกัดสำหรับแต่ละทิศทางหรือแต่ละวัสดุจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการคำนึงถึงองค์ประกอบในตัวอุปกรณ์เพื่อเลือกชนิดของก๊าซนั้นมีความสำคัญ สภาพเลือกกัดของในตารางที่ 3.3 จะเป็นก๊าซที่ใช้ในกระบวนการ RIE สำหรับการกัดซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3.3 ตัวกัดพลาสมาสำหรับซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์[35]

วัสดุที่ต้องการกัด/ตัวกัด	หมายเหตุ
ซิลิกอนไดออกไซด์ • $\text{CF}_4 + \text{O}_2(10\%)$ • CHF_3 ฟรีออน 23 • C_2F_6 ฟรีออน 116 • C_3F_8 ฟรีออน 118	- การเติมออกซิเจนสามารถเพิ่มอัตราการกัดได้ - Selectivity ดีสำหรับซิลิกอน - อัตราการกัดสูงกว่า CF_4
โพลีซิลิกอนและผลึกเดี่ยวของซิลิกอน • $\text{CClF}_3 + \text{Cl}_2$ • $\text{CHCl}_3 + \text{Cl}_2$ • SF_6 • NF_3 • CCl_4 • $\text{CF}_4 + \text{H}_2$ • C_2ClF_5	- แอนไอโซโทรปิกและ selectivity เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนก๊าซ - ถ้าคลอรีนมากขึ้นจะกัดออกไซด์ลดลง - มี selectivity ดีสำหรับออกไซด์ - ไอโซโทรปิก มีอัตราการกัดสูง (>1 ไมครอน/นาที่) - แอนไอโซโทรปิก - selectivity ไม่ดีสำหรับออกไซด์ ไฮโดรเจนช่วยให้เป็นแอนไอโซโทรปิก - selectivity ไม่ดีสำหรับออกไซด์

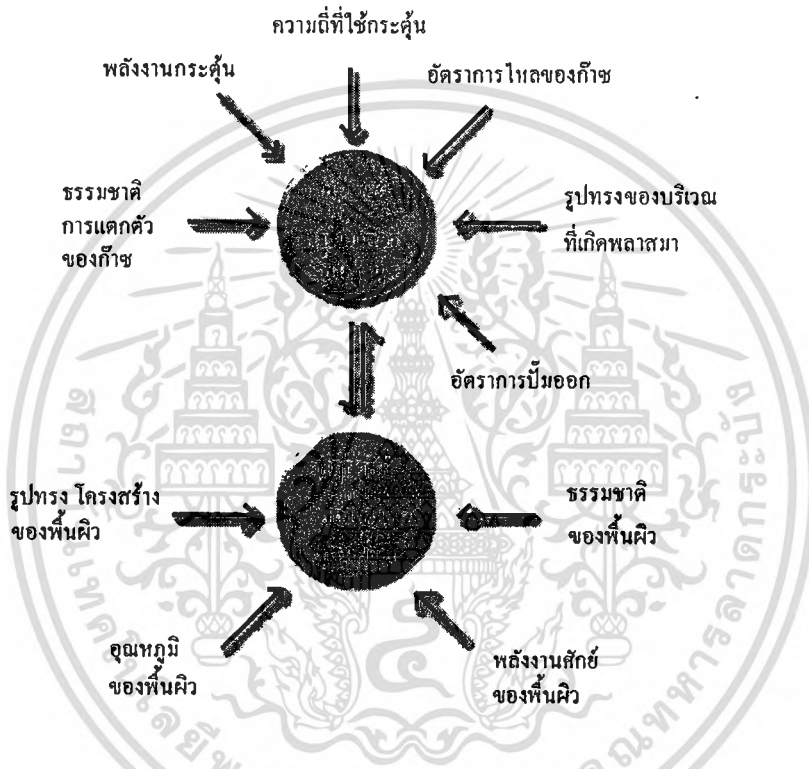
จากตารางจะพบว่า การกัดซิลิกอนด้วยพลาสมานั้นจะเลือกก๊าซซึ่งประกอบด้วยอะตอมของฟลูออรีน คลอรีน และโบรมีนเป็นส่วนไวต่อปฏิกิริยาเป็นหลัก โดยจะได้ผลิตผลเป็น SiF_4 , SiCl_4 และ SiBr_4 ซึ่งระเหยได้สำหรับอนุผลทั้งสามตามลำดับ Mogab[35] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการกัดของ CF_4 โดยวิธีทางแสงพบว่าเกิดการ undercut สูงรวมทั้งมีอัตราการกัดที่สูงมาก ดังนั้นก๊าซมีส่วนผสมของคลอรีนจึงไม่เหมาะสมเพื่อการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก อย่างไรก็ตาม Tachi[35] ได้ค้นพบว่าก๊าซ SF_6 นั้นสามารถลดอัตราการกัดแนวขนานกับผิวได้โดยการทำให้ฐานรองมีอุณหภูมิประมาณ -120°C ซึ่งจะได้ภาคตัดขวางค่อนข้างเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าอุณหภูมิที่ต่ำมากนั้นจะลดอัตราการกัดบริเวณผนังของหลุมแต่ก็ทำให้อัตราการกัดแนวตั้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้ส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยาคั่งค้างบริเวณผิวหน้าได้นานขึ้น

ตัวกัดที่มีส่วนผสมของคลอรีนและโบรมีนมีความเหมาะสมต่อการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมคลอรีนและโบรมีนนั้นเมื่อถูกดูดซับไว้บนผิวหน้าของซิลิกอนจะไม่กัดซิลิกอนออกทันทีแต่จะรวมกับซิลิกอนกลายเป็นชั้นสารซึ่งมีกลิ่นฉุน อะตอมคลอรีนยังต้องการพลังงานประมาณ 10 eV เพื่อทำลายพันธะของซิลิกอนออกจากกัน แต่อะตอมฟลูออไรด์นั้นไม่ต้องการพลังงานดังกล่าว เมื่อรวมตัวกับซิลิกอนเป็น SiF_x (x เป็นจำนวนใดๆ) จึงสามารถระเหยออกได้ทันทีที่ถูกดูดซับไว้บนผิวซิลิกอน

สำหรับตัวกัดที่เป็นก๊าซคลอรีนผสมกับอาร์กอนพบว่าการกัดเลือกทิศทางได้ดีในซิลิกอนบริสุทธิ์ ส่วนซิลิกอนที่มีการเจือสารเล็กน้อยจะพบว่าคลอรีนจะกัดพื้นที่ที่คลอรีนแตกตัวในพลาสมา ดังนั้นการที่จะสรุปพฤติกรรมของการกัดของคลอรีนให้แน่นอนนั้นจึงมีความยากลำบากเนื่องจากสามารถควบคุมหรือติดตามผลของพารามิเตอร์ได้หลากหลาย อาทิ ความดันของระบบ อุณหภูมิของฐานรองไปจนถึงการเติมก๊าซผสมฮาโลเจนชนิดอื่นๆลงไป ก๊าซที่ประกอบด้วยธาตุฮาโลคาร์บอน (Halocarbon) มากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปสามารถเพิ่มความสามารถกัดแบบแอนไอโซโทรปิกได้ เช่น CClF , CCl_2F_2 , CCl_3F และ CF_3Br เป็นต้น เนื่องจากอะตอมฟลูออรีนมีค่าอิเล็กตรอนเนกาติวิตี (electron negativity) สูง ดังนั้นพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอนจึงแข็งแรงกว่าพันธะระหว่างโบรมีนหรือคลอรีนกับคาร์บอน เมื่อก๊าซเริ่มแตกตัวจึงเป็นไปได้สูงว่าอะตอมคลอรีนหรือโบรมีนจะหลุดออกมาก่อนฟลูออรีน ดังนั้นก๊าซผสมระหว่างธาตุฮาโลคาร์บอนเหล่านี้จึงมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับก๊าซคลอรีนหรือโบรมีนซึ่งมีความเป็นแอนไอโซโทรปิกสูง ถ้าเติมก๊าซออกซิเจนลงในก๊าซผสมของฮาโลคาร์บอนเหล่านี้จะทำให้อะตอมคลอรีนหรือโบรมีนแตกตัวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามก็จะมีข้อเสียเช่นกันเนื่องจากสามารถทำให้เกิดการออกซิเดชันและทำให้เกิดสารโพลีเมอร์ CF_3 ขึ้นแทนที่การกัดออกไป นอกจากนี้ความสามารถในการป้องกันการกัดที่ผนังจะลดลงด้วย

อัตราการกัดและคุณภาพการกัดด้วยพลาสมาไวปฏิกิริยาสำหรับก๊าซชนิดใดๆมีอยู่หลายประการ อาทิ ระดับและชนิดของสารเจือในซิลิกอน ระดับพลังงานพลาสมา อุณหภูมิของฐานรอง การคำนวณว่ากรณีใดที่ทั้งสี่นี้ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอุณหภูมิของพลาสมา ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นพารามิเตอร์ระดับมหภาค (macroscopic parameter) ซึ่งสามารถควบคุมให้มีความแน่นอนได้ แต่ผลจากการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้ออกไปในแต่ละครั้งจะไม่สามารถควบคุมผลออกมาให้แม่นยำได้ ประสบการณ์และสถิติจากการทดลองซ้ำแล้วซ้ำเล่าจะทำให้สามารถคาดการณ์ได้ดีขึ้น ตัวอย่างปรากฏการณ์หลายประการที่มีผลต่อระบบพลาสมาได้แสดงในรูปที่ 3.17 ดังนี้

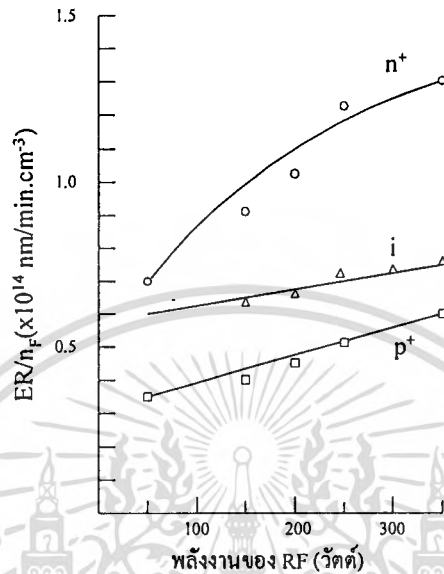


รูปที่ 3.17 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการกักด้วยพลาสมา (n_e เป็นความหนาแน่นพลังงานของอิเล็กตรอน $f(E)$ เป็นฟังก์ชันการกระจายพลังงานอิเล็กตรอน และ N คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน τ เป็น Resident time [36])

อัตราการกักชิลิกอนนั้นขึ้นกับโครงสร้างอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้า ถ้าเป็นสารเจือชนิดเอ็นที่มีการเจืออย่างเข้มข้นอัตราการกักจะสูงกว่าชิลิกอนบริสุทธิ์ ซึ่งสูงกว่าชิลิกอนชนิดพีเข้มข้น ถ้าอะตอมสารเจือไม่มากกว่า 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรโดยประมาณจะไม่พบความแตกต่างของอิทธิพลจากระดับการเติมสารเจือ ในรูปที่ 3.18 แกน y เป็นอัตราส่วนของอัตราการกักด้วยสารเคมีต่อจำนวนอะตอมฟลูออรีนในก๊าซ ส่วนแกน x เป็นกำลังของ RF ที่ให้แก่พลาสมา

อะตอมสารเจือบนผิวชิลิกอนชนิดเอ็น เช่น As^+ (ยังไม่แน่ชัดจากการโคปซดเซบ) นั้นจะเกิดแรงดึงดูดคู่ควบกับไอออนไวปฏิกิริยา (เช่น F^+) จึงเพิ่มโอกาสที่ไอออนไวปฏิกิริยาจะมีการรวม

ตัวทางเคมีเป็นสารที่ระเหยได้นั้นสูง ในทางตรงข้ามอะตอมสารเจือชนิดพี เช่น B⁺ จะเกิดแรงผลักลูกลอมกับไอออนไนโตรเจนจึงมีอัตราการกัดต่ำที่สุด



รูปที่ 3.18 ผลของการเติมสารเจือลงในซิลิกอน เจ็อนไซทอลงคือ RF 13.56 MHz คาโรดแบบ อะลูมิเนียม 79.8%CF₄/19.2%O₂/4%Ar อัตราการไหลเท่ากับ 50 sccm ความดัน 25 มิลลิทอร์ [37]

ผลของระดับสารเจือจะลดลงถ้าเพิ่มการระดมยิงด้วยไอออน ดังนั้นการควบคุมการกัดแบบ RIE ด้วยระดับสารเจือจึงไม่ประสบผล สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมที่ต้องการการกัดในแนวลึกอย่างเดียวนั้น เช่น การกัดหลุมก้นลึก (trench) เพื่อทำการแยกวงจรแต่ละส่วนออกจากกันจะไม่สามารถควบคุมได้ แต่ถ้าใช้การกัดด้วยสารเคมีโดยปกติร่วมกับการควบคุมด้วยสารเจือจะสามารถกระทำได้นั่นเองกว่า วิธีการป้องกันผนังด้านข้างสำหรับ RIE ต้องสร้างเคลือบสารป้องกันเฉพาะด้านข้างโดยวิธี glow discharge ขึ้น กรณีที่กัดด้วย SF₆ จะมีการเติมออกซิเจนลงไปเพื่อเคลือบผนังด้านข้าง อย่างไรก็ตามการเติมก๊าซชนิดอื่นเข้าไปจะเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดทั้งของซิลิกอนและวัสดุวัสดุต่างๆได้ เช่น เมื่อเติมออกซิเจนเข้าไปในอัตราส่วน 50% จะลดอัตราการกัดซิลิกอนและลดการ selectivity ลงประมาณ 5 เท่า [37]

อย่างไรก็ตามแม้ว่าไม่สามารถควบคุมให้เกิดการหยุดกัดในพลาสมาได้แต่ก็สามารถอาศัยความแตกต่างของอัตราการกัดที่ความเข้มข้นต่างๆช่วยกำหนดรูปร่างสามมิติของอุปกรณ์แบบต่างๆได้ บริเวณใดที่ต้องการให้เกิดการกัดมากกว่าก็จะเติมสารเจืออย่างเข้มข้น วิธีการกำหนดความเข้มข้นเฉพาะบริเวณนั้นมีหลายวิธี ทั้งการเติมสารเจือด้วยการแพร่ หรือด้วยการยิงอิเล็กตรอนตาม

วิธีไอออนอิมแพลนต์ หรือการสร้างชั้นฝัง (Buried layer) ไว้ข้างใต้ ซึ่งจะต่างกันไปตามการออกแบบ แต่การควบคุมการเลือกกั้นนั้นต้องอาศัยศาสตร์ที่เป็นโลหะ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำวิธีกัดด้วยพลาสมาเป็นวิธีเสริมสำหรับการกัดด้วยสารละลายเท่านั้น ดังนั้นในบทที่ 5 ซึ่งเป็นผลการทดลองจึงไม่ได้เสนอผลการทดลองที่เงื่อนไขหรือพารามิเตอร์ที่หลากหลาย ในบทต่อไปจะเป็นการออกแบบตัวตรวจจับอัตราเร่ง การจำลองแบบการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก และลำดับขั้นตอนการสร้าง ซึ่งจะได้นำเสนอต่อไป



บทที่ 4

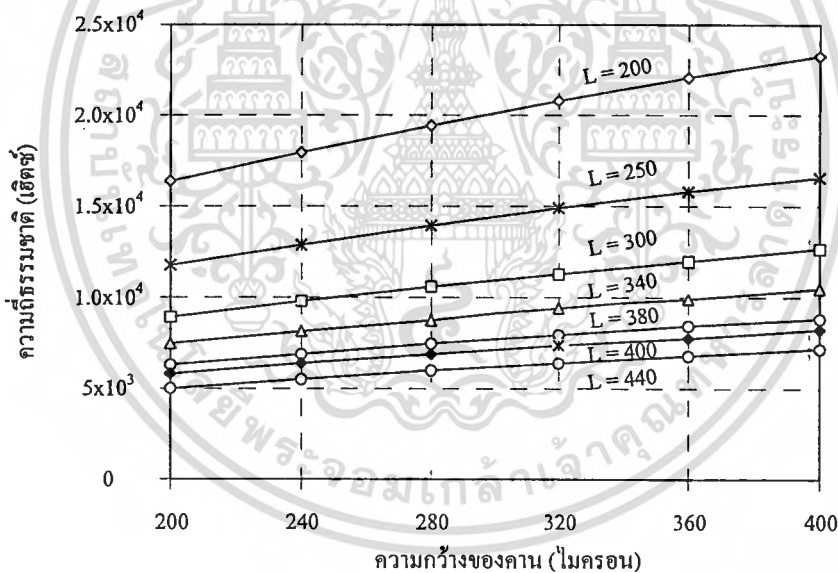
การออกแบบและสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่ง

4.1 การคำนวณลักษณะเฉพาะของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

จากสมการต่างๆในบทที่ 2 เป็นที่พิสูจน์ได้ว่าลักษณะทางเรขาคณิตของตัวตรวจจับอัตราเร่งนั้นเป็นสิ่งที่กำหนดลักษณะเฉพาะต่างๆของตัวตรวจจับอัตราเร่ง ดังต่อไปนี้

4.1.1 ความถี่ธรรมชาติของคานที่ความกว้างคานต่างกัน

โดยสมการที่(2.8) นำไปพลอตกราฟค่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติ $\omega_n/2\pi$ โดยกำหนดให้ความหนาของคานที่ 20 ไมครอน และยาวเท่ากับ 200 ถึง 400 ไมครอน ดังรูปที่ 4.1



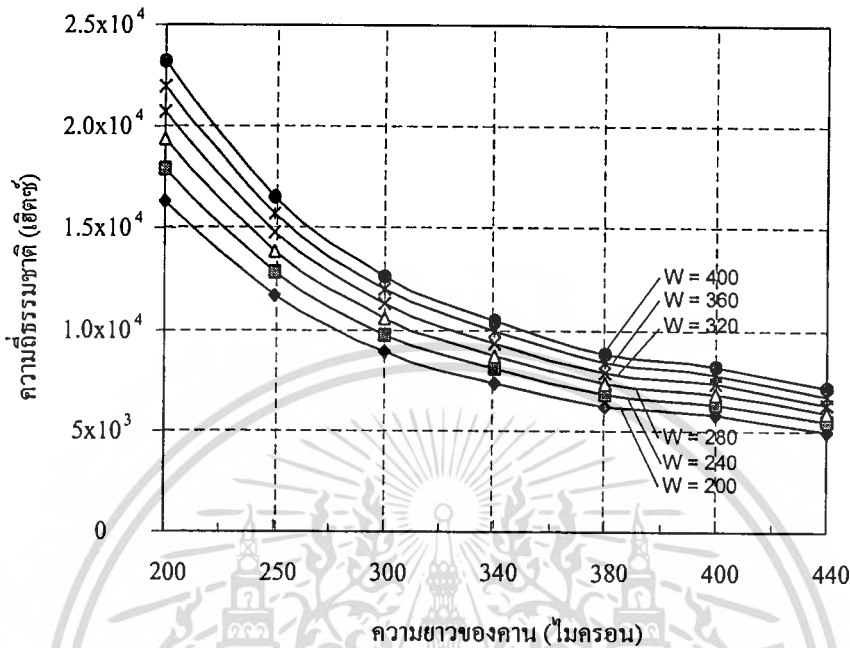
รูปที่ 4.1 ความถี่ธรรมชาติขึ้นกับความกว้างค่าต่างๆของคาน

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าคานที่กว้างที่สุดจะมีความถี่ที่สูงที่สุด ในขณะที่ความถี่ที่สูงที่สุดจะเกิดกับคานที่สั้นที่สุดเช่นกัน

4.1.2 ความถี่ธรรมชาติของคานที่ความยาวต่างกัน

โดยการใช้สมการที่ (2.8) เช่นเดิม นำไปพลอตกราฟค่าความถี่ธรรมชาติกับความยาวคานต่างๆกัน ได้ดังรูปที่ 4.2 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความถี่ธรรมชาติของคันขึ้นที่ความยาวค่าต่างๆของคัน

แม้ว่ากราฟในรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะสามารถบอกถึงข้อมูลในการตัดสินใจเพื่อเลือกขนาดของคันไปใช้ในการออกแบบเพื่อให้ตัวตรวจจับอัตราเร่งสามารถใช้งานในความถี่ที่เหมาะสมคือไม่เกิน 50% ของความถี่ธรรมชาติ ตัวตรวจจับอัตราเร่งในอุดมคตินั้นควรจะมีช่วงตอบสนองความถี่ที่กว้างเท่ากับอนันต์ แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถเพิ่มความหนาของคันได้มากกว่า 30 ไมครอน เนื่องจากความไวจะลดลงเป็นอย่างมาก แต่การลดความหนาของคันก็จะเป็นอันตรายต่อการนำไปใช้งาน เนื่องจากมวลเพื่อตรวจสอบมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับกับคันขึ้น อีกทั้งเกิดการออฟเซตของสัญญาณเอาต์พุตเนื่องจากสภาพองเริ่มตันเมื่อคันบางมาก (น้อยกว่า 10 ไมครอน) การเพิ่มความกว้างของคันจะทำให้สามารถใช้งานได้ถึงความถี่สูงขึ้น แต่ก็มีข้อจำกัดด้านความไวเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มความหนาของคันเท่ากับเป็นการเพิ่มความแข็งทำให้มีความไวลดลง แต่การเพิ่มความกว้างนั้นกระทำได้โดยสะดวกกว่าการเพิ่มความยาว เนื่องจากการเพิ่มความกว้างสามารถเพิ่มได้มากจนกระทั่งถึงความกว้างของมวล M โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของชิพหรือแพ็คเกจ ในรูปที่ 4.1 จะพบว่า การเพิ่มความกว้างของคันนั้นจะทำให้ความถี่ธรรมชาติสูงขึ้นอย่างช้าๆประมาณ 50 รอบต่อวินาทีต่อความกว้างที่เพิ่มขึ้น 1 ไมครอน แต่ข้อดีของการเพิ่มความยาวคันก็คือสามารถเพิ่มความไวได้อัตราที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโดยเลือกขนาดความหนา กว้าง ยาวต่าง ๆ นั้นจะมีข้อดีข้อเสียที่แลกกันไป (trade-off relation) ตัวตรวจจับอัตราเร่งทั่วไปจะออกแบบให้รับงานที่ความถี่อยู่ระหว่าง 500 ถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งสมการต่างๆ ในบทที่ 2 จะถูกต้องในช่วงความถี่ประมาณ 100 เฮิร์ตซ์

4.1.3 จุดออกแบบที่เหมาะสม (Design Optimization)

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงความสำคัญของตัวแปรสามชนิดคือ ระยะเห ความถี่ธรรมชาติ และความไวตามสมการที่ (2.7) (2.8) และ (2.48) ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ [6]

ระยะเหต่ออัตราเร่ง $1g$

$$y_M/g = \frac{(\frac{2L^3}{3} + 2c_1L^2 + 2c_1^2L)}{E(\frac{1}{12}wh^3)} Mg \quad (4.2)$$

ความถี่ธรรมชาติ

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{wh^3E}{12ML^3} \left[\frac{2+6f+f^2}{\frac{2}{3}+4f+\frac{21}{2}f^2+14f^3+8f^4} \right]} \quad (4.3)$$

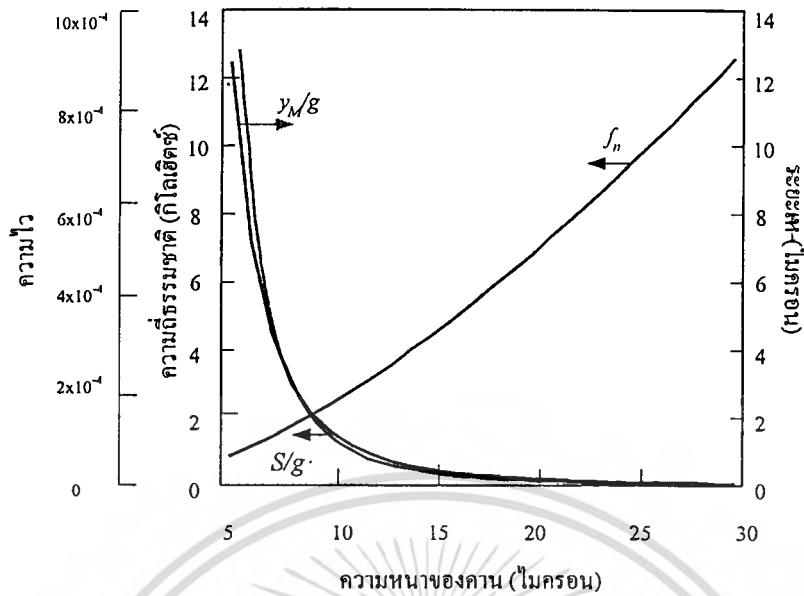
ความไวต่ออัตราเร่ง $1g$

$$S/g = \left[\frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) - (s_{12} + \frac{1}{2}s_{44}) \right] \left[M(c_1 + \left(\frac{L+b}{2} \right) \left(\frac{c-h}{\frac{1}{12}wh^3} \right)) \right] g \quad (4.4)$$

โดย $\frac{1}{12}(\pi_{12} + \pi_{12} + \pi_{44}) - (s_{11} + \frac{1}{2}s_{44}) = 4.5 \times 10^{-11} \text{ dyne/cm}^2$ สำหรับซิลิกอนที่มีความเข้มข้นสารเจือที่ผิวหน้าเท่ากับ $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

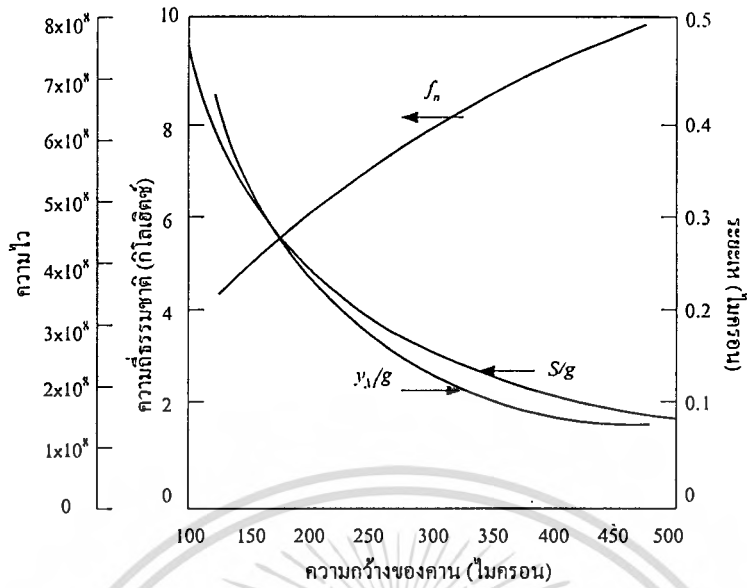
สมการที่ (4.2) (4.3) และ (4.4) นั้นเป็นสมการสำหรับตัวตรวจจับอัตราเร่งโครงสร้างแบบมวล คานยื่น และองค์ประกอบที่ไวต่อความเค้นเป็นตัวต้านทานเพียโซเท่านั้น โดยมีเงื่อนไขว่าคานยื่นจะต้องเป็นคานเนื้อเดียวและเรียบสม่ำเสมอ

ตัวแปรที่สำคัญที่สุดสำหรับการควบคุมคุณสมบัติของตัวตรวจจับอัตราเร่งก็คือความหนาของคาน h จากสมการทั้งสามจะสังเกตได้ในเบื้องต้นว่า $y_M \propto 1/h^3$ $f_n \propto h^{3/2}$ และ $S \propto 1/h^3$ แล้วทำการพลอตตัวแปรทั้งสามกับความหนาของคานตามสมการที่ (4.1) ถึง (4.4) ได้ดังรูปที่ 4.3 โดยเลือกความกว้างของคาน $w = 240$ ไมครอน มวล $M = 1.14 \times 10^{-6}$ กิโลกรัม $c_1 = 880$ ไมครอน และ $b = 100$ ไมครอน ความยาวตัวต้านทาน $L_r = 200$ ไมครอน



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเห (y_M/g) ความถี่ธรรมชาติ f_n และความไวต่อ 1 g กับ ความหนาของคาน เลือกที่ความยาว 300 ไมครอน กว้าง 240 ไมครอน และมวล $M = 1.14 \times 10^{-6}$ กิโลกรัม $c_1 = 880$ ไมครอน และ $b = 100$ ไมครอน (พลอตตามสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.4)) [6]

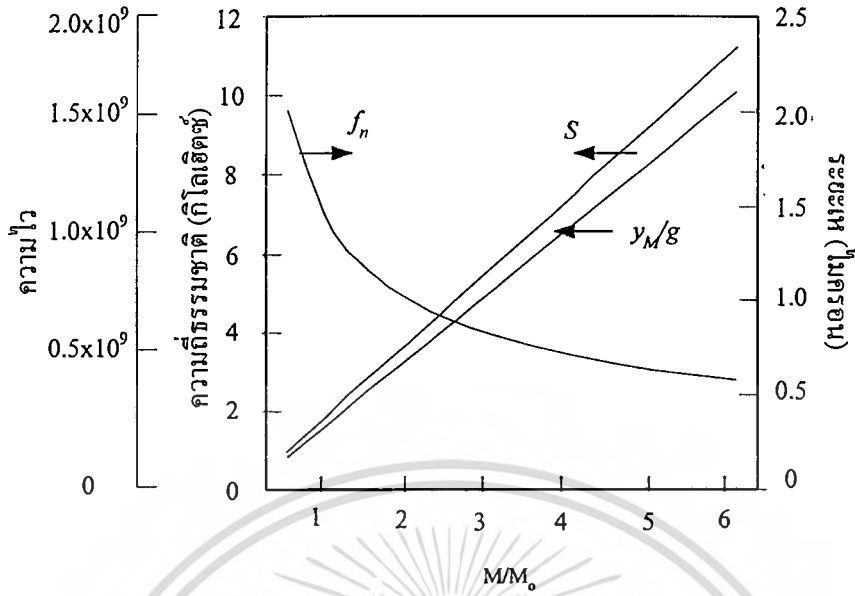
สำหรับคานที่บางมากๆ (ต่ำกว่า 10 ไมครอน) จะเกิดการเหเนื่องจากแรงโน้มถ่วงสูงมาก และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นระยะเหที่อัตราเร่งสูงกว่า 1g อาจจะมีข้อจำกัดมากขึ้น นั่นคือไม่เหมาะสมในการวัดอัตราเร่งค่าสูงๆ ถ้าอัตราเร่งที่สูงขึ้น h เท่าของแรงโน้มถ่วง ระยะเหก็จะเพิ่มขึ้น h เท่าเช่นกัน ผลจากการเปลี่ยนแปลงความกว้างของคานเป็นไปดังรูปที่ 4.1 โดยกำหนดที่ความหนาของคานเท่ากับ 20 ไมครอน สัดส่วนอื่นๆเป็นไปดังคำอธิบายในรูปที่ 4.3 จากสมการที่ (4.2) ถึง (4.4) จะพบว่า $S \propto 1/w$ $f_n \propto 1/w$ และ $y_M \propto 1/w$ ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของคานของตัวแปรสำคัญสามชนิดนั้นช้ากว่าการเปลี่ยนแปลงตามความหนาของคานมาก ถ้าลดความกว้างลงมากก็อาจจะไม่ทำให้และระยะเหความไวเพิ่มขึ้นมากนัก ดังนั้นการลดความกว้างเพื่อเพิ่มความไวจึงไม่น่าสนใจเท่ากับการลดความหนา การที่คานแคบลงจะเพิ่มโอกาสให้คานบิดตัวตามอัตราเร่งในแกน z มากขึ้น สำหรับค่าออฟเซต z_r ใดๆที่กำหนดขึ้นมา ค่าความไวต่ออัตราเร่ง a_z จะเพิ่มเป็น 4 เท่าถ้าคานแคบลง 2 เท่า (โดยสมมติ $c_2 = 0$)



รูปที่ 4.4 y_M , S และ f_n ที่ความกว้างคานต่าง ๆ กัน ที่อัตราเร่ง $a_y = 1g$ กำหนดให้คานหนา 20 ไมครอน ขาว 300 ไมครอน มวล $M = 1.14 \times 10^{-6}$ กิโลกรัม $c_1 = 880$ ไมครอน $c_2 = 0$ และ $b = 100$ ไมครอน (พลอตตามสมการที่ (4.2)–(4.4)) [6]

ตัวแปรที่กำหนดคุณสมบัติของตัวตรวจจับอัตราเร่งคือมวล M การเปลี่ยนแปลงมวล M นั้นมี 3 วิธีก็คือการเปลี่ยนแปลงวัสดุซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกเพียงมวลของซิลิกอน ดังนั้นจะไม่เปลี่ยนวัสดุที่ทำคาน วิธีที่สองคือการเพิ่มวัสดุอื่นๆที่เข้ากันได้ (compatible) กับกระบวนการสร้าง อาทิ การระเหยทอง หรือวัสดุอื่นไว้ ณ บริเวณฐานรองมวล (paddle) และวิธีที่สามคือการเปลี่ยนแปลงขนาดเรขาคณิตของมวล M ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกวิธีที่สามนี้

เพื่อความง่ายต่อการคำนวณ จะอนุมานว่ามวล M จะกระจายตัวอยู่เฉพาะในแนวแกน x เท่านั้น โดยมีจุดเซ็นทรอยด์ ณ ตำแหน่ง $L+c$, ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของคานในแกน x ผลรวมของมวล M นั้น จะนำไปตั้งกราฟในรูปที่ 4.5 ดังนี้



รูปที่ 4.5 ผลรวมของมวล M ที่มีต่อ y_M , S และ f_n ของระบบภายใต้อัตราเร่ง $1g$ จำนวนที่มวล $M_0 = 1.14$ มิลลิกรัม คานหนา = 20 ไมครอน กว้าง = 240 ไมครอน ยาว = 300 ไมครอน $c_1 = 880$ ไมครอน $c_2 = 0$ และ $b = 100$ ไมครอน (พลอตตามสมการที่ (4.2) ถึง (4.4)) [6]

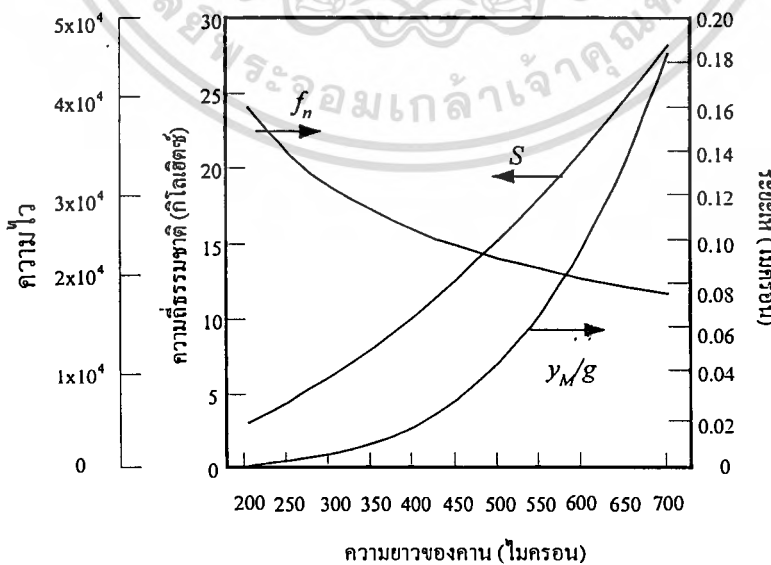
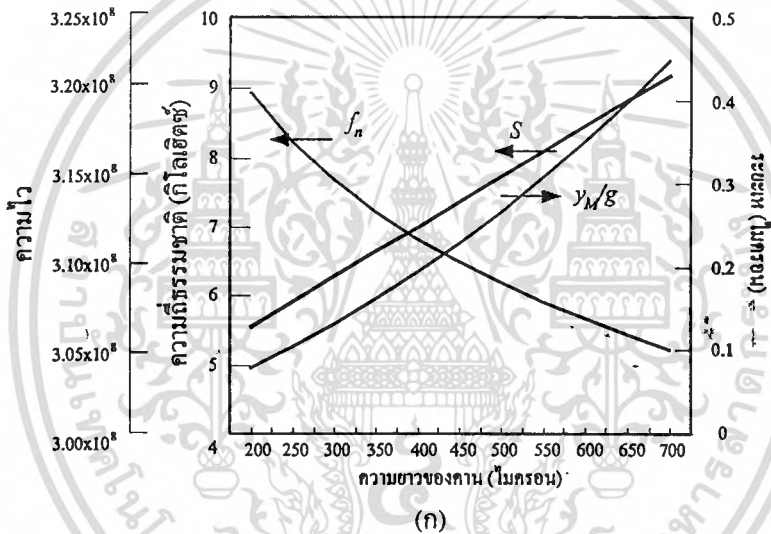
การเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลนั้นมีข้อน่าสนใจก็คือไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงขนาดของคาน ดังนั้น ภายใต้มาตราที่ออกแบบไว้ 1 ครั้งสามารถสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งที่มีความไวต่างกันได้ ซึ่งสามารถเพิ่มหรือลดได้โดยด้วยการคำนวณโดยง่าย เนื่องจาก S และ $y_M \propto M$ ในขณะที่ $f_n \propto M^{1/2}$ แต่ถ้าต้องการเพิ่มความไวอาจจะต้องเพิ่มขนาดของชิพให้ใหญ่ขึ้น หรือเพิ่มความหนาของมวลหรือของแผ่นเวเฟอร์เริ่มต้นได้ แต่การใช้แผ่นเวเฟอร์ที่หนาขึ้นก็ต้องการเวลาในการกัดมากขึ้น ซึ่งหมายถึงต้องการพื้นที่ในการชดเชยมุมมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการระเหยโลหะ(เช่นทองคำ)เข้าที่มวลเพื่อตรวจสอบจึงนับว่าเป็นวิธีที่น่าสนใจในการเพิ่มความไวให้กับตัวตรวจจับโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของชิพ

สิ่งที่เป็นไปได้คือการเปลี่ยนแปลงความยาวของคาน L และระยะ c_i ซึ่งความยาว $L + 2c_1$ จะเป็นตัวแปรที่กำหนดความยาวโดยรวมของแพ็คเกจ จากสมการที่ (4.3) นั้นเขียนความสัมพันธ์ในรูปของ $f = c_i / L$ ซึ่งสามารถศึกษาความสัมพันธ์ได้ทั้งสองกรณีคือ (1) กำหนดมวล M ไว้คงที่ค่าหนึ่งแต่เปลี่ยนแปลงค่า L เพียงอย่างเดียว และ (2) เปลี่ยนแปลงค่า c_i และ L ไปแต่คงค่า f ไว้ ซึ่งกรณีหลังจะทำให้ L , c_i และ $L + 2c_1$ (รวมถึง M) มีการเปลี่ยนแปลงโดยตัวคูณเดียวกัน รูปที่ 4.6 (ก) กำหนดให้ M คงที่ ส่วนในรูปที่ 4.6(ข) ให้ f คงที่ และเปลี่ยนแปลง c_i (หรือขนาดของมวล M) ตาม L ในรูปที่ 4.6(ข) จะพบว่ากรณีที่มวล M คงที่จะมีข้อดีที่ต่อเมื่อออกแบบให้คานสั้น ความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไวกจะเพิ่มตามความยาวอย่างช้าๆ ในขณะที่ตอบสนองความถี่ธรรมชาติลดลงอย่างรวดเร็ว และคานจะเหลื่อมมากขึ้น

แม้ว่าการเพิ่มความยาวตามวิธีกำหนดมวล M คงที่ จะทำให้ระยะเหลื่อมเพิ่มมากขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าการสร้างคานให้บางลงมากๆ (ประมาณ 5 ไมครอน) การที่คานที่บางมากๆ แม้ว่าจะเปราะบางกว่าคานที่ยาว แต่คานที่ยาวนั้นหมายถึงการเพิ่มขนาดของชิพโดยไม่จำเป็น ดังนั้นการยอมที่จะทำให้คานบางจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจมากกว่าการเพิ่มความยาว

ในกรณีที่ 2 จะกำหนดให้ f คงที่ แต่จะเปลี่ยนขนาดของ L และ c ตามกัน ถ้าคานสั้นๆ มวลจะมีค่าน้อยๆ แต่ถ้าคานยาวมากมวล M จะมีค่ามาก ค่าความไวและระยะเหลื่อมจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วกว่ากรณีที่ 1 มาก แต่ความถี่ธรรมชาติจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงไม่ต่างจากกรณีที่ 1 มากนัก



รูปที่ 4.6 y_M , S และ f_n ที่แปรตามความยาวคาน (ก) M คงที่ (ข) M และ f คงที่ [6] ขนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

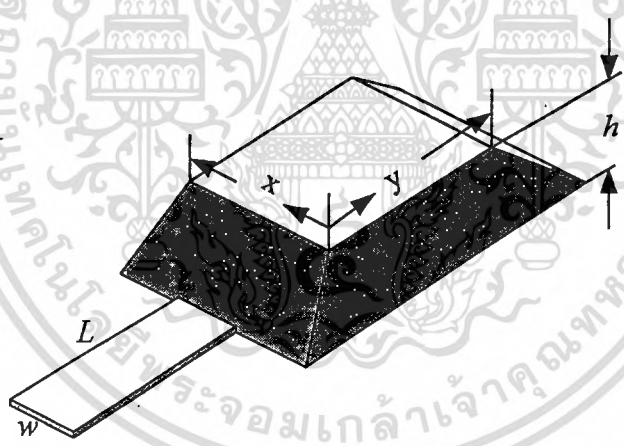
การออกแบบเพิ่มหรือลดขนาดของตัวแปรต่าง ๆ นั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของคานต่อ ระยะเห ความถี่ธรรมชาติ ความไว[6]

		ความหนา h	ความกว้าง w	ความยาว L		มวล M
ระยะเห	y_M	$\propto 1/h^3$	$\propto 1/w$	$\propto L^{3*}$	$\propto L^{4**}$	$\propto M$
ความถี่ธรรมชาติ	f_n	$\propto h^{3/2}$	$\propto w^{1/2}$	$\propto 1/L^{3/2*}$	$\propto 1/L^{2**}$	$\propto 1/M^{1/2}$
ความไว	S	$\propto 1/h^3$	$\propto 1/w$	$\propto L^*$	$\propto L^{2**}$	$\propto M$

หมายเหตุ *กรณี M คงที่ **กรณี f คงที่ ให้ M แปรตาม L

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้มีมวลซิลิกอนคงที่เท่ากับ 1.06 มิลลิกรัม และมีขนาด(ดังรูปที่ 4.7) $x = 480$ $y = 600$ และ $h = 400$ ไมครอน และออกแบบคานให้มีขนาด $w \times L$ ต่างๆ 16 แบบดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.7 การออกแบบมวลและคานของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

ตารางที่ 4.2 ขนาดของคาน ($w \times L =$ ไมครอน $\times$ ไมครอน)

	A	B	C	D
1	200×200	280×200	320×200	400×200
2	200×300	280×300	320×300	400×300
3	200×340	280×340	320×340	400×340
4	200×440	280×440	320×440	400×440

4.2 การจำลองแบบการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก

ในอุตสาหกรรมแขนงต่างๆในยุคปัจจุบันได้อาศัยวิธีการจำลองแบบ (Simulation) ก่อนการผลิตจริงทั้งนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และเพื่อลดความสิ้นเปลืองในการสร้างหุ่นจำลองหรือทำการสร้างโดยตรง ในหัวข้อนี้จะออกแบบมาสก์เฉพาะส่วนด้านหลังของอุปกรณ์ ซึ่งต้องคำนึงความเป็นไปได้ของการกัดให้เกิดเป็นลักษณะของมวลอย่างถูกต้อง(หรือใกล้เคียง) กับที่ออกแบบไว้ก่อนหน้า โปรแกรมที่ใช้ชื่อ SEG: Online Etch Simulator ซึ่งพัฒนาโดย Caltech เขียนด้วยภาษาจาวา (JAVA) โปรแกรมนี้เขียนเพื่อบริการนักศึกษามหาวิทยาลัยทั่วโลกทางอินเทอร์เน็ตทางเว็บไซต์ <http://mira.me.tuns.ca/segs/Welcome.html> ซึ่งโปรแกรมแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ

- 1)ส่วนป้อนข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่
 - (ก)ระนาบของแผ่นผลึก ซึ่งได้แก่แผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) (110) และ (111)
 - (ข)ชนิดของสารละลาย ซึ่งโปรแกรมได้จัดเตรียมฐานข้อมูลอัตราการกัดในทิศทางต่างๆของซิลิกอนสำหรับสารละลายไว้สี่ชนิดคือ สารละลายที่เป็นไอโซโทรปิก สารละลาย EPD สารละลาย KOH และ สารละลาย Tetra Methyl Ammonium Hydroxide(TMAH) ซึ่งโปรแกรมมีความยืดหยุ่นสามารถยอมรับให้ป้อนข้อมูลอัตราการกัดในระนาบต่างๆตามฐานข้อมูล(จากการทดลอง)ของผู้ทำการทดสอบแต่ละคน หรือสามารถใช้ค่าที่เป็นฐานข้อมูลของ CALTECH ได้จัดเตรียมไว้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 อัตราการกัดซิลิกอน(ไมครอนต่อชั่วโมง)ในทิศทางต่างๆสำหรับสารละลายกัดตามฐานข้อมูลของ Caltech.

ระนาบ	ไอโซโทรปิก	EPD	KOH	TMAH
(111)	50	1	1	1
(110)	50	100	30	56
(100)	50	90	80	24
(311)	48	50	110	55

ในการจำลองแบบในหัวข้อนี้ใช้ฐานข้อมูลดังกล่าวเพื่อทดสอบการกัดด้วย KOH และ EPD ทั้งหมด

2. ส่วนวาดมาสก์ (Mask drawing)

เมื่อป้อนข้อมูลเกี่ยวกับการกัดแล้วจะเข้าสู่ส่วนออกแบบมาสก์ ซึ่งโปรแกรมอนุญาตให้ออกแบบมาสก์ได้เฉพาะในพื้นที่ 420 × 800 ไมครอน² และสามารถออกแบบเพื่อดูผลการกัดทั้งที่เป็นหลุม (hole) และเป็นเกาะ (peg) แนวตั้งฉากของรูปภาพคือทิศทาง <110> บนระนาบ (100)

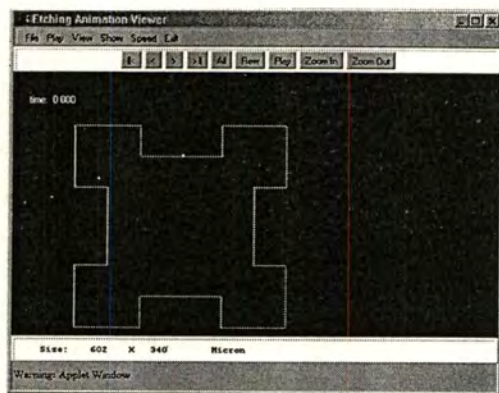
3. ส่วนแสดงผลการก๊ัด (view simulation animation)

เมื่อส่งข้อมูลมาส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์ เซิร์ฟเวอร์จะทำการคำนวณและส่งผลออกมาเป็นรูปภาพในลักษณะเฟรม แต่ละเฟรมก็คือผลการก๊ัดตามช่วงเวลาที่กำหนด (เช่น 6 นาทีต่อ 1 เฟรม) และสามารถกำหนดเวลาที่สิ้นสุดของการก๊ัดตามที่ต้องการได้ สามารถแสดงผลทุกเฟรมอย่างต่อเนื่องกันด้วยอัตราการแสดงภาพต่างๆ ได้ หรือสามารถแสดงผลรวมทุกเฟรมได้เช่นกัน โปรแกรมนี้ไม่ได้แสดงผลการก๊ัดเป็นสามมิติ ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือรูปร่างของมวลส่วนที่อยู่ใต้หน้ากากออกไซด์ซึ่งถูกเซาะมุมออกไป

สำหรับการจำลองแบบต่อไปนี้จะให้ 1 เฟรมเท่ากับ 6 นาที ในรูปที่ 4.8 เป็นมาสก์สำหรับการชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ออกแบบไว้ ส่วนในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ทั้งหมดเป็นผลการจำลองแบบการก๊ัดด้วย EPD และ KOH ตามลำดับ ในรูปที่ 4.13 เป็นมาสก์สำหรับการชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา ส่วนรูปที่ 4.11 และ 4.12 ทั้งหมดเป็นการจำลองแบบผลการก๊ัดด้วย EPD และ KOH ตามลำดับ ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นผลรวมการก๊ัดแพทเทิร์นที่ชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยมเมื่อก๊ัดด้วย EPD และ KOH ตามลำดับ โดยมาสก์กำหนดให้มีความเหมาะสมกับโปรแกรม คือมีขนาด 180×180 ไมครอน²



รูปที่ 4.8 มาสก์ที่ออกแบบเพื่อทดสอบการชดเชยมุม (1 ช่องตารางเท่ากับ 20 ไมครอน)



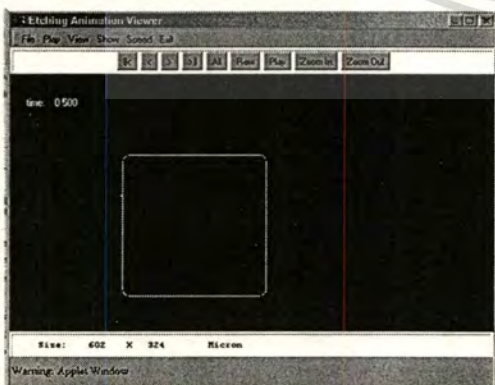
4.9 (ก) เวลา 0.00 ชั่วโมง



4.9 (ข) เวลา 0.200 ชั่วโมง

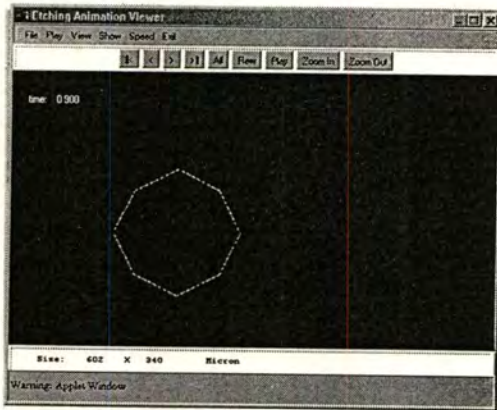


4.9 (ค) เวลา 0.400 ชั่วโมง

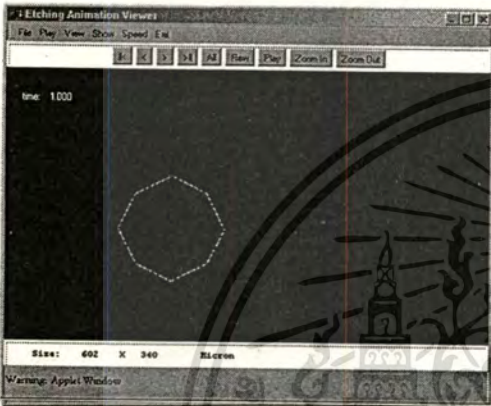


4.9 (ง) เวลา 0.600 ชั่วโมง

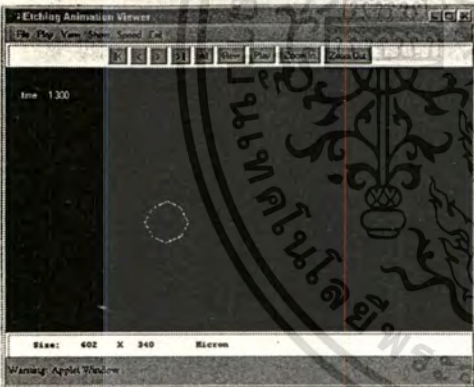
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



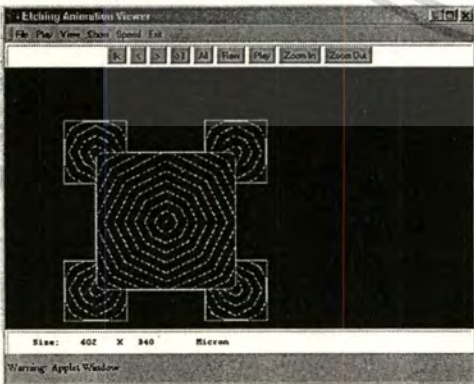
4.9 (จ) เวลา 0.900 ชั่วโมง



4.9 (ค) เวลา 1.000 ชั่วโมง



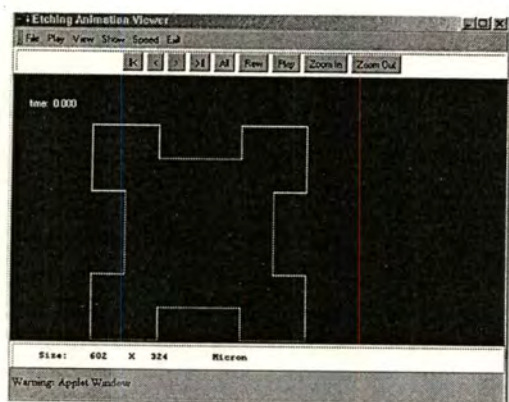
4.9 (ช) เวลา 1.300 ชั่วโมง



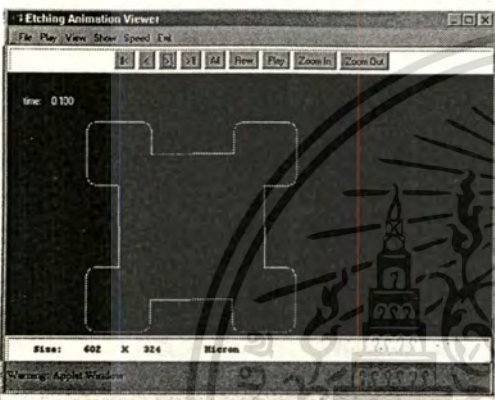
4.9 (ซ) ผลรวม (แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง)

รูปที่ 4.9 ผลการจำลองแบบการกัดส่วนมวลซิลิกอนที่มีการชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อกัดด้วย

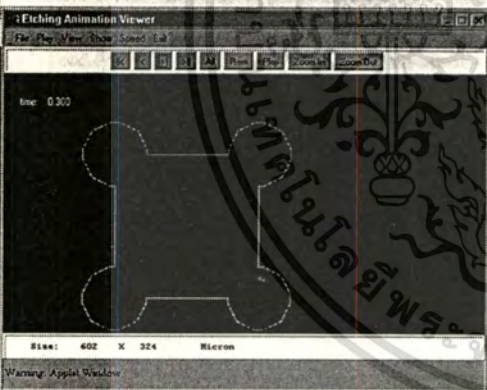
EPD เป็นเวลารวม 1.500 ชั่วโมง จะพบว่าเหลือส่วนมวลอยู่น้อยมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งในวัสดุเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่แนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



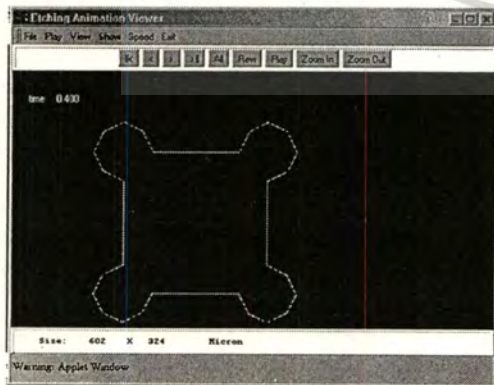
4.10 (ก) เวลา 0.000 ชั่วโมง



4.10 (ข) เวลา 0.100 ชั่วโมง

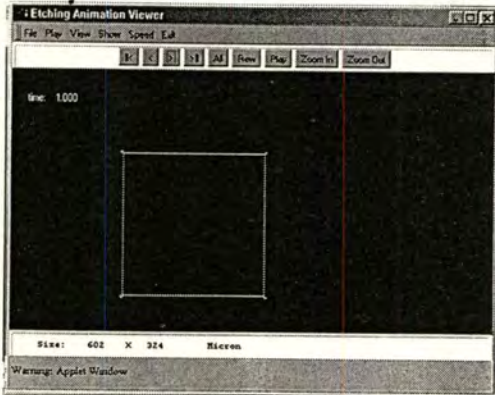


4.10 (ค) เวลา 0.300 ชั่วโมง

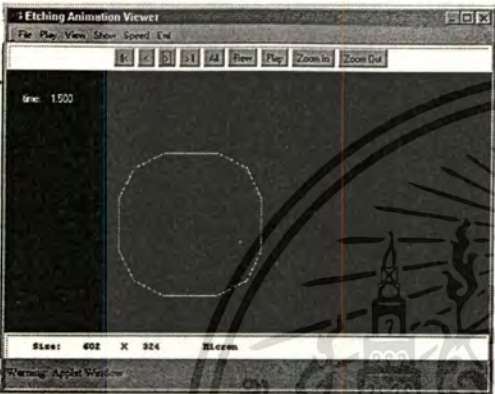


4.10 (ง) เวลา 0.400 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.10 (จ) เวลา 1.000 ชั่วโมง



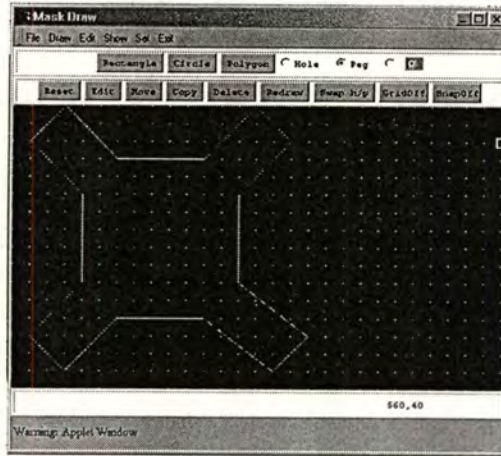
4.10 (ค) เวลา 1.500 ชั่วโมง



4.10 (ข) รวมผลการกัดจนถึงเวลา 2.000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.10 ผลการจำลองแบบการกัดส่วนมวลซิลิกอนที่มีการชดเชยมุมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อกัดด้วย KOH เป็นเวลารวม 2.000 ชั่วโมง

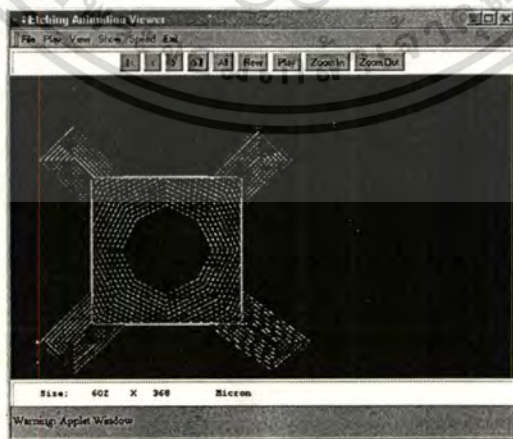
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 มาสก์สำหรับมอดเซกแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา

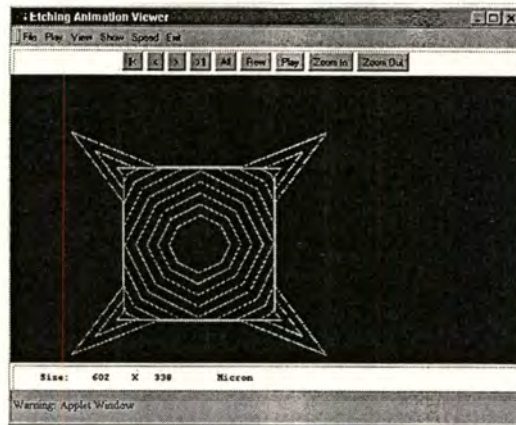


รูปที่ 4.12 ผลรวมการจำลองแบบสำหรับมาสก์เซกเซมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศาเมื่อกัดด้วย EPD จนถึง 1.500 ชั่วโมง (แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง) จะพบว่าส่วนที่เป็นมวลได้หายไป

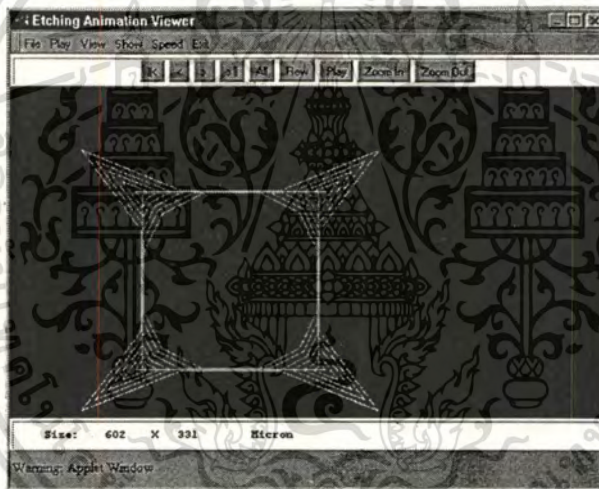


รูปที่ 4.13 ผลรวมการจำลองแบบสำหรับมาสก์เซกเซมแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศาเมื่อกัดด้วย KOH จนถึงเวลา 1.500 ชั่วโมง (แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง) จะพบว่ายังเหลือส่วนมวลอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ผลรวมการจำลองแบบสำหรับมาสก์ชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยมเมื่อกัดด้วย EPD จนถึงเวลา 1.500 ชั่วโมง (เส้นนอกสุดคือมาสก์ แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง) จะพบว่าเหลือส่วนมวลอยู่น้อยมาก



รูปที่ 4.15 ผลรวมการจำลองแบบสำหรับมาสก์ชดเชยมุมแบบสามเหลี่ยมเมื่อกัดด้วย KOH จนถึงเวลา 1.500 ชั่วโมง (เส้นนอกสุดคือมาสก์ แต่ละเส้นห่างกัน 0.1 ชั่วโมง) จะพบว่าเหลือส่วนมวลอยู่เป็นจำนวนมาก

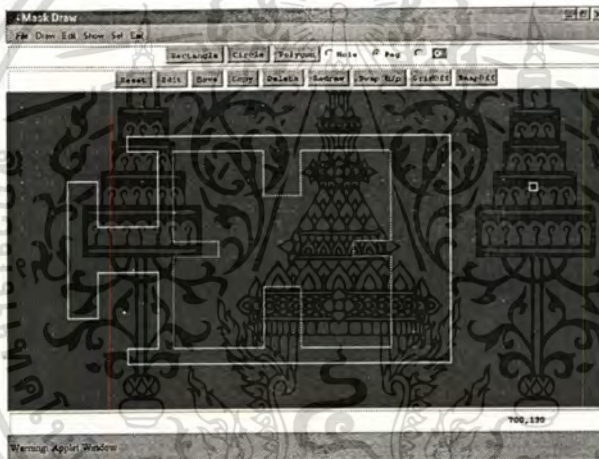
จากผลการจำลองแบบทั้งหมด (ซึ่งบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.8 ถึง 4.15) ได้ข้อสรุปดังนี้

- ด้วยขนาดของมาสก์เท่ากับ 180×180 ไมครอน² มุมชดเชยที่เหมาะสมจากมากไปน้อยคือ มุมชดเชยแบบสามเหลี่ยม > มุมชดเชยแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส > มุมชดเชยแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา
- สารละลาย EPD ทำให้เกิดการเซาะมุมมากกว่า KOH เนื่องจากมีอัตราการกัดระนาบรอง (311) สูงกว่า KOH

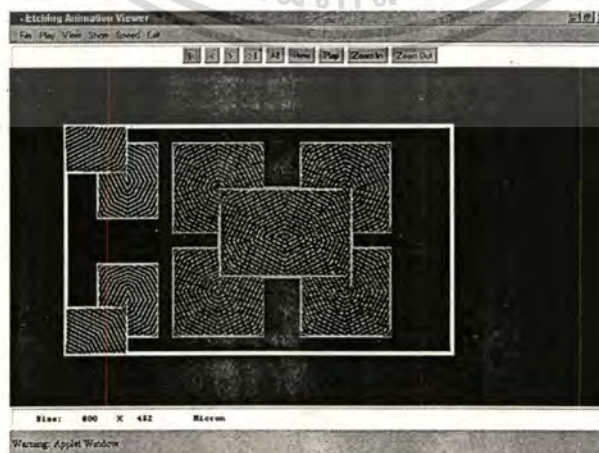
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มุมขดเซยทั้งสามแบบไม่สามารถเพิ่มขนาดได้ตามที่ต้องการเนื่องจากเมื่อขยายขอบจากด้านหนึ่งจะจำกัดเมื่อชิดติดกับขอบอีกด้านหนึ่งที่ขยายออกมา โดยเรียงลำดับข้อจำกัดจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดคือ มุมขดเซยแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา > มุมขดเซยแบบสามเหลี่ยม > มุมขดเซยแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส
- มุมขดเซยแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา มีข้อจำกัดมากที่สุดเนื่องจาก ถ้าต้องการกัดลึกถึง x ไมครอน ความยาวของยอดหัวมุมขดเซยควรจะมากกว่าหรือเท่ากับ x ซึ่งไม่สามารถขดเซยให้กับมวลที่มีขนาดเล็กๆ (เช่น 180×180 ไมครอน²) ได้

ในรูปที่ 4.16 เป็นแพทเทิร์นมาสก์สำหรับกำหนดบริเวณโคอะเฟรมและส่วนมวลของตัวตรวจจับอัตราเร่ง และจะแสดงผลการจำลองแบบการกัดด้วย KOH โดยใช้เงื่อนไขดังที่กล่าวในขั้นตอนดังรูปที่ 4.17 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.16 แพทเทิร์นมาสก์สำหรับกำหนดบริเวณโคอะเฟรมและส่วนมวลของตัวตรวจจับอัตราเร่ง (ส่วนนอกสุดเป็นบริเวณโคอะเฟรม ส่วนที่อยู่ข้างในเป็นมวลที่มีการขดเซย)



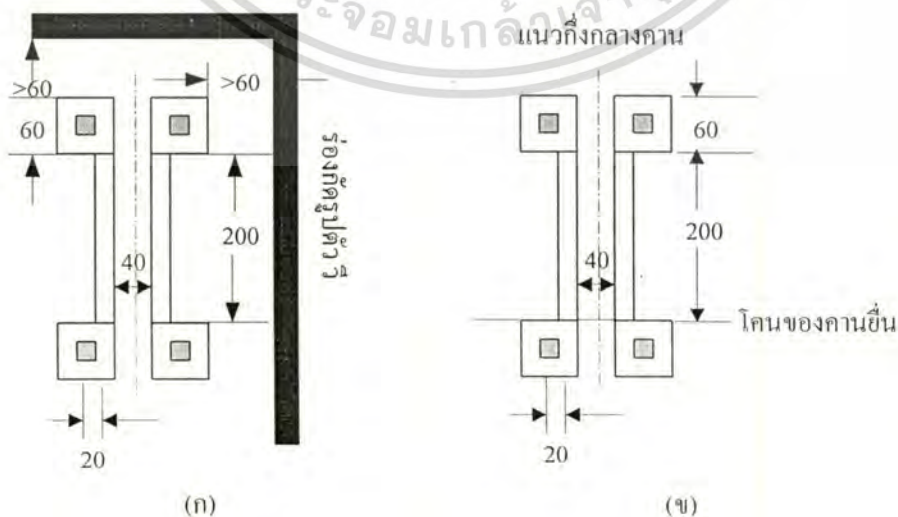
รูปที่ 4.17 ผลรวมจำลองแบบการกัดแพทเทิร์นในรูปที่ 4.15 ด้วย KOH จาก 0.000 จนถึงเวลา 2.000

ข้อควรระวัง: ข้อควรระวังในการใช้โปรแกรมนี้คือ โปรแกรมนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.17 พบว่าไม่สามารถหดรัดส่วนมวลได้สำหรับการกัดด้วย KOH เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม SEG นี้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่จะสร้างจริงเนื่องจากขอบเขตอันจำกัดของตัวโปรแกรมเอง จึงไม่สามารถจำลองการกัดอุปกรณ์ให้ลึกเกินกว่า 200 ไมครอนได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างจริงยังสามารถออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบในโปรแกรมนี้ได้ถึง 4 เท่าโดยขยายตามมาตราส่วน หลังจากออกแบบมูมหดเซสแล้วก็ได้ออกแบบมาสก์สำหรับการสร้างโดยสมบูรณ์ ดังจะได้เสนอในอันดับต่อไป

4.3 การออกแบบตัวต้านทาน

ตัวต้านทานสำหรับอุปกรณ์ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กนั้นมี 2 ชุด คือ ชุดตัวต้านทานเพียโซซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบความเค้นบนคาน และชุดความต้านทานหดรัดความต้านทาน ซึ่งทั้งสองชุดเป็นตัวต้านทานที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการเนื่องจากสร้างพร้อมกันและด้วยวิธีเดียวกันและต่อความต้านทานทั้งสองชุดแบบอนุกรม ในรายงานฉบับนี้กำหนดให้ตัวต้านทานแต่ละตัวมีความยาว 200 ไมครอน กว้าง 20 ไมครอนมีความต้านทานประมาณ 1 กิโลโอห์ม วางอยู่ห่างกันอย่างสมมาตร 40 ไมครอน ส่วนที่เชื่อมต่อกับ bonding pad มีขนาด 60×60 ไมครอน² ส่วนวินโดวสก็คอนแทกเป็นความต้านทานชนิด p^+ มีสภาพต้านทานประมาณ 12 โอห์ม เซ็นติเมตรมีขนาด 20×20 ไมครอน² กำหนดวางตัวต้านทานหดรัดความต้านทานจะให้อยู่ห่างจากรอยกัดอย่างน้อย 60 ไมครอน ซึ่งสามารถวางไว้ ณ ตำแหน่งใดๆ ซึ่งไม่เคลื่อนไหวง่าย และต้องวางไปในแนวเดียวกับตัวต้านทานเพียโซ ดังรูปที่ 4.18 (ก) ส่วนแนวตั้งกลางของตัวต้านทานเพียโซทับกับแนวตั้งกลางคาน โดยเริ่มส่วนที่เป็นตัวต้านทานตรงกับโคนของคานขึ้น ดังรูปที่ 4.18(ข)



รูปที่ 4.18 การออกแบบตัวต้านทาน (ก) ตัวต้านทานหดรัดความต้านทาน (ข) ตัวต้านทานเพียโซ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 มาสก์และลำดับการสร้าง

กระจกมาสก์ต้นแบบจะกำหนดตามขั้นตอนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งบนซิลิกอนซึ่งมีมาสก์สำหรับขั้นตอนโดยรวม 7 มาสก์ดังต่อไปนี้

มาสก์ที่ 1 เจาะช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึก เพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องกัดด้วยสารละลาย KOH จนทะลุแผ่นเพื่อใช้เป็น Back-to-front aligner

มาสก์ที่ 2 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดจุดแพร่สารเจือเพื่อสร้างตัวต้านทานเพียโซ

มาสก์ที่ 3 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึก เพื่อแยกคานออกจากโคอะแฟรม (beam definition) โดยการกัด

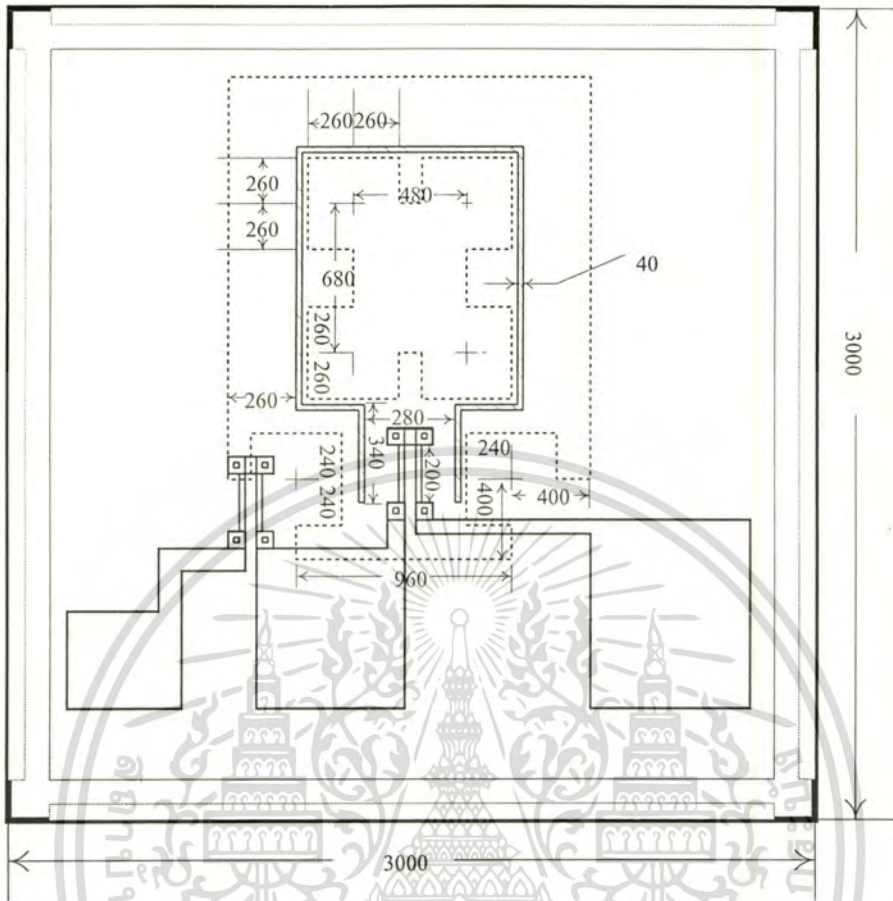
มาสก์ที่ 4 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดบริเวณแพร่สารเจือชนิด p^{++}

มาสก์ที่ 5 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดบริเวณเปิดวินโดคอนแท็ก

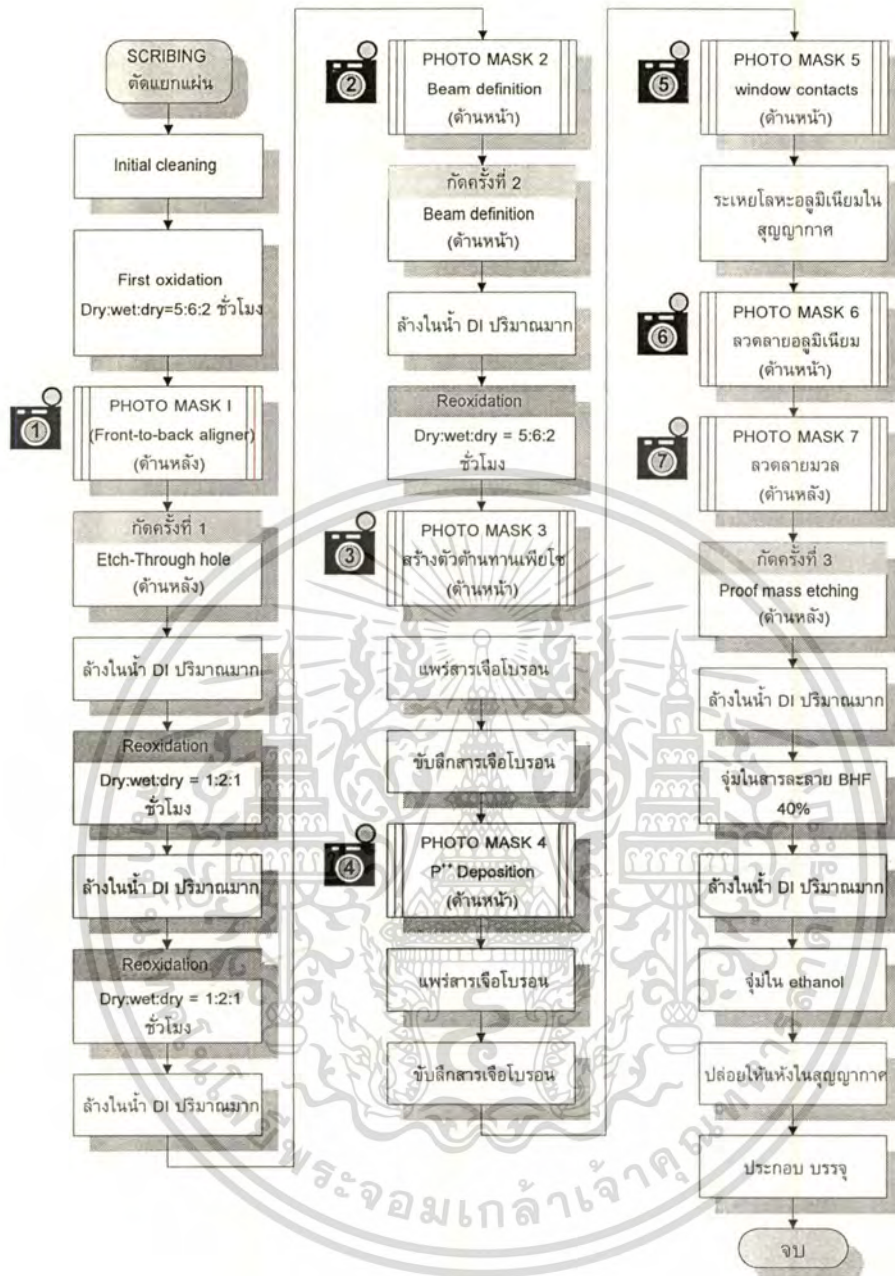
มาสก์ที่ 6 เจาะช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดบริเวณกัดมวลของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

มาสก์ที่ 7 แพทเทิร์นสำหรับลวดลายขั้วอลูมิเนียม

ในรูปที่ 4.19 เป็นตัวอย่างมาสก์สำหรับอุปกรณ์หมายเลข B3 ที่มีขนาดของคาน 280×340 ไมครอน² ซึ่งเป็นอุปกรณ์เดี่ยวเท่านั้น แต่เนื่องจากการสร้างต้องมีแพทเทิร์นรากฏทั้งด้านหน้าและด้านหลังของอุปกรณ์ที่ตรงกันด้วย ดังนั้นจึงต้องมีมาสก์ที่สำคัญอีก 1 มาสก์คือมาสก์สำหรับเจาะรูจากด้านหลังทะลุมาด้านหน้าด้วยสารละลายแอนไอโซโทรปิกซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Back-to-front aligner โดยกำหนดให้รูที่ทะลุมาด้านหน้ามีขนาด 1×1 มิลลิเมตร มาสก์ดังกล่าวจะเป็นมาสก์ที่ 1 สำหรับการสร้าง จะวางตำแหน่ง Through hole อย่างสมมาตรกับอุปกรณ์ทั้ง 16 ตัว ในที่นี้มิได้แสดงไว้ แต่จะแสดงลำดับการสร้างตามมาสก์ต่างๆในหัวข้อการสร้างต่อไป ส่วนลำดับการสร้างจะแสดงดังรูปที่ 4.20

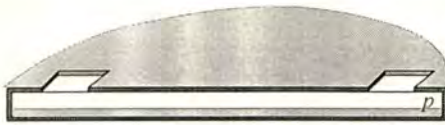


รูปที่ 4.19 แม่สักรูปหมายเลข B3 ของตัวตรวจจับอัตราเร่ง เส้นที่บ่งชี้หมายถึงแพทเทิร์นด้านหน้า และเส้นประหมายถึงแพทเทิร์นด้านหลังของอุปกรณ์ (ขนาดเป็นไมครอน)



รูปที่ 4.20 ลำดับขั้นตอนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่ง

ในรูปที่ 4.21(ก) ถึง 4.21(ข) เป็นลำดับของมาสก์และโครงสร้างการสร้างอุปกรณ์ในแต่ละขั้นตอน ซึ่งจะเสนอรายละเอียดกระบวนการสร้างโดยละเอียดในลำดับต่อไป

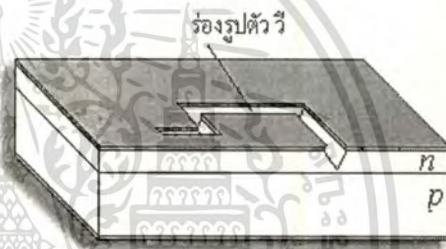


(เปิดแพทเทิร์น)

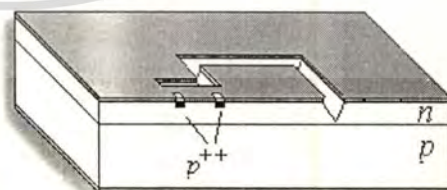
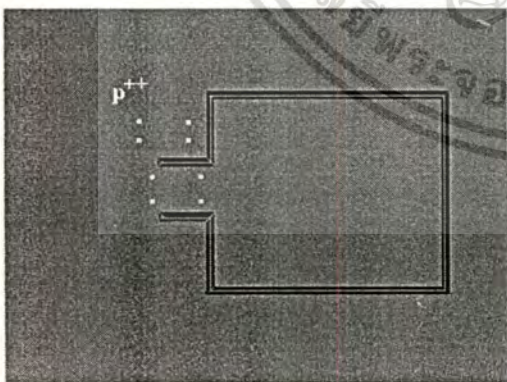


(กัด Through hole aligner จนทะลุแผ่นด้วย EPD)

4.21(ก) มาสก์ที่ 1 เจาะช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึก เพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องกัดด้วยสารละลาย EPD จนทะลุแผ่นเพื่อใช้เป็น Back-to-front aligner

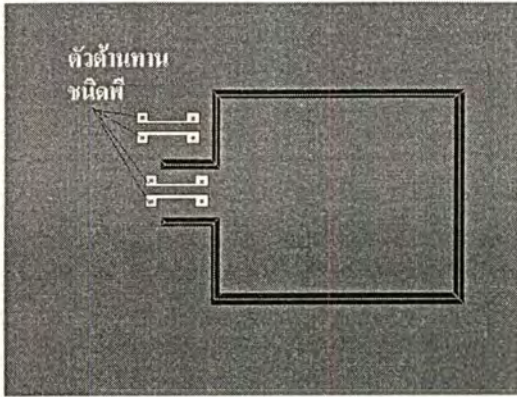


4.21(ข) มาสก์ที่ 2 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดจุดแพร่สารเจือเพื่อสร้างตัวต้านทานเพียโซ

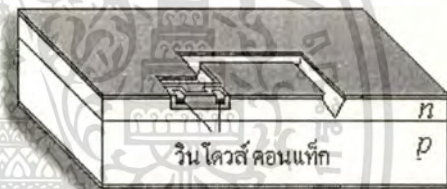
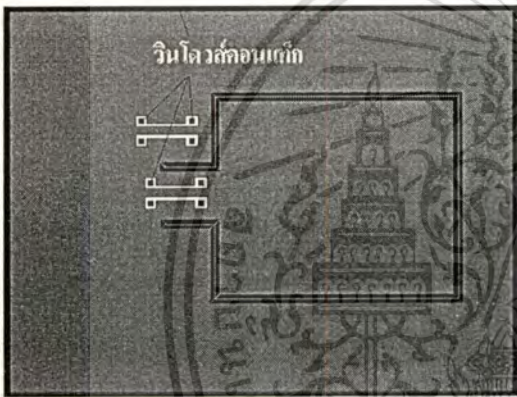


4.21 (ค) มาสก์ที่ 3 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึก เพื่อแยกคานออกจากไดอะแฟรมโดยการกัดด้วยสารละลาย KOH

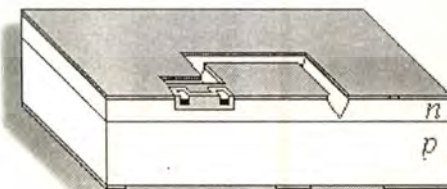
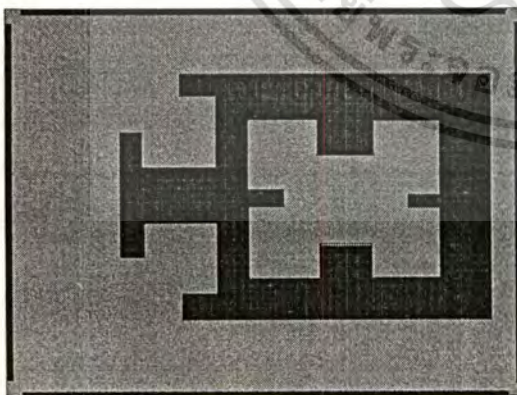
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.21(ง) มาสก์ที่ 4 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดบริเวณแพร่สารเจือชนิด p^{++}

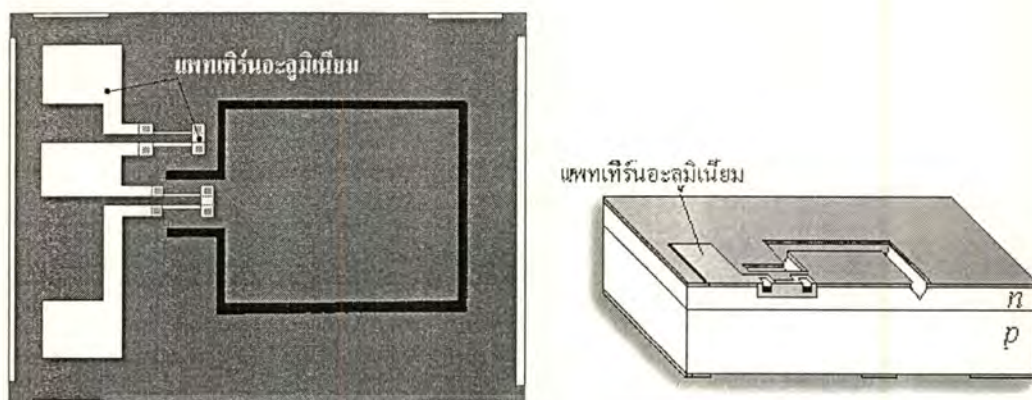


4.21(จ) มาสก์ที่ 5 เจาะช่องออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกเพื่อกำหนดบริเวณเปิดวินโดว์สไลต์

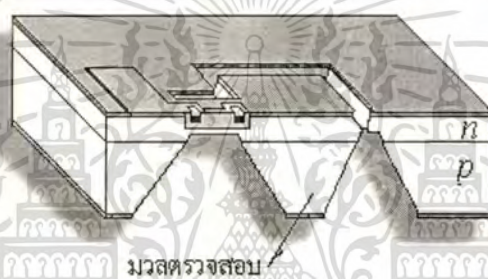


4.21(ฉ) มาสก์ที่ 6 เจาะช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึกเพื่อกัดมวลตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.21(ข) มาสก์ที่ 7 แพทเทิร์นสำหรับลวดลายข้อลูมิเนียม



4.21(ข) กัดในสารละลายด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี และกัดด้วยพลาสติกหลุมด้านหน้าและด้านหลัง
บรรจบกัน

รูปที่ 4.21 ไดอะแกรมแสดงลำดับการสร้างและภาคตัดขวางสำหรับมาสก์ทั้ง 7 ลำดับ (หมายเหตุ
ให้รอยตัดผ่านกลางคานและมีแสดงตัวด้านทานชดเชยอนุหภูมิในภาคตัดขวาง และยื่น)

ลำดับการสร้าง

1. แผ่นผลึกเริ่มต้น

เลือกแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ชนิดอีพีแทกเชิลชนิดเอ็นบนฐานรองชนิดพี มีสภาพด้าน
ทานเริ่มต้นเท่ากับ 5-14 โอห์ม.เซ็นติเมตร ความหนา 400 ไมครอน เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 เซนติ
เมตร

2. ทำความสะอาดแผ่นผลึกเริ่มต้น มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เช็ดด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยการสั่นที่ความถี่สูง
- ต้มในกรดไนตริก 5 นาที
- ล้างกรดไนตริกด้วยน้ำบริสุทธิ์จำนวนมาก
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์สองครั้ง ครั้งละ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ดมในไตรคลอโรเอธิลีนสองครั้ง ครั้งละ 5 นาที
- ล้างคราบไตรคลอโรเอธิลีนด้วยการสับซูปเปอร์โซนิคด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การบวนการสร้างหลังจากทำความสะอาดแผ่นผลึก

(1) กระบวนการออกซิเดชัน เพื่อสร้างหน้ากากป้องกันการกัด ต้องการความหนาออกไซด์มากกว่า 1.5 ไมครอน ได้ทำการสร้างด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ 1150 °C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนแห้งซึ่งไหลด้วยอัตรา 1200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ต่อเนื่องด้วยออกซิเดชันแบบชื้นภายใต้อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนและไอน้ำซึ่งไหลด้วยอัตรา 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และแบบแห้งภายใต้สถานะแบบแห้ง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(2) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 1 (ด้านหลัง)

กระบวนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งจะต้องมีการซ้อนทับแบบทั้งสองด้านของแผ่นเวเฟอร์ ในขั้นแรกนั้นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 1 จะเปิดช่องออกไซด์เพื่อกำหนดบริเวณที่กัดแผ่นผลึกซิลิกอนจากด้านหลังสู่ด้านหน้าเพื่อเป็นจุดอ้างอิงสำหรับการซ้อนทับแพทเทิร์นบนด้านหน้าต่อไป กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. อบแผ่นเวเฟอร์ครั้งแรก ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เพื่อขับไล่ความชื้นบนแผ่นผลึก
2. เคลือบฟิล์มของน้ำยาไวแสง Waycoat ด้วยเครื่อง spinner ด้วยความเร็ว 4000 รอบต่อนาที
3. อบฟิล์มน้ำยาไวแสง ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
4. ซ้อนทับแบบและฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อถ่ายแบบด้วยเครื่อง mask aligner
5. ล้างภาพด้วยการจุ่มแผ่นผลึกใน โซลิน 2 ครั้ง ครั้งละ 90 วินาที ติดตามด้วยการล้างในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 3 ครั้ง ครั้งละ 30 วินาที
6. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
7. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
8. อบฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
9. ทาด้านหน้าของแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสง waycoat
10. อบฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
11. กัดออกไซด์ด้วยสารละลาย Buffer HF
12. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์จำนวนมาก
13. เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน

14. ต้มในกรดซัลฟูริกสองครั้ง ครั้งละ 5 นาที

15. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิปกติ

16. ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที

17. เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน

(3) ทำความสะอาดแผ่นผลึก

- ต้มในไฮดรอกไซด์โซลูชัน สองครั้ง ครั้งละ 5 นาที

- ล้างด้วยอะซิโตนโดยการสั่นด้วยอัลตราโซนิก เป็นเวลา 3 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- กัด ด้วยสารละลาย HF5%

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

(4) กัดครั้งที่ 1

เตรียมสารละลาย KOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส กวนสารละลายตลอดเวลาด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเพื่อกระจายความร้อนของสารละลายให้เท่ากัน ควบคุมความเข้มข้นด้วยการเพิ่มเติมหลอดควบแน่นย้อนกลับ (condenser tube) ตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้คงที่ประมาณ 60 นาที แล้วจึงนำชิ้นงานลงกัดจนทะลุแผ่นผลึก สังเกตการทะลุด้วยการมอง

(5) ทำความสะอาดหลังกัด

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก

- กัดออกไซด์ผิวหน้าบางส่วนด้วยสารละลาย Buffer HF เป็นเวลา 30 วินาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก

- ต้มในน้ำบริสุทธิ์

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

(6) ทำความสะอาดแผ่นผลึกตามวิธีในข้อ (3)

(7) กระบวนการออกซิเดชัน เพื่อชดเชยออกไซด์ที่ถูกกัดไปก่อนหน้านี้ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง แบบขึ้น และแบบแห้งตามเงื่อนไขข้อ (1)

(8) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 2 (ด้านหน้า)

ขั้นตอนนี้ ใช้ mask aligner ที่ได้จากการกัดเป็นจุดอ้างอิงสำหรับกระจกมาสก์ที่ 2 เพื่อกำหนดบริเวณปลดปล่อยคานจากไดอะแฟรม ลำดับขั้นตอนเป็นเช่นเดียวกับข้อ (2)

(9) ทำความสะอาด ขั้นตอนเหมือนข้อ (3)

(10) กัดครั้งที่ 2 ใช้สารละลายจากขั้นตอน (4) เป็นเวลา 15 นาที หรือสังเกตว่าเกิดร่องรูปตัว V จึง

หยุดการกัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(11) ทำความสะอาดหลังการกัด เหมือนข้อ (5)

(12) ทำความสะอาดตามขั้นตอนที่ (3)

(13) กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส

- แพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 5 นาที
- กัดด้วยสารละลาย Buffered HF จนกว่าแก้วซีลีเกตจะหมดไป
- ล้างด้วยน้ำสะอาดปริมาณมาก
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

(14) ทำความสะอาดตามขั้นตอนที่ (3) โดยยกเว้นการกัดด้วยสารละลาย HF 5%

(15) การขัปลีกฟอสฟอรัส

ทำการขัปลีกฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศก๊าซออกซิเจนแบบแห้ง 30 นาที แบบชื้น 60 นาที และแบบแห้งอีก 30 นาทีต่อเนื่องกัน

(16) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 3 (ด้านหน้า)

เป็นการเปิดช่องออกไซด์เพื่อการแพร่สารเจือโบรอนความเข้มข้นสูง ลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับข้อ (2) ใช้กระจกมาสก์ที่ 3

(17) ทำความสะอาดหลังกระบวนการ เหมือนข้อ (3)

(18) กระบวนการแพร่สารเจือโบรอนความเข้มข้นสูง

- ทำการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 30 นาที
- กัดด้วยสารละลาย Buffered HF จนกว่าโบรอนเกล็ดจะหมดไป
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

(19) ทำความสะอาดตามขั้นตอนที่ (3) โดยยกเว้นการกัดด้วย HF 5%

(20) ทำการขัปลีกด้วยความร้อน ตามเงื่อนไขและวิธีการตามข้อ (15)

(21) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 4 (ด้านหน้า)

ใช้กระจกมาสก์ที่ 4 เพื่อเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือโบรอนสำหรับตัวต้านทานเพียโซ ขั้นตอนเหมือนข้อ (2)

(22) ทำความสะอาดหลังกระบวนการ เหมือนข้อ (3)

(23) กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน

- ทำการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 5 นาที
- กัดด้วยสารละลาย Buffered HF จนกว่าโบรอนเกล็ดจะหมดไป
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก

(24) ทำความสะอาดตามขั้นตอนที่ (3) โดยยกเว้นการกัดด้วย HF 5%

(25) ทำการขัปลึกด้วยความร้อน ตามเงื่อนไขและวิธีการตามข้อ (15)

(26) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 5 (ด้านหน้า)

แฉะ 5 เพื่อเปิดช่องออกไซด์ วินโดว์คอนแทก ขั้นตอนเหมือนข้อ (2)

(27) ทำความสะอาดหลังกระบวนการ เหมือนข้อ (3)

(28) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 6 (ด้านหลัง)

ใช้กระจกมาสก์ที่ 6 บริเวณด้านหลังโดยใช้ mask aligner ที่ได้จากการกัดในข้อ (4)เพื่อกำหนดบริเวณมวลปรับปรุง ขั้นตอนเหมือนข้อ (2)

(29) ทำความสะอาดหลังกระบวนการเหมือนข้อ (3)

(30) ระเหยโลหะในสุญญากาศ (Metallization)

(31) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 7 (ด้านหน้า)

ใช้กระจกมาสก์ที่ 7 เพื่อกำหนดลวดลายอะลูมิเนียมสำหรับการวัด ตรวจสอบ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เคลือบน้ำยาไวแสง AZ 1305 ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที
2. อบฟิล์มให้แห้งที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 15 นาที
3. ฉายแสงหลังจากที่ซ้อนทับแบบเป็นที่ถูกต้องแล้ว
4. ล้างภาพ ด้วยการจุ่มในสารละลาย AZ Developer 2 ครั้ง ครั้งละ 60 วินาที
5. ล้างน้ำบริสุทธิ์
6. อบฟิล์มให้แห้งที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 15 นาที
7. กัดชั้นอะลูมิเนียมด้วยกรดกัดอะลูมิเนียมซึ่งมีส่วนผสมกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก สังเกตจุดสิ้นสุดเมื่อแพทเทิร์นอะลูมิเนียมปรากฏชัดเจน
8. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปริมาณมาก
9. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
10. จุ่มในอะซิโตนเพื่อลอกชั้นน้ำยาไวแสง
11. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
12. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

(32) กระบวนการซินเตอร์

เพื่อให้โลหะอะลูมิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อซิลิกอนเกิดเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 450 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 12 นาที

(33) เคลือบฟิล์มน้ำยาไวแสง AZ1350 อีกครั้ง ทำการอบให้แห้งแล้วฉายแสง ทั้งนี้เพื่อป้องกันลวดลายอะลูมิเนียมบริเวณด้านหน้าจากสารละลาย KOH ในการกัดในขั้นตอนต่อไป

(34) การกัดส่วนมวล (ด้านหลัง) ใช้วิธีการกัดด้วยสารละลายแอนไอโซโทรปิกด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีจนกว่าจะเกิดการหยุดกัดที่รอยต่อ แต่เนื่องจากความลาดเอียงของผิวแผ่นเวเฟอร์เริ่มต้น ดังนั้นเมื่อสังเกตพบพฤติกรรมหยุดกัดที่รอยต่อให้ยุติการกัดแล้วทำความสะอาดด้วยจุ่มใน HF10% 10 วินาทีตามด้วยจุ่มน้ำ DI หลายครั้งจนมั่นใจว่าคราบสารละลายไม่เกาะติด ในขั้นตอนนี้ต้องใช้ความระมัดระวังอย่างสูงเนื่องจากโครงสร้างมีความบอบบางมาก ต่อจากนั้นจุ่มในเอธานอลประมาณ 1 นาทีแล้วระเหยให้แห้งในสุญญากาศ



บทที่ 5

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะได้นำเสนอผลการทดลองเป็น 3 หัวข้อคือ 1)การกักขังลิทอนด้วยสารเคมีต่างๆ ทั้งวิธีไม่ใช้และใช้ไฟฟ้าเคมี 2)การสร้างและปัญหาทางเทคนิคที่พบเพื่อนำสู่การสรุปวิธีและเทคนิคที่เหมาะสมในการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่ง และ 3)การวัดและเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าบางประการของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

5.1 การทดลองกักชิลิกอนด้วยสารเคมีต่างๆ

5.1.1 การกักแบบไม่ใช้ไฟฟ้าเคมี

หัวใจของการสร้างตัววัดอัตราเร่งบนซิลิกอนก็คือวิธีการไมโครแมชชีนซึ่งได้จากการกัดซิลิกอน โครงสร้างหลักคือไดอะแฟรมบางที่ถูกกัดให้เป็นรูปทรงของคานยื่น นอกจากนั้นยังมีวลซิลิกอนติดอยู่ที่ปลายคานซึ่งต้องควบคุมการกัดให้ได้รูปทรงที่ใกล้เคียงที่ได้ออกแบบหรือคำนวณไว้แล้ว ดังนั้นในบทนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการกัดด้วยเอชทีเอ็นไดอะมีน(E)ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(H₂O₂)และน้ำบริสุทธิ์(D) ผลการกัดด้วย KOH และไฮดราซีนที่เงื่อนไขต่างๆดังนี้

5.1.1.1 EPD

เอธิลีนไดอะมีนเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีคุณสมบัติเป็นค่า มีจุดเดือดประมาณ 120°C เมื่อทิ้งไว้ในอากาศเป็นเวลาพอสมควรจะเกิดการออกซิไดซ์กับอากาศและเริ่มมีสีคล้ำขึ้น โดยจะมีการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นถ้าแรงอุณหภูมิ ส่วนไพโรคลีคอลเป็นเกลือของแอมโมเนีย มีสีเทาวันนุหรี สามารถดูดความชื้นในอากาศได้ดี เมื่อผสมกับเอธิลีนไดอะมีนและน้ำบริสุทธิ์จะทำให้สารละลายเป็นสีน้ำตาลเข้ม ถ้าดับการผสมส่วนประกอบทั้งสามพบว่าไม่มีผลต่อคุณลักษณะใดๆของสารละลาย สารละลาย EPD ที่ได้จะมีสีเทาเข้มจนถึงสีน้ำตาลไหม้ถ้าเติมไพโรคลีคอลมากขึ้น การเตรียมสารละลายเป็นเวลานานขึ้นจะทำให้มีสีเข้มขึ้นเช่นกัน ทำการเตรียมสารละลาย EPD ในบีกเกอร์และให้ความร้อนโดยตั้งบีกเกอร์บน Hot plate ทำการกวนสารละลายตลอดเวลาด้วยแท่งแม่เหล็กกวน ทำการทดลองกักขังลิทอนอพิแทกเซียลชนิด n บนฐานรองซิลิกอนชนิด p หนา 100 ซึ่งมีสภาพต้านทานชั้นอพิแทกเซียลประมาณ $8-12$ โอห์ม-เซนติเมตรและมีสภาพต้านทานของฐานรองประมาณ 12 โอห์ม-เซนติเมตร ต่อจากนั้นสร้างแพทเทิร์นทดสอบเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด กว้าง 2 มิลลิเมตรและยาว 2 มิลลิเมตรด้วยวิธีโฟโตลิโธกราฟี ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกันชั้นออกไซด์ดังกล่าวสร้างจากกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง 3 ชั่วโมงตามด้วยแบบชื้นและแบบแห้ง 2 และ 1 ชั่วโมงตามลำดับ จำนวนความหนาออกไซด์ได้ประมาณ $6,000$ อังสตรอมซึ่งสามารถ

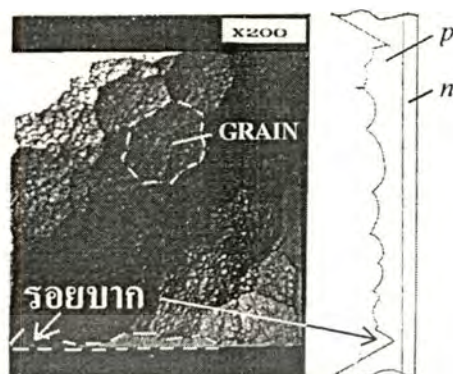
ทนต่อการกัดด้วย EPD ได้ประมาณ 3,000 นาที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส(ตารางที่ 3.1) ผิวฉนวนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนก่อนกัดได้ทำความสะอาดด้วยกรดไนตริกร้อน 5 นาที ล้างด้วยน้ำ DI เป่าผิวให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ล้างไขมันด้วยไตรคลอโรเอธิลีนและอะซิโตน ทำความสะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งจุ่มในสารละลาย HF 10% เป็นเวลา 15 วินาทีล้างด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้ง เตรียมสารละลาย EPD ที่สภาวะต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ระบบมีความเสถียร นอกจากนี้ได้ติดตั้งระบบกลั่นตัวกลับ (reflux system) เพื่อรักษาความเข้มข้นของสารละลายให้คงที่ตลอดการใช้งาน แล้วจึงทำการเริ่มกัดทำการสังเกตผลที่พารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

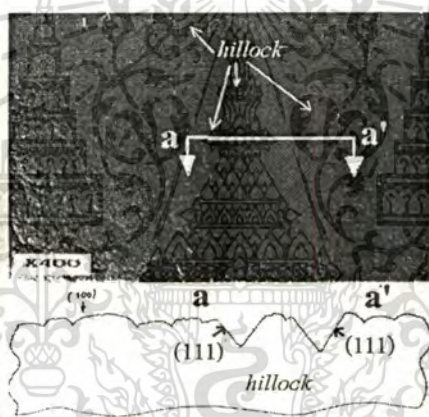
5.1.1.1.1 ผลของความเข้มข้นของ EPD

เนื่องจากอัตราส่วน E 50 ml.: P 8 กรัม: DI 16 ml. เป็นที่นิยมที่สุดในบทความอ้างอิงทั่วไป [5] จึงได้ทำการทดลองที่ส่วนผสมใกล้เคียง ทำการกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที สังเกตชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 1 และ 2 ชั่วโมง ผิวงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบผิวส้มดังรูปที่ 5.1 ลักษณะเป็นปุ่มของผิวส้มเรียกเม็ดเกรน (Grain) พบว่าเมื่อองอัตราส่วน E เท่ากับ 50 ml และ DI เท่ากับ 16 ml แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณไฮโดรคลอริกจาก 8 กรัมเป็น 12 และ 15 กรัมตามลำดับ พบว่าเกิดฟองอากาศหนาแน่นขึ้น ณ บริเวณที่ถูกกัด พื้นผิวจะขรุขระมากขึ้น (สังเกตจากขนาดของเกรนจะใหญ่ขึ้น) เมื่อวัดอัตราการกัดด้วยการวัดความลึกของหลุมที่ถูกกัดด้วยเครื่องวัดความหนาของแผ่นซิลิกอน พบว่าเมื่ออัตราการกัดเพิ่มขึ้นจากประมาณ 1.4 เป็น 1.6 และ 1.7 ไมครอนต่อชั่วโมงตามลำดับ แต่จะเกิดหลุมปริมาตรซึ่งเรียกว่า hillock ขึ้นบนไดอะแฟรมขึ้นมามีดังรูปที่ 5.2 จะพบพฤติกรรมเดียวกันนี้ถ้าทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนเอธิลีนไดอะมีนต่างกันไป ซึ่งแนวโน้มพบว่าถ้าอัตราส่วน E:P ต่ำกว่า 50:8 จะทำให้เกิด hillock มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรคลอริกเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญสำหรับปฏิกิริยาหลักซึ่งจะดึงซิลิกอนให้กลายเป็นสารประกอบกรดออกซาลิกซึ่งสามารถละลายน้ำได้ จากการสังเกตจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิวและอัตราการกัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนด้วย DI ไม่ว่าอัตราส่วนผสมใดๆพื้นผิวไดอะแฟรมจะมีความลาดเอียงจากขอบด้านหนึ่งของไดอะแฟรมไปสู่อีกด้านหนึ่งเสมอคงปรากฏในรูปที่ 5.3 นอกจากนี้ตรงขอบจะเกิดรอยบาก (notch) (ดังรูปที่ 5.1) ซึ่งเป็นข้อควรระวังอย่างยิ่งในการกัดไดอะแฟรมที่มีความบางเป็นพิเศษ (ต่ำกว่า 15 ไมครอน) เนื่องจากไดอะแฟรมจะขาดเสียก่อน รอยบากที่เกิดขึ้นในบางครั้งจะมีความลึกมากแม้ว่าไดอะแฟรมจะมีความหนาถึง 50 ไมครอนก็มีโอกาสที่จะเกิดขอบทะลุได้เช่นกัน เทคนิคการควบคุมความหนาของไดอะแฟรมก็คือกัดแผ่นซิลิกอนไปจนกระทั่งแสงสามารถทะลุจนเห็นไดอะแฟรมได้ ซึ่งต้องใช้ร่วมกับการคำนวณเวลากัดจากสถิติของอัตราการกัด ความยากของวิธีนี้ก็คือไม่สามารถกำหนดความหนาที่แม่นยำได้ ขณะที่แสงสามารถทะลุผ่านจะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าขอบข้างหนึ่งของไดอะแฟรมจะสว่างที่สุด ซึ่งเป็นสิ่งที่ยืนยันว่าขอบข้างใดข้างหนึ่งจะเกิดความลาดเอียงเสมอ วิธีแก้ไขคือการกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

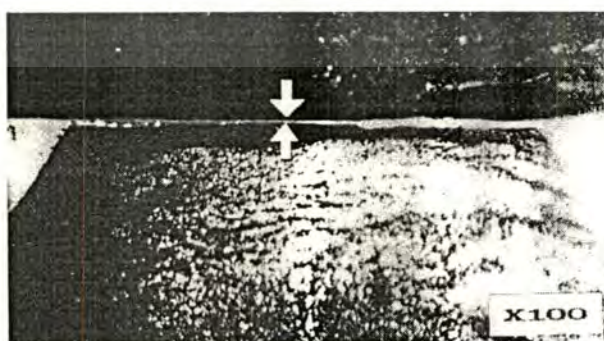
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ลักษณะลายผิวสัมผัสของโคอะเฟรมซิงก์ออกไซด์ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50: 8: 16 ที่ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 200 เท่า)



รูปที่ 5.2 ซิงก์ออกไซด์ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50: 12: 16 ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 400 เท่า)



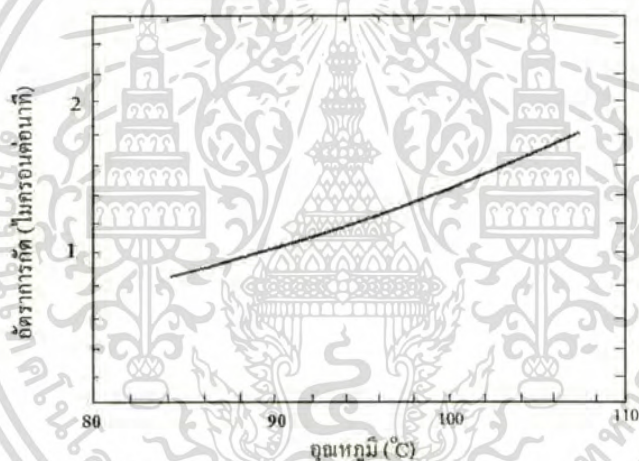
รูปที่ 5.3 ภาพจาก SEM ของภาคตัดขวางโคอะเฟรมซิงก์ออกไซด์ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน

50: 8:16 ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงแสดงให้เห็นความลาดเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.1.2 ผลของอุณหภูมิของสารละลาย

การทดลองเริ่มจากผสมสารละลาย EPD อัตราส่วน 50:8:16 ไว้ก่อนเหมือนหัวข้อก่อนหน้า และหย่อนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ลงไปโดยไม่กวนสารละลาย ต่อจากนั้นให้สารละลายเริ่มร้อนขึ้นบน Hot plate และสังเกตพฤติกรรมการกัก พบว่าไม่กักซิลิกอนสารละลายจะสามารถเริ่มกักซิลิกอนได้เมื่ออุณหภูมิประมาณ 95°C เนื่องจากในเอกสารอ้างอิงโดยทั่วไปจะใช้งาน EPD ที่อุณหภูมิรอบๆ 100°C ดังนั้นจึงได้ทำการวัดอัตราการกักที่อุณหภูมิตั้งแต่ 90°C ถึง 115°C (ซึ่งประมาณจุดเดือด) สารละลายจะถูกต้มให้มีอุณหภูมิคงที่ดังค่าต่างๆดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนหย่อนแผ่นซิลิกอนลงไป ทำการกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที จะได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 5.4 ดังนี้



รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกักและอุณหภูมิของ EPD 50:8:16

5.1.1.1.3. ผลของการกวนและไม่กวนสารละลาย

ถ้าไม่กวนสารละลายเลยสารละลายจะไม่มีมีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงและจะทำให้ฟองอากาศหยุดนิ่งที่ผิว นอกจากจะมีอัตราการกักที่ช้าลงแล้วยังพบว่าผิวที่ถูกกักมีความขรุขระมากขึ้น โดยเปรียบเทียบขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นจะไม่มีควมสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ของโคอะเฟรม และยังพบว่าโคอะเฟรมจะมีความลาดเอียงจากขอบด้านหนึ่งสู่ขอบอีกด้านหนึ่งแตกต่างมากกว่ากรณีที่กวนสารละลาย การกวนสารละลายนั้นจะช่วยพัดพาฟองอากาศของก๊าซไฮโดรเจนออกไปจากผิวที่ถูกกัก ทำให้สารละลายช่วงต่อไปได้เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่การกักที่สมบูรณ์ที่สุดนั้นอัตราการพัดพาและอัตราการเกิดฟองอากาศจะต้องมีความพอเหมาะพอดี ถ้ากวนสารละลายเร็วเกินไปจะ

ไม่สามารถสังเกตเห็นฟองอากาศได้เลยทำให้อัตราการกักลดลง จากประสบการณ์พบว่าอัตราการกักไม่เท่ากันในทุกครั้ง อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัลดลงเมื่อกวนสารละลายให้เร็วเกินกว่า 500 รอบต่อนาที นอกจากนั้นการพัดพาด้วยความเร็วที่สูงเกินไปจะทำให้โครงสร้างไมโครเมซินแตกหักได้ ผู้เขียนพบว่าการกัลดเพื่อสร้างโครงสร้างที่มีความละเอียดอ่อนไม่ควรกวนที่ความเร็วเกิน 200 รอบต่อนาที และไม่ควรงวนสารละลายเลยถ้าโครงสร้างถูกกัลดจนบางประมาณ 50 ไมครอน (อาศัยการคำนวณตามเวลาการกัลด)

5.1.1.1.4. ความสามารถนำกลับมาใช้ และความสามารถทำซ้ำ

ในอุตสาหกรรมทุกประเภทจำเป็นต้องคำนึงถึงความประหยัดจากการนำวัตถุดิบมาใช้ใหม่ EPD เป็นสารเคมีที่มีราคาแพงและมีความยุ่งยากในการนำเข้า จึงได้นำมาทดสอบกัลดซิลิกอนซ้ำที่สภาวะเดิม คือที่ความเข้มข้น EPD = 50:8:16 และอุณหภูมิ 100°C ทำการกัลดไคอะแฟรมโดยกำหนดเวลาที่ต้องหยุดกัลดเมื่อแสงสามารถส่องทะลุผ่านไคอะแฟรมได้ ทำการบันทึกเวลาและสังเกตคุณภาพของไคอะแฟรม พบว่าเมื่อผ่านการกัลดแต่ละครั้งสารละลายจะมีสีดำนึ้ขึ้นเป็นอย่างมากซึ่งอาจเกิดจากการออกซิไดซ์กับอากาศซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการสังเกตการกัลดเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามสามารถใช้หลอดไฟสปอตไลท์ส่องเพื่อสังเกตในสารละลายได้ เมื่อแสงสามารถทะลุผ่านได้จะมีความหนาไคอะแฟรมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพไคอะแฟรมจะไม่สามารถสังเกตความแตกต่างมากนัก แต่เวลาที่ใช้กัลดในครั้งต่อไปจะยาวนานขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปจากการระเหยหรือเกิดจากความเข้มข้นซิลิกอนที่ถูกละลายสะสมอยู่ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบความสามารถนำ EPD ที่ใช้แล้วมากัลดซ้ำ

ครั้งที่กัลด	จำนวนนาทีที่กัลด	อัตราการกัลด ($\mu\text{m}/\text{min}$)	ลักษณะไคอะแฟรม	ลักษณะสารละลาย
1	~390	0.962	ไม่มีความแตกต่าง กันในการกัลดแต่ละครั้ง	สีชาแก่ มีความใสพอประมาณ
2	~400	0.938		สีน้ำตาลคล้ำ ความใสลดลง
3	~420	0.893		สีน้ำตาลดำ สังเกตการกัลดยาก
4	> 500	<0.750		สีดำเหมือนหมึก

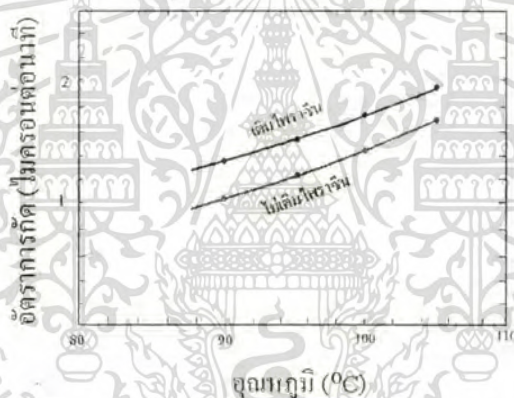
ดังนั้นความสามารถนำกลับมาใช้ (Reusability) ของสารละลาย EPD จึงไม่เหมาะแก่การนำมาใช้เกินกว่า 2 ครั้ง แต่สามารถปรับปรุงความใสของสารละลายได้โดยระวังมิให้ก๊าซออกซิเจนเข้ามาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

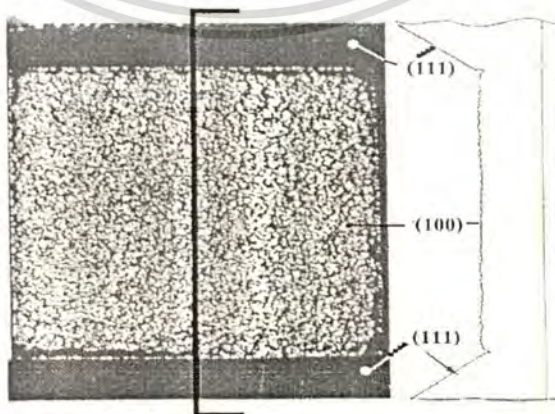
ระบบ รวมถึงการเพิ่มความสามารถในการกลั่นตัวกลับ หรืออาจมีการเติมก๊าซไนโตรเจนปริมาณเล็กน้อยใน etching bath เป็นต้น

5.1.1.1.5. การปรับปรุงอัตราการกัดและคุณภาพไดอะแฟรม[39]

ไพราซีน (Pyrazine) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) สำหรับ EPD เมื่อเติมไพราซีนจำนวนเล็กน้อยสามารถเพิ่มอัตราการกัดของ EPD ได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงให้ไดอะแฟรมมีความเรียบยิ่งขึ้น ในรูปที่ 5.5 เป็นกราฟแสดงอัตราการกัดของซิลิกอนระนาบ (100) ใน EPD อัตราส่วน 50:8:16 ที่อุณหภูมิ 90 ถึง 110°C ถูกกัดด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาทีเปรียบเทียบผลจากการเติมและไม่เติมไพราซีน 1 กรัมลงไป และ รูปที่ 5.6 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์สภาพพื้นผิวไดอะแฟรมเมื่อเติมไพราซีน



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงอัตราการกัดซิลิกอนระนาบ (100) ด้วยสารละลาย EPD อัตราส่วน 50:8:16 ที่อุณหภูมิ ช่วง 90 ถึง 110 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเติมและไม่เติมไพราซีน



รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายและภาคตัดขวางไดอะแฟรมซิลิกอน ระนาบ (100) ด้วยสารละลาย EPD 50:8:16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.2 KOH

KOH เป็นของแข็งเกล็ดสีขาว มีสภาพเป็นด่าง สามารถละลายน้ำได้ดี สารละลายใสไม่มีสี การทดลองเพื่อหาพฤติกรรมการกัดนั้นจะแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆคล้ายกับกรณี EPD ดังต่อไปนี้

5.1.1.2.1 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นสารละลายต่อการกัด

การทดสอบอัตราการกัดยังคงใช้วิธีดังเช่นกรณี EPD คือใช้แท่งเทิร์นทดสอบมีขนาด กว้างและยาวด้านละ 2 มิลลิเมตร ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์หนา 7.500 อังสตรอมเป็นหน้าฉากป้องกันการกัด (เนื่องจากอัตราการกัดออกไซด์ใกล้เคียงกับอัตราการกัดซิลิกอนระนาบ (100) จึงต้องสร้างออกไซด์ที่ความหนาดังกล่าวเพื่อให้สามารถทดสอบการกัดได้ที่จำนวนชั่วโมงที่ยาวนานขึ้น) ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยกรรมวิธีมาตรฐานและใช้งานขณะที่แผ่นแห้งแล้ว เตรียมสารละลาย KOH ความเข้มข้น 2 โมลาร์ (1 โมลของ KOH เท่ากับ 56.1056 กรัม) กวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที และหย่อนซิลิกอนลงในสารละลายพบว่าที่อุณหภูมิห้องจะไม่ปรากฏฟองอากาศ แต่ที่ผิวหน้าซิลิกอนปรากฏเป็นคราบสีเทาไม่สะท้อนแสงขึ้น ถ้านำไปส่องขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นเกล็ดทึบแสง เมื่อทิ้งแผ่นซิลิกอนดังกล่าวไว้ในสารละลายต่อไปหลายชั่วโมงจะไม่เกิดการกัดเลยแม้ว่าอุณหภูมิจะสูงขึ้นถึง 80°C ก็ตาม กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกันกับสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า 2 โมลาร์ เช่น 4 โมลาร์ วิธีการแก้ไขกระทำได้โดยการจุ่มในสารละลาย Buffered HF เป็นเวลาประมาณ 10 นาที กราบดังกล่าวจึงจะลดลงไปแต่ไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้ ดังนั้นจึงเปลี่ยนวิธีทดสอบใหม่โดยเตรียมสารละลายที่อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบในถังที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเสียก่อนจึงเริ่มกัด พบว่าที่อุณหภูมิ 65°C จะเริ่มพบฟองอากาศ อุณหภูมิต่ำกว่านี้ยังคงเกิดคราบดังกล่าว แสดงว่าอุณหภูมิเริ่มใช้งานคือ 65°C

จากกราฟในรูปที่ 5.7 จะพบว่าอุณหภูมิเพิ่มจาก 70°C ไปเป็น 80°C อัตราการกัดจะเพิ่มขึ้นประมาณ 15% ในช่วงที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่จะพบความแตกต่างนี้ลดลงถ้ากัดด้วยสารละลายความเข้มข้นสูงๆ ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่เพียงแต่จะเพิ่มอัตราการกัดซิลิกอนเท่านั้น แต่ยังเพิ่มอัตราการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงได้ทดลองหาอัตราการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นค่าน้อยๆ คือที่ 2 และ 4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทำการกวนสารละลายตลอดเวลาด้วยอัตราเร็วประมาณ 100 รอบต่อนาที ปล่อยให้สารละลายมีอุณหภูมิคงที่ 1 ชั่วโมง จึงหย่อนซิลิกอนที่มีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 5.000 อังสตรอมซึ่งมีแท่งเทิร์นทดสอบแบบเดิม บันทึกเวลาที่ซิลิกอนไดออกไซด์ถูกกัดจนหมด จะสรุปได้ดังตารางที่ 5.2 ดังนี้ (จะสังเกตเห็นจุดเสื่อมของออกไซด์ใน KOH ได้ว่า ก่อนที่ออกไซด์ได้จะถูกกัดจนหมดนั้น ผิวหน้าของเนื้อออกไซด์จะเกิดหลุมปริมาตรขนาดเล็กๆ ขึ้นมากมาย และมีฟองอากาศเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งออกไซด์จะถูกกัดจนหมดในเวลาอีกประมาณ 15-20 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

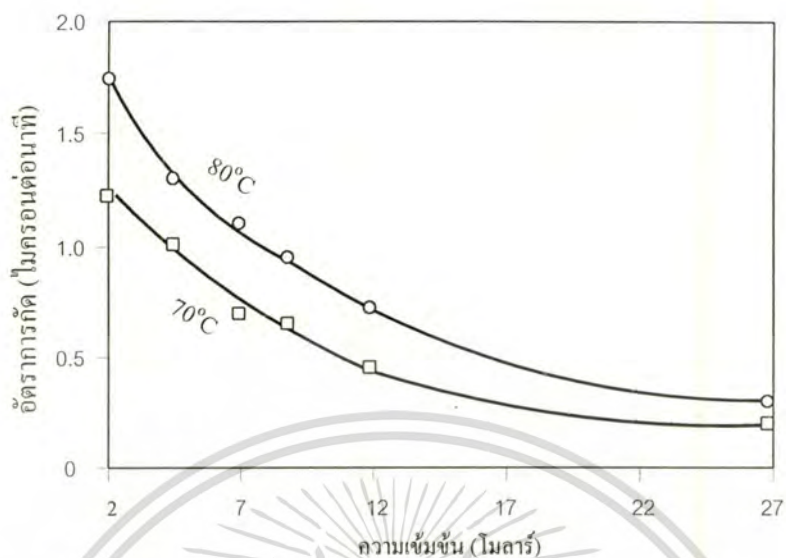
ตารางที่ 5.2 อัตราการกัดซึลิกอนไดออกไซด์โดยประมาณที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการกัด (อังสตรอมต่อชั่วโมง)	
	2M KOH	4M KOH
70	2,142.85	2,000.00
80	2,142.85	2,500.00

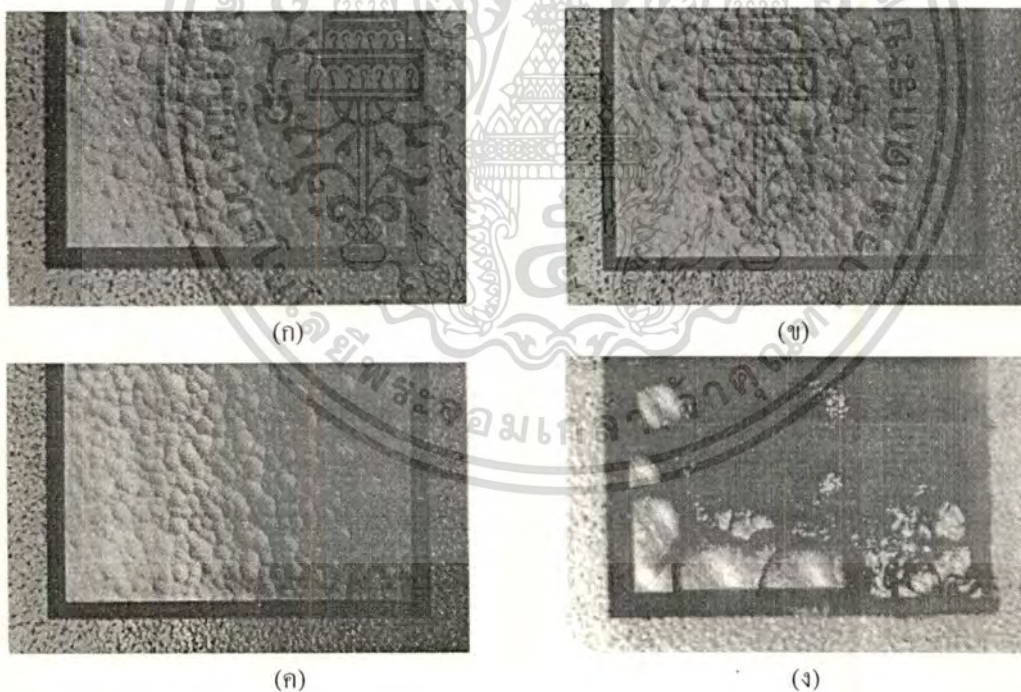
จากตารางที่ 5.2 นั้น ผู้เขียนขอหมายเหตุไว้เบื้องต้นว่าเวลาโดยเฉลี่ยที่บันทึกได้จากการกัดหลายๆครั้ง ทั้งจากการทดสอบตามวิธีข้างต้น หรือเวลาที่บันทึกได้จากเวลากัดในขั้นตอนการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งจริงๆนั้นเป็นค่าเฉลี่ย แต่จะคำนวณได้อัตรากัดที่ใกล้เคียงกับค่าที่เสนอในตารางนี้เกือบทุกครั้ง แต่มีจุดที่น่าสังเกตประการหนึ่งคือ ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์แม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80°C อัตราการกัดยังคงประมาณเท่ากัน คือ 2,142 อังสตรอมต่ออนาที แต่จะพบความแตกต่างอย่างชัดเจนที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ และถ้าใช้สารละลายความเข้มข้นสูงกว่า 7 โมลาร์ อัตราการกัดซึลิกอนไดออกไซด์จะเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการกัดซึลิกอน

อัตราการกัดซึลิกอนไดออกไซด์นั้นเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาอย่างยิ่งในการกัดเพื่อสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่ง จากกราฟในรูปที่ 5.7 นั้นจะพบความแตกต่างของอัตราการกัดซึลิกอนและชั้นออกไซด์ป้องกัน เนื่องจากต้องใช้เวลาในการกัดนานขึ้นในขณะที่ความสามารถป้องกันของออกไซด์จะลดลง ในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์นั้นสามารถสร้างชั้นซึลิกอนไดออกไซด์สูงสุดประมาณ 15,000 ถึง 17,000 อังสตรอมเท่านั้น นั้นหมายถึงซึลิกอนไดออกไซด์สามารถทน 2M KOH ได้ในเวลาประมาณ 7 ชั่วโมง 30 นาที และ 4M KOH ได้ในเวลาประมาณ 6-7 ชั่วโมงในทางปฏิบัติ แต่จากการสังเกตคุณภาพโคอะเฟรมพบว่าการกัดด้วยความเข้มข้นที่สูงกว่าจะเรียบกว่าและมีคุณภาพใกล้เคียงกันสำหรับการกัดด้วยสารละลายที่ใช้แล้ว ดังนั้นจึงควรเลือกความเข้มข้นที่ 4 โมลาร์สำหรับกระบวนการสร้าง นอกจากนี้ผู้เขียนยังพบอีกว่าถ้ากวนสารละลายเป็น 500 รอบต่ออนาทีอัตรากัดซึลิกอนจะเพิ่มขึ้นเพียงประมาณ 14% การเพิ่มความเร็วในการกวนสารละลายจะเพิ่มความเสี่ยงต่อความเสียหายของโครงสร้างไมโครเมชีนและต่อชั้นออกไซด์เสมอ ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้อัตราเร็ว 100 รอบต่ออนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 อัตราการกัดซึกลิกอนด้วยสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 5.8 สภาพพื้นผิวของซิกอนระนาบ (100) ที่ถูกกัดด้วย KOH ในเงื่อนไขต่างๆ

(ก) 2M ที่อุณหภูมิ 75°C (ข) 4M ที่ 75°C

(ค) 2M ที่ 75°C เติม IPA จนอิมด้ว (ง) 2M ที่ 85°C เติม IPA จนอิมด้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.8 เป็นลักษณะผิวโคอะเฟรมซิลิกอนซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์จะเรียกว่าที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์เล็กน้อย ถ้าเติม IPA จนอิมตัวจะสามารถปรับปรุงสภาพผิวโคอะเฟรมได้ดีขึ้น โดยพิจารณาจากขนาดของเม็ดเกรน จะมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

5.1.1.2.2 ความสามารถในการนำกลับมาใช้และการทำซ้ำ

สารละลาย KOH มีข้อดีกว่า EPD คือมีความใสไม่มีสีทำให้สังเกตการกัดได้ง่ายและสามารถเตรียมสารละลายได้สะดวกกว่า กอปรทั้งสามารถกำหนดความเข้มข้นเป็นร้อยละโดยน้ำหนักซึ่งมีความง่ายและเป็นที่ยอมรับสำหรับสารละลายที่มีของแข็งเป็นตัวถูกละลาย การทดสอบความสามารถนำกลับมาใช้ได้สรุปดังตารางที่ 5.3 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบความสามารถนำ KOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ที่ใช้แล้วมากัดซ้ำ

ครั้งที่กัด	จำนวนนาที่ที่กัด	อัตราการกัด ($\mu\text{m}/\text{min}$)	ลักษณะโคอะเฟรม	ลักษณะสารละลาย
1	~270	1.38	ไม่มีความแตกต่างกันในการกัดแต่ละครั้ง	ใส ไม่มีสี ไม่มีความเปลี่ยนแปลงในอัตราการกัดมากนัก
2	~330	1.13		
3	~330	1.13		
4	>400	< 0.93		

จากตารางที่ 5.3 เป็นการประมาณการกัดซิลิกอนที่ลึกประมาณ 375 ไมครอนพบว่าในการกัดด้วยสารละลายใหม่จะมีอัตราการกัดที่แตกต่างกับสารละลายที่ใช้แล้วอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผู้เขียนยังพบว่ามีโอกาสสูงที่ชั้นออกไซด์จะถูกกัดจนหมดหรือเกิดหลุมปริระมัดเล็กๆเกิดขึ้นอย่างมากมายบนเนื้อออกไซด์ในการกัดครั้งแรกนี้เช่นกัน ซึ่งนับเป็นปัญหาทางเทคนิคสำหรับการควบคุมการกัดด้วยสารละลายใหม่ ในการนำมาใช้ในครั้งที่ 2 และ 3 จะมีความแน่นอนกว่า แต่อัตราการกัดจะลดลงอย่างมากสำหรับสารละลายที่ใช้ในครั้งที่ 4 ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้สารละลาย KOH ได้ 3 ครั้งซึ่งจะให้ผลการกัดค่อนข้างคงที่ แต่ในการเตรียมสารละลายใหม่ควรหย่อนเศษแผ่นซิลิกอนเล็กๆลงในสารละลายเสียก่อน และควรจะใช้งานหลังจากเศษซิลิกอนถูกกัดจนหมดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

KOH นับเป็นสารละลายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกระบวนการกัด เนื่องจากมีความประหยัด มีความสามารถนำมาใช้ใหม่ มีอัตราการกัดสูงกว่า EPD ไม่มีตะกอนหรือเศษเหลือจากการกัด และสังเกตการกัดได้ง่าย แต่ข้อเสียที่สำคัญคือสิ่งเจือปนต่อกระบวนการสร้าง (ไอออนของโพแทสเซียม) และอัตราการกัดออกไซด์ที่สูงใกล้เคียงกับซิลิกอน การกัดที่ยาวนานทุกครั้งนอกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษารายงาน ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องสร้างชั้นออกไซด์ป้องกันที่หนาเพียงพอแล้ว (โดยทั่วไปคือ 1.5 ไมครอน สำหรับการกัดมากกว่า 4 ชั่วโมง) หลังจากการกัดต้องทำลายออกไซด์ทิ้งเพื่อกำจัดไอออนของโปแตสเซียมที่อาจตกค้างและต้องทำการสร้างออกไซด์เคลือบสำหรับกระบวนการที่ตามมา การสร้างตัวตรวจจบบัณฑิตราเร่งรวมทุกกระบวนการโดยใช้ตัวกัดเป็น KOH ต้องใช้เวลานานกว่า EPD 30 - 45 ชั่วโมงซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันทั้งสิ้น และจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะการกัดโดยเฉพาะอุณหภูมิ ค่า pH และความเข้มข้นเบสให้เคร่งครัดมากกว่ากรณี EPD เนื่องจากอัตรากัดออกไซด์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ซึ่งห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยฯ ไม่สามารถควบคุมสภาวะทุกอย่างได้สมบูรณ์ การสร้างตัวตรวจจบบัณฑิตราเร่งด้วยการกัดด้วย KOH จึงประสบปัญหาด้านการกัด(ซึ่งเป็นจุดที่วิกฤตที่สุด)มากที่สุด

5.1.1.3 ข้อพิจารณาเชิงเรขาคณิตของการกัดส่วนมวลตรวจสอบของตัวตรวจจบบัณฑิตราเร่ง [40]

จากที่ได้ปรากฏในเบื้องต้นว่าการควบคุมการกัดให้มีความถูกต้อง แม่นยำและไวต่อการสร้างได้ ต้องมีการออกแบบและมีการลำดับการสร้างที่ถูกต้อง และต้องระวังเรื่องการกัดเป็นอย่างมาก การกัดส่วนมวลตรวจสอบของตัวตรวจจบบัณฑิตราเร่งให้ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับทฤษฎีนั้นนอกจากจะทำให้สามารถคำนวณหรือประเมินความสามารถของตัวตรวจจบบัณฑิตราเร่งได้ ในความเป็นจริงแม้ว่าสามารถกัดให้โครงสร้างคานขึ้นไม่ต้องมีมวลตรวจสอบอยู่ตรงปลายคานจะง่ายกว่าและสามารถเพิ่มมวลตรวจสอบด้วยวัสดุที่มีความหนาก เช่น ทองคำหรือตะกั่วด้วยการระเหยในสุญญากาศหรือการเคลือบโดยสปีดเครื่อง แต่วิธีการดังกล่าวไม่สามารถกำหนดขนาดมวลที่แน่นอนได้เลย และยังเพิ่มขนาดมวลได้อย่างจำกัดเนื่องจากการสร้างชั้นโลหะดังกล่าวให้มีความหนา มีข้อยุ่งยาก และต้องเพิ่มกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าเข้าในกระบวนการสร้างมาตรฐาน เหตุผลที่สำคัญอีกประการคือ โครงสร้างคานขึ้นล้วนๆ ไม่มีความไวต่ออัตราเร่งค่าน้อยๆ (ไมโครจี μg) แต่มีความเหมาะสมสำหรับวัดอัตราเร่งค่าสูงตั้งแต่ 10-10,000 g ซึ่งต้องใช้เครื่องมือพิเศษที่ได้รับการออกแบบเพื่อการปรับเทียบและวัดในสภาวะอัตราเร่งสูงๆ การสร้างสภาวะจำลองสำหรับอัตราเร่งค่าน้อยๆ นั้นมีความง่ายกว่า เช่น ใช้เพียงการสั่นของลำโพง หรือการสั่นของสัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่ำๆ โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นต้น

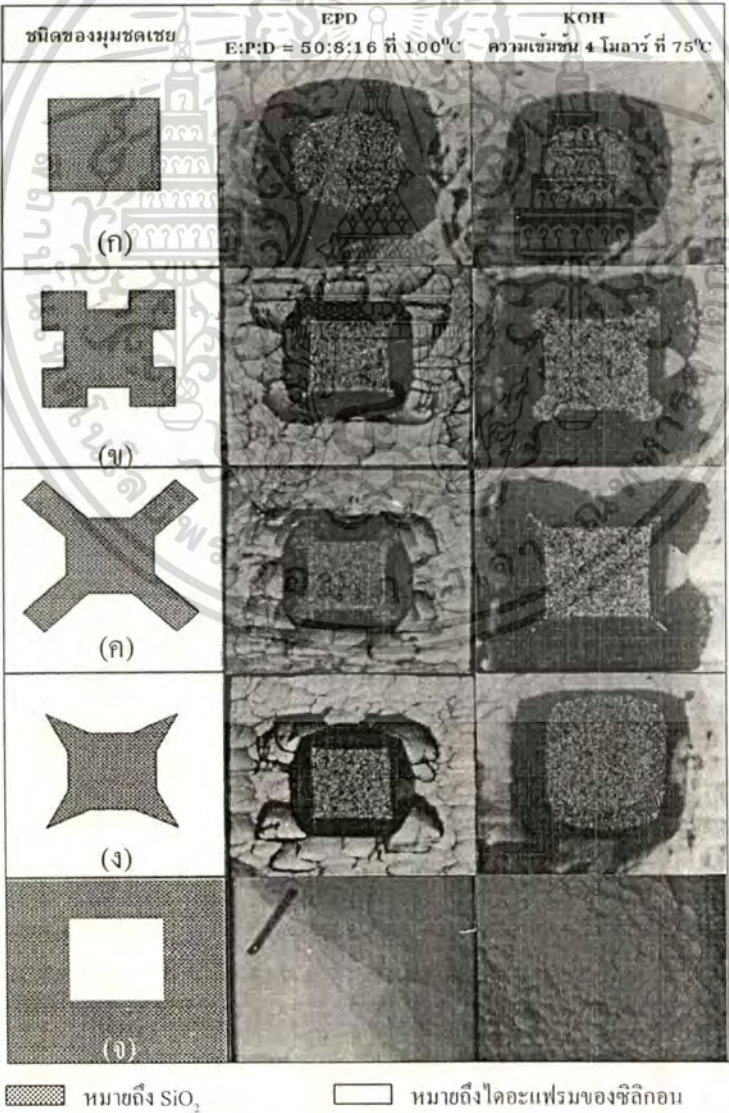
การทดสอบสภาวะที่ถูกต้องของการกัดส่วนมวลตรวจสอบนั้น เริ่มจากเพทเทิร์นทดสอบเป็นแบบไดอะแฟรมและแบบเมซา (mesa) และได้ออกแบบส่วนเคลือบเป็นสามแบบคือแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีด้านขนานกับระยะนาบ (100) และแบบสามเหลี่ยม โดยเปรียบเทียบผลการกัดและความสามารถในการเคลือบในสารละลายสองชนิดคือ EPD และ KOH โดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดมุ่งหมายเพื่อหาชนิดและขนาดของมุมขดเซซเพื่อการกัดลึก 380-390 ไมครอน สภาวะสำหรับการกัดเป็นดังนี้

- สารละลาย EPD ใช้อัตราส่วน 50:8:16 กัดที่ 100°C ซึ่งจะมีอัตราการกัดประมาณ 1.5 ไมครอน ต่อนาที กวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และหยุดกัดเมื่อเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง 13 นาที (จากการคำนวณ)
- สารละลาย KOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ กัดที่ 75°C ซึ่งจะมีอัตราการกัดประมาณ 1.6 ไมครอน ต่อนาที กวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และหยุดกัดเมื่อเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง 57 นาที(จากการคำนวณ)

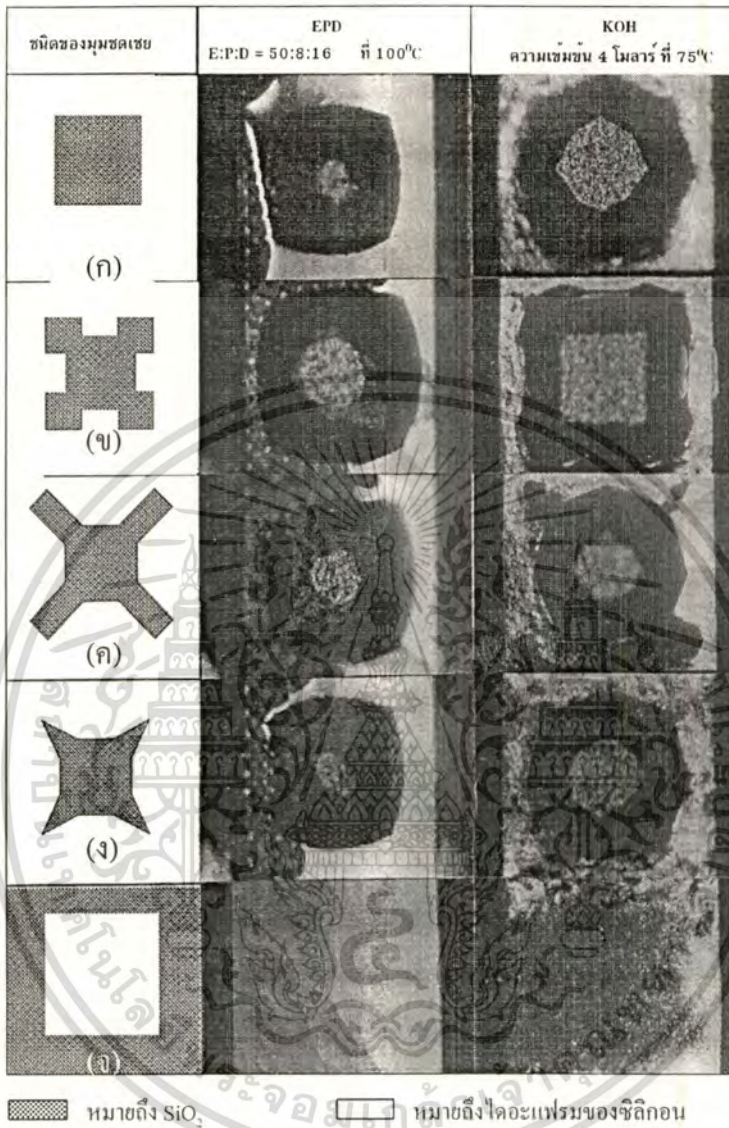
แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ดังนี้



รูปที่ 5.9 การกัดเพื่อเลือกขนาดมุมขดเซซเมื่อกัดด้วย EPD และ KOH เป็นเวลา 120 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 การกัดเพื่อเลือกชนิดมอดเซลเมื่อกัดด้วย EPD และ KOH เป็นเวลา 240 นาที

รูปที่ 5.9 และ 5.10(ก) เป็นผลจากการกัดส่วนมวลที่ยังไม่มีการชดเชยมุม จะพบว่า จะเกิดการเซาะมุมเป็นอย่างมากโดยเฉพาะเมื่อกัดด้วย EPD จึงต้องทำการชดเชยมุมดังรูป (ข) (ค) (ง) และ (จ) ซึ่งจะเห็นว่าสามารถลดการเซาะมุมได้ แม้ว่าจะไม่สามารถชดเชยได้ 100% ก็ตาม สำหรับ EPD จะพบได้ชัดเจนว่าทำให้เกิดการเซาะมุมได้รวดเร็วกว่าเมื่อกัดด้วย KOH นอกจากนี้ได้ขยายจากรูปที่ 5.10(ก) ดังรูปที่ 5.11 จะพบว่า แม้ว่าการกัดด้วย EPD จะมีอัตราการกัดซิลิกอนโดยเฉพาะอย่างยิ่งและซิลิกอนไดออกไซด์ต่ำกว่ากรณี KOH แต่จะพบว่าการกัดด้วย KOH จะทำให้ออกไซด์ที่ค้างอยู่บนชิ้นงานหลังจากการกัดเป็นเวลานานเหลือน้อยมาก (กรณีนี้คือ 4 ชั่วโมง) นั่นเป็นเพราะมีอัตราการเซาะมุมที่สูง นอกจากนี้ยังพบข้อสันนิษฐานว่า EPD จะทำให้เกิดโคอะแฟรมที่มีความ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

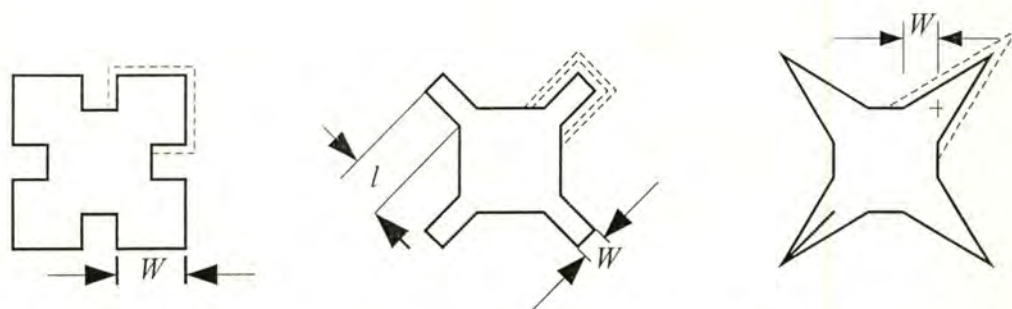
ลาดเอียงสูง(แม้ว่าบางครั้ง ณ เวลาที่ต่ำเกินไปไม่เกิดความเสียหายดังเช่นรูปที่ยกตัวอย่างมานี้ก็ตาม) ในรูปที่ 5.11 จะเห็นโคอะแฟรมขาด และรอยสันนูน (ridge) อย่างชัดเจน ทั้งหมดนี้ทำให้ได้ข้อสรุปเบื้องต้นว่า EPD ไม่เหมาะสำหรับกัดโคอะแฟรมหรือโครงสร้างมวลซึ่งต้องใช้เวลากัดนานกว่า 4-7 ชั่วโมง ดังนั้น สารละลาย KOH จึงเหมาะสมกว่าสำหรับกรณีที่กัดแบบไม่ใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 5.11 ความบกพร่องที่เกิดจากการกัดด้วย EPD

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.9 และ 5.10 ถ้ากำหนดมวลให้มีขนาดคงที่เท่ากับ 480×480 ไมครอน² มุมขดเซยทั้งสามแบบนั้นมีความเหมาะสมต่างกันไป ขนาดของมุมขดเซย w สามารถเพิ่มได้ (แสดงเป็นไขปลา) จนกว่าขอบของมุมขดเซยด้านหนึ่งจะสัมผัสกับมุมขดเซยอีกด้านหนึ่งพอดี ซึ่งจะไม่เกินกึ่งหนึ่งของด้านที่สั้นที่สุดของมวล สำหรับมุมขดเซยแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสกำหนดให้ครึ่งหนึ่งของ w อยู่ตรงหัวมุมของมวลพอดี สำหรับแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา(ขนานกับทิศทาง (100)) w จะเป็นความกว้างของขอบขดเซยโดยกำหนดด้านทะแยงให้มีความยาว l เท่ากับ 400 ไมครอนซึ่งเท่ากับความหนาของแผ่นผลึกซิลิกอน ส่วนแบบสามเหลี่ยมนั้นได้กำหนด w เป็นความยาวจากหัวมุมของมวลไปยังส่วนฐานของมุมขดเซยดังรูปที่ 5.12

ในตารางที่ 5.4 เป็นชนิดและขนาดต่างๆของมุมขดเซยสำหรับมวลขนาด 480×480 ไมครอน² ขนาดของมุมขดเซยแต่ละแบบที่เหมาะสมสำหรับการขดเซยเมื่อกัดลึกประมาณ 380 ± 20 ไมครอน จะหมายเหตุไว้ด้วยเครื่องหมาย ⁻ สำหรับ EPD และ ⁺ สำหรับ KOH



รูปที่ 5.12 ขนาดของมุมขดเชยไม่สามารถขยายได้เกินกว่ากึ่งหนึ่งของด้านที่สั้นที่สุดของความกว้าง
มวล

ตารางที่ 5.4 ขนาดต่างๆของมุมขดเชยเพื่อขดเชยมุมเมื่อกัดโคอะเฟรมลึกลึกประมาณ 380 ± 20
ไมครอน

การขดเชยมุม	W (ไมครอน)			
แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส	320	360	400 ⁺	440 [*]
แบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศา	80	120	160	200
แบบสามเหลี่ยม	140	200	220	240

หมายเหตุ * คือขนาดที่เหมาะสมสำหรับการกัดด้วย EPD และ ⁺ สำหรับ KOH

จากตารางที่ 5.5 แพทเทิร์นขดเชยแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 400 ไมครอนขึ้นไปเหมาะสมกับการกัดด้วย KOH และแพทเทิร์นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 440 ไมครอนขึ้นไปเหมาะสมสำหรับการกัดด้วย EPD ทั้งนี้เนื่องจากที่ความลึกของหลุมกัดที่เท่ากัน EPD จะให้อัตราการเซาะมุมสูงกว่า KOH สำหรับแพทเทิร์นขดเชยแบบสี่เหลี่ยมเอียง 45 องศาและแบบสามเหลี่ยมนั้นยังไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะขดเชย ณ ความลึก 380 ± 20 ไมครอน เนื่องจากได้กำหนดขนาดของมวลคงที่ไว้ก่อนล่วงหน้าจึงไม่สามารถขยายด้านขดเชยออกไปได้อีก ถ้าพิจารณาถึงความยากง่ายสำหรับเครื่องมือการสร้างสำหรับศูนย์วิจัยฯซึ่งมีเพียงไมโครคัตเตอร์ที่สามารถกำกับการตัดได้เฉพาะเส้นที่ตั้งฉากกัน ดังนั้นแพทเทิร์นขดเชยแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจึงเหมาะสมที่สุด

รูปที่ 5.13(ก) เป็นภาพถ่ายแสดงส่วนมวลของตัวตรวจจับอัตราเร่งเมื่อกัดด้วย KOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ควบคุมความหนาของโคอะเฟรมโดยเทคนิคสังเกตการทะลุของแสงผ่านโคอะเฟรมซึ่งจะมีความหนาประมาณ 40 ไมครอน จะสังเกตลักษณะโคอะเฟรมมีขนาดของเกรนที่ใหญ่ และมวลค่อนข้างสมบูรณ์ ส่วนรูปที่ 5.13(ข) และ 5.13(ค)เป็นภาพถ่ายของส่วนมวลเมื่อกัดบริเวณโดยรอบให้กลายเป็นคานยื่นที่มีมวลติดอยู่ปลาย พบว่าไม่สามารถสร้างคานยื่นพร้อมมวลให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความสมบูรณ์ได้เนื่องจากการควบคุมความหนาโดยสังเกตแสงทะลุผ่านไม่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอได้ จุดเสียที่สำคัญของเทคนิคดังกล่าวคือขณะที่มองเห็นว่าแสงสามารถส่องทะลุแล้วก็ตามแต่จะไม่สามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างไดอะแฟรมที่บางมากกับไดอะแฟรมถูกที่กัดจนทะลุแล้ว การสังเกตจะมีความยากลำบากยิ่งขึ้นถ้ากัดด้วย EPD ที่มีสีเข้มดำ ปัญหาที่สำคัญที่สุดคือไดอะแฟรมจะมีความลาดเอียง แม้ว่าความลาดเอียงที่เกิดขึ้นโดยการกัดด้วย KOH (ประมาณ 20-30 ไมครอน) จะน้อยกว่ากรณี EPD (ประมาณ 40-70 ไมครอน) แต่ความแตกต่างนี้มีนัยสำคัญต่อการสร้างจากแผ่นสู่แผ่น จากการผลิตครั้งหนึ่งสู่ครั้งต่อไป นอกจากนี้โลหะหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียมไม่สามารถทนทั้ง EPD และ KOH ได้นานเกินกว่า 20 นาที ซึ่งต้องอาศัยชั้นป้องกันก่อนจะนำลงไปกัดในตัวกัดทั้งสอง จึงได้ทำการทดลองใช้ชั้นป้องกันต่างๆซึ่งมีสองวิธีคือ เคลือบโดยตรงบนผิวหน้า และ เคลือบบนผิวหน้าและคว่ำลงบนกระจกใสลัด ผลสรุปไว้ในตารางที่ 5.5 ดังนี้

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบชั้นป้องกันต่างๆ

ชั้นป้องกัน	จำนวนนาที่ที่ทนการกัดได้		ความสามารถในการล้างออก				
	EPD(100°C)	KOH(75°C)	DI	BHF	HF	A	T
Black wax							
-เคลือบโดยตรง	7	15	0	0	0	2	4
-คว่ำบนกระจก	∞	∞					
Yellow black							
-เคลือบโดยตรง	5	5	0	0	0	4	4
-คว่ำบนกระจก	∞	∞					
Vacuum grease							
-เคลือบโดยตรง	60	20-60	1	0	0	3	3
-คว่ำบนกระจก	∞	∞					
สีกันสนิม							
-เคลือบโดยตรง	>60	>90	0	3	3	4	4
-คว่ำบนกระจก	∞	∞					
สีทาเล็บ							
-เคลือบโดยตรง	< 5	5	0	1	1	4	4
-คว่ำบนกระจก	∞	∞					

DI = น้ำบริสุทธิ์ BHF = สารละลายบัฟเฟอร์ HF = กรดไฮโดรฟลูออริก A = อะซิโตน T = ไตรคลอโรเอทิลีน
4 = 100% 3 = 75% 2 = 50% 1 = 25% 0 = 0%

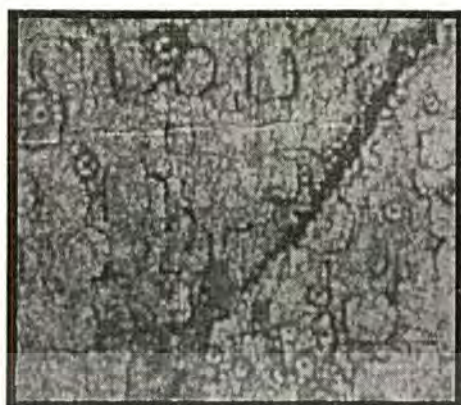
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.6 พบว่าชั้นป้องกันซึ่งล้วนแต่เป็นสารอินทรีย์แม้ว่าบางชนิดจะสามารถถูกล้างออกไปอย่างสมบูรณ์ด้วยไตรคลอโรเอทิลีนหรืออะซิโตน แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิเกิน 60°C ได้เลย แม้ว่าการคว่ำลงบนกระจกใสลัดจะสามารถป้องกันแพทเทิร์นอะลูมิเนียมได้ แต่เมื่อโครงสร้างถูกกัดจนบางมากแล้วไม่สามารถล้างแผ่นเวเฟอร์ที่ติดบนกระจกใสลัดออกได้โดยไม่เกิดความเสียหาย นอกจากนี้ชั้นเคลือบบางอย่าง เช่น สีเคลือบสนิมและยาทาเล็บจะกัดอะลูมิเนียมด้วย

ขั้นตอนต่อไปทำทดสอบตัวกักอีกชนิดคือ ไฮดราซีน (Hydrazine) ซึ่งมีรายงานว่าไม่กัดอะลูมิเนียม สารละลายไฮดราซีนความเข้มข้น 50% โดยปริมาตรถูกเตรียมที่อุณหภูมิ 80°C และทดสอบกับแพทเทิร์นเดียวกับกรณี EPD และ KOH พบว่าอะลูมิเนียมสามารถทนอยู่ในสารละลายได้มากกว่า 5 ชั่วโมงโดยไม่ถูกทำลาย แต่คุณภาพของไดอะเฟรมจะเกิดหลุมระประมิดขึ้นมากมาย ดังรูปที่ 5.14 จึงไม่เลือกใช้ไฮดราซีนสำหรับการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราเร่ง



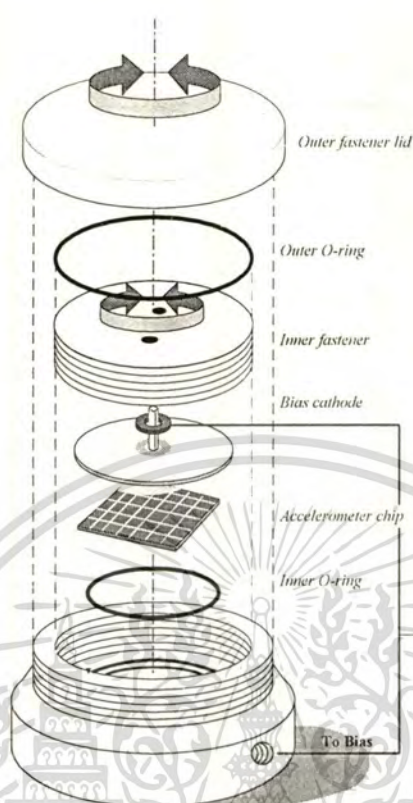
รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายของมวลซิลิกอน (ก) เมื่อกัดเฉพาะเพื่อสร้างไดอะเฟรม (ข) การกัดที่เกิดความลาดเอียง บางส่วนจะทะลุแล้ว (รอยสีขาว) บางส่วนยังกัดไม่ทะลุ (ค) คานถูกกัดจนทะลุ แต่บางส่วนยังไม่ทะลุ และ (ง) (ภาพด้านหน้า) คานถูกกัดทะลุทำให้แพทเทิร์นอะลูมิเนียมถูกกัดเสียหาย (จ) เกิดรอยหักตรงรอยต่อของส่วนมวลและคาน



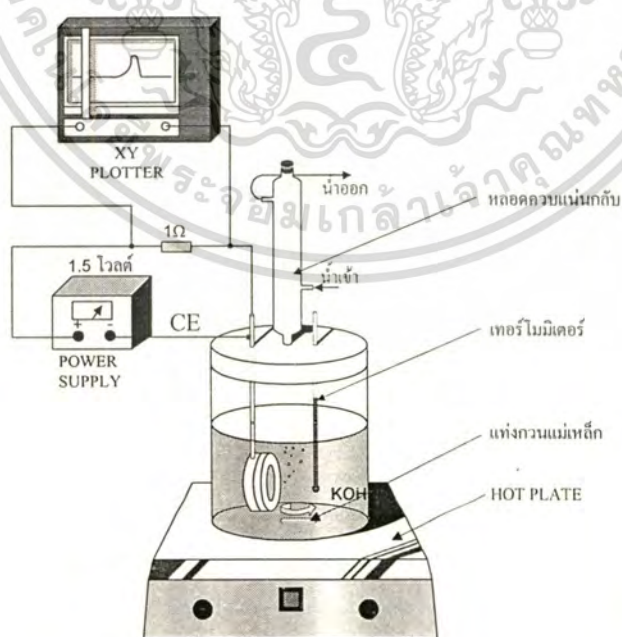
รูปที่ 5.14 ไคอะแฟรมซิลิกอนที่ถูกกัดด้วยไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 50% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 100°C

5.1.2 การกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

จากหัวข้อก่อนหน้าจะพบข้อสรุปว่าการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งโดยการกัดตามวิธีปกติมีประสิทธิผลต่ำเพียง 67% ทั้งยังมีข้อควรระวังเกี่ยวกับชั้นป้องกัน วิธีเดียวที่ใช้ได้ผลคือการคว่ำลงบนกระจก แต่การล้างออกยังทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเพิ่มเติมทำให้มีประสิทธิผลเหลือเพียง 30-45% (ชิพ 36 ตัวเหลือเพียง 12 ตัว) การกัดด้วยไฟฟ้าจะช่วยให้คุณภาพการกัดมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ในการทดลองหัวข้อนี้ได้จัดชุดทดลองดังรูปที่ 5.16 ซึ่งประกอบด้วยชุดกัดที่สามารถป้องกันสารละลายรั่วเข้ามากัดขั้วไฟฟ้าด้วยการขึ้นเกลียวเพื่ออุดแหวนยางและยังสามารถป้อนไฟเพื่อไบอัสชิ้นงานได้ดังรูปที่ 5.15 ข้อควรระวังสำหรับชุดป้องกันการกัดดังกล่าวคือแรงกดของหน้าสัมผัสระหว่างแหวนยางและชิ้นงานนั้นควรเพียงพอสำหรับการป้องกันสารละลายรั่วเข้ามาเท่านั้นแต่ไม่ควรสูงจนกระทั่งชิ้นงานแตกเสียหาย เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีกัดซิลิกอนแล้วนอกจากจะสังเกตด้วยฟองอากาศแล้วยังสามารถสังเกตจากราฟความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสที่ไหลเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเท่านั้นกับเวลาที่ใช้ในการกัด ก่อนที่จะการกัดให้เตรียมสารละลายที่อุณหภูมิที่กำหนดเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและกวนสารละลายตลอดเวลาด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเพื่อกระจายความร้อนและความเข้มข้นของสารละลายให้ทั่วกัน นอกจากนี้ต้องรักษาความเข้มข้นของสารละลายตลอดเวลาที่ทำการกัดด้วยหลอดควมแน่นกลับ ต่อจากนั้นทำการพลอตกราฟระหว่างกระแสของสารละลายตามเวลากัดเปรียบเทียบกับระหว่าง EPD และ KOH ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป



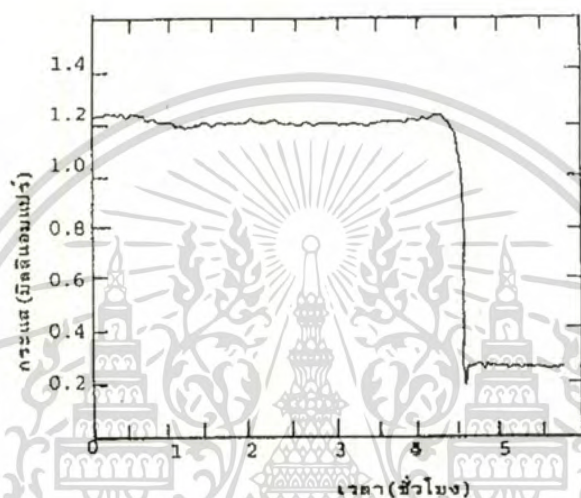
รูปที่ 5.15 ชุดกักด้วยไฟฟ้าเคมี



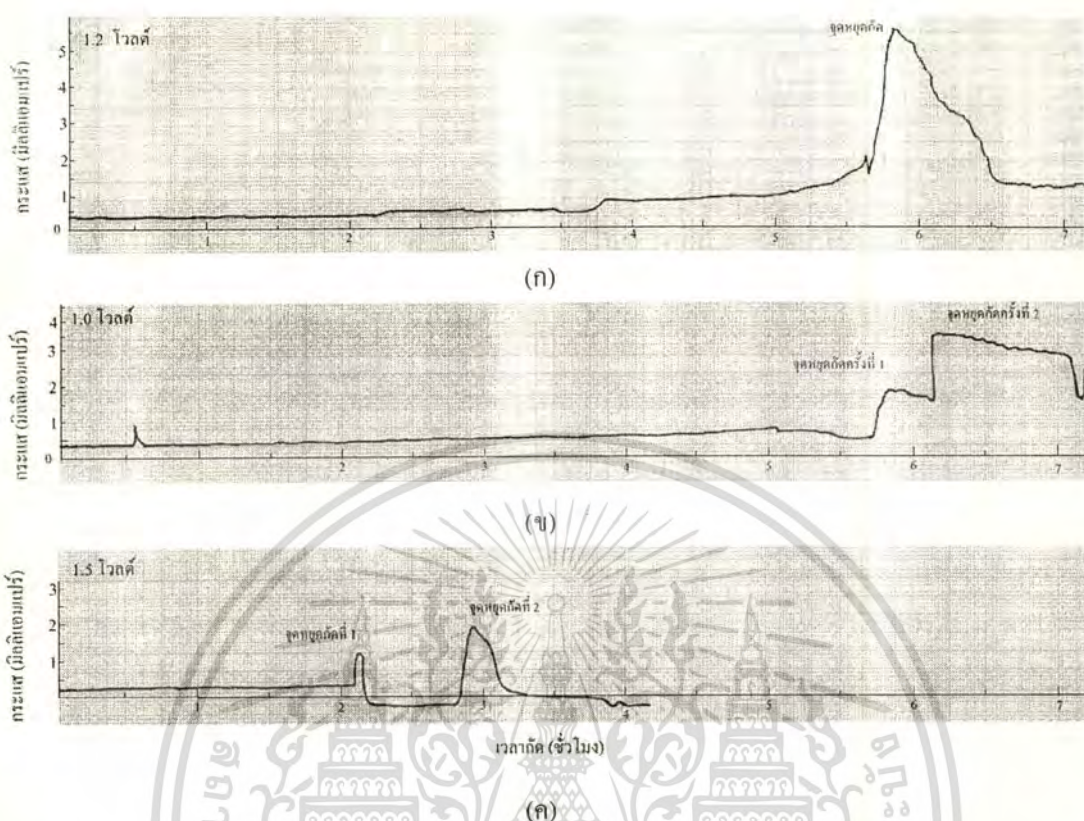
รูปที่ 5.16 ชุดทดลองกักด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองใช้แพทเทิร์นทดสอบกัดเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2000×2000 ตารางไมครอน จำนวน 4 ช่องซึ่งมีพื้นที่รวม 2.304×10^{-3} ตารางเซนติเมตรสำหรับการกัดแต่ละครั้ง กราฟในรูปที่ 5.17 เป็นค่ากระแสตามเวลาเมื่อกัดไดอะแฟรมด้วยสารละลาย EPD อัตราส่วน 50:8:16 ที่อุณหภูมิ 100°C ทำการไบอัสขั้วบวกเข้าที่ชั้นอีพ็อกซีเท่ากับ 0.6 โวลต์ ส่วนรูปที่ 5.18 เป็นกราฟการกัดไดอะแฟรมเมื่อใช้ 4M KOH ที่อุณหภูมิ 75°C ไบอัสไฟที่ 0.6 โวลต์



รูปที่ 5.17 ค่ากระแสตามเวลาเมื่อกัดไดอะแฟรมด้วยสารละลาย EPD อัตราส่วน 50:8:16 ที่อุณหภูมิ 100°C



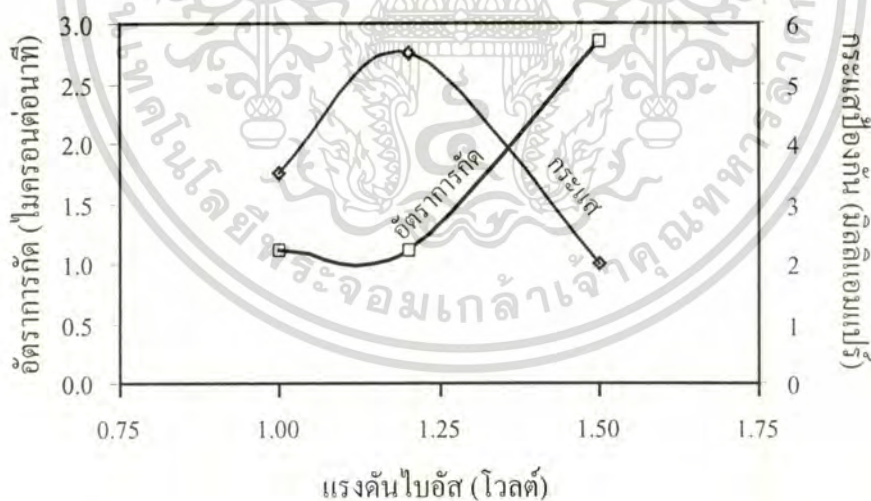
รูปที่ 5.18 ค่ากระแสตามเวลาเมื่อกักด้วย 4M KOH ที่อุณหภูมิ 75°C (ก) เมื่อโครงสร้างเป็นไดอะเฟรมล้วน ไบอัสที่ 1.2 โวลต์ (ข) เมื่อโครงสร้างเป็นไดอะเฟรมและมวด ไบอัสด้วย 1.0 โวลต์ (ค) เมื่อโครงสร้างเป็นไดอะเฟรมและมวด ไบอัสด้วย 1.5 โวลต์

กราฟในรูปที่ 5.17 และ 5.18(ก) เป็นการเปรียบเทียบผลการกักด้วยวิธี ECE ในโครงสร้างที่เป็นไดอะเฟรม ซึ่งจะใช้แพทเทิร์นเดียวกันทดสอบ ส่วนรูปที่ 5.8(ข) และ (ค) จะเป็นผลจากการกักในอีกแพทเทิร์นหนึ่งที่มีโครงสร้างไดอะเฟรมที่มีมวลขนาดใหญ่ติดอยู่ เมื่อทำการเปรียบเทียบกรณีแรกจะพบข้อแตกต่างที่ชัดเจนคือ กรณี EPD จะมีค่ากระแสเริ่มกักที่คงที่ประมาณ 1.2 มิลลิแอมแปร์ในขณะที่ KOH เริ่มต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิแอมแปร์ ค่ากระแสที่ตกลงมาต่ำสุดเท่ากับ 0.3 มิลลิแอมแปร์ในทันทีที่สารละลาย EPD กัดจนสภาพรอยต่อพีเอ็นหายไป แต่สำหรับ KOH (ในรูปที่ 5.18(ก)) จะเพิ่มสูงสุดเกินกว่า 5 มิลลิแอมแปร์และจะตกลงมาจนถึงประมาณ 2 มิลลิแอมแปร์โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที ข้อแตกต่างนี้เกิดเนื่องจาก EPD มีอัตรากัดออกไซด์น้อยมากในขณะที่ KOH มีอัตราการกัดขลิกร่อนไดออกไซด์สูงกว่ากรณี EPD มาก ดังนั้น ณ นาทีที่เกิดออกไซด์ป้องกัน (Passivation oxide) ซึ่งมีความพรุนสูงขึ้นตรงรอยต่ออัตราการกัดออกไซด์ของ KOH จะมีค่ามากกว่าอัตราการเกิดชั้นออกไซด์ สารละลาย KOH ยังสามารถเข้าทำลายเนื้อขลิกร่อนตามรูพรุนซึ่งขลิกร่อนขณะนี้เหลือเพียงชั้นอีพิตาเซียลชนิด μ เท่านั้น เมื่อใช้เวลามากขึ้นอีกสักพักออกไซด์จะเริ่มก่อตัวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

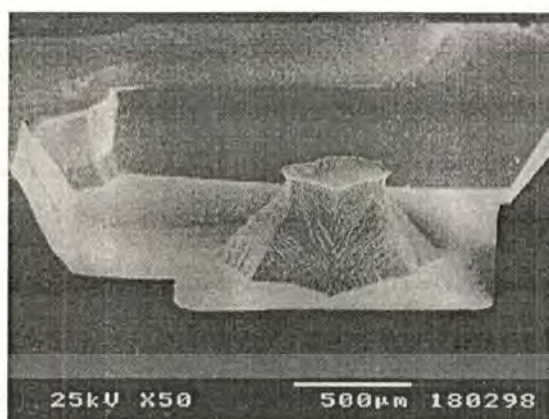
เต็มพื้นที่ทำให้กระแสลด จนสุดท้ายอัตราการกัดและอัตราการเกิดออกไซด์จะสมดุลกัน เนื้อซิลิกอนยังคงถูกกัดต่อไปอย่างต่อเนื่อง(แต่ด้วยอัตราที่ลดลงมาก) ทำให้กระแสยังคงมีค่าคงที่จนถึงระยะเวลาหนึ่งซิลิกอนถูกกัดจนหมด กระแสจะเป็นศูนย์(ส่วนนี้ไม่ได้แสดงในกราฟ)

ส่วนกรณีที่มีโครงสร้างที่มีมวลอยู่บนไดอะแฟรมจะมีพฤติกรรมต่างออกไป ที่เห็นได้ชัดเจนก็คือเกิดจุดหยุดกัด 2 ครั้ง สาเหตุที่เกิดจุดหยุดกัดในครั้งแรกสันนิษฐานว่าเกิดจากการที่โครงสร้างที่มีเนื้อซิลิกอนเหลืออยู่จำนวนมากในขณะที่ส่วนหนึ่งถูกกัดลึกลงไปถึงรอยต่อพีเอ็นทำให้เกิดออกไซด์ป้องกันเริ่มต้นตรงรอยต่อ และกระแสก็จะตกลง แต่เนื้อซิลิกอน(ส่วนที่เป็นมวล)ยังถูกกัดต่อไปเรื่อยๆ ดังนั้นกระแสจะลดลงชั่วระยะเวลาหนึ่ง แต่เนื้อซิลิกอนของมวลส่วนที่ติดกับไดอะแฟรมจะถูกกัดออกไปอีก ทำให้พื้นที่ส่วนที่เป็นไดอะแฟรมเพิ่มขึ้น(ในขณะที่อัตราการเกิดออกไซด์กำลังสูงขึ้น) ดังนั้นกระแสจะลดลงได้อีก กลายเป็นการหยุดกัดครั้งที่ 2 เมื่อเนื้อของมวลซิลิกอนลดลงเรื่อยๆ ทำให้กระแสตกลงอีก จนในที่สุดเนื้อซิลิกอนจะเหลือน้อยมากจนส่วนที่เป็นมวลกลายเป็นรูปคล้ายปลายเข็มมากขึ้น จนในที่สุดจะกลายเป็นเพียงปลายเข็มเล็กๆเท่านั้น

จากทั้งสามรูปของรูปที่ 5.18 จะเห็นว่าถ้าเพิ่มแรงดันไบอัสจะทำให้อัตราการกัดเพิ่มขึ้นด้วย ดังกราฟในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ความสำคัญของแรงดันไบอัสต่อกระแสป้องกัน และ อัตราการกัดโดยวิธี ECE จากสารละลาย 4 M KOH ที่อุณหภูมิ 75°C



รูปที่ 5.20 ภาพถ่าย SEM แสดงไดอะแฟรมของซิลิกอนจะได้รับการปรับปรุงเมื่อกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 5.21 ภาพถ่าย SEM แสดง (ก)ร่องที่กำหนดขอบเขตคาน(ด้านหน้า) (ข)คานยื่นและมวล(ด้านหลัง)

5.2 ผลการกัดด้วยพลาสมาในปฏิกิริยา

ในวิทยานิพนธ์นี้มีได้ศึกษาการกัดด้วย RIE เป็นหลัก RIE เป็นวิธีกัดที่มีประโยชน์สำหรับ แพทเทิร์นที่ละเอียดอ่อน การศึกษาพารามิเตอร์ที่กระทบต่อการกัดนั้นมีมากมาย ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้วิธี RIE เพื่อเสริมการกัดด้วยสารเคมี ทั้งนี้ แม้ว่ากัดด้วยไฟฟ้าเคมีจะให้คุณภาพไดอะแฟรมที่ดี แต่สิ่งที่เป็นปัญหามากก็คือ

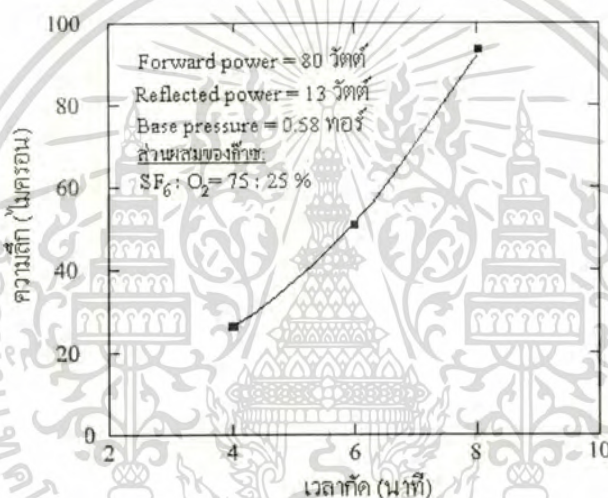
1.ความลาดเอียงของไดอะแฟรมซึ่งเกิดจากแผ่นเวเฟอร์มีความลาดเอียงแล้วตั้งแต่บริษัทผู้ผลิต ทำให้บนแผ่นเวเฟอร์เดียวกัน มีบางตำแหน่งที่รอยกัดจากด้านหน้าไม่ทะลุจนกับรอยกัดที่ด้านหลัง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นบนไดอะแฟรมเดียวกัน ดังนั้นไม่สามารถให้คานเคลื่อนตัวได้ตามทฤษฎี

2. จากเหตุผลข้อที่ 1 เมื่อบางจุดของแผ่นเวเฟอร์ทะลุแล้วในขณะที่ส่วนอื่นยังไม่ทะลุ จะทำให้สารเคมีรั่วเข้ามากัดขั้วไฟฟ้าในชุดกัด สร้างความเสียหายให้กับชิ้นงานมาก

แม้ว่าในบางครั้งจะประสบผลสำเร็จในการกัดโดยไม่เกิดการรั่วซึม แต่ปัญหาดังกล่าวไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้ ดังนั้นเทคนิคและวิธีแก้ไขสำหรับทุกๆครั้งที่เกิดการรั่วจึงจำเป็นต้องหยุดการดำเนินการ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดลงทันที ล้างทำความสะอาด (ดังวิธีในบทที่ 4 หัวข้อการสร้าง) และทำการกัดด้านหลังต่อด้วย RIE คอยสังเกตผลการกัดทุกๆ 2 นาทีด้วยกล้องจุลทรรศน์ ถ้าพบว่ารอยกัดด้านหลังชนกับด้านหลังจนทั่วทุกจุดให้ถือเป็นอันยุติ

ในหัวข้อนี้จะศึกษาเพียงอัตราการกัดด้วย RIE ในก๊าซผสม $\text{SF}_6:\text{O}_2$ 75 : 25% ที่ความดัน 0.58 ทอร์ และใช้พลังงานพลาสมาเท่ากับ 80 วัตต์ เนื่องจากมีอัตราการกัดซิลิกอนสูงสุด [37] ในรูปที่ 5.22 เป็นอัตราการกัดด้วย RIE ในสภาวะดังกล่าว ส่วนรูปที่ 5.23(ก) และ 5.23(ข) เป็นภาพจาก SEM ของพื้นไดอะแฟรมเมื่อกัดด้วย SF_6 เป็นเวลา 4 และ 8 นาทีตามลำดับ

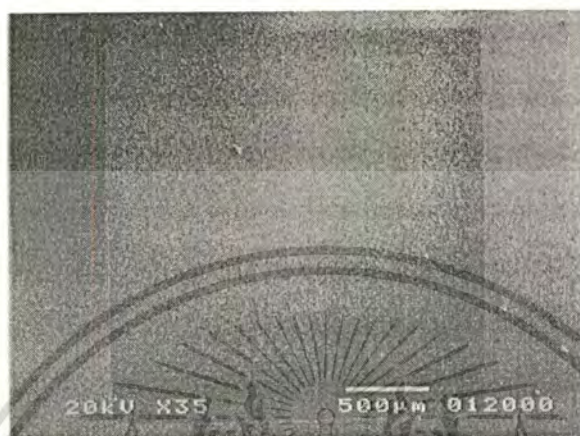


รูปที่ 5.22 ความลึกของหลุมเมื่อกัดด้วย RIE ของ SF_6

จากรูปที่ 5.22 ถ้าคิดอัตราการกัดโดยเฉลี่ยเป็นเส้นตรงจะเท่ากับ 17.5 ไมครอนต่อนาทีซึ่งสูงกว่าการกัดด้วยสารละลายมากถึง 11 เท่าตัว นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ณ นาทีที่ 8 ซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นมาสก์ถูกกัดจนหมด แม้ว่าอัตราการกัดของพลาสมาจะสูงกว่าการกัดด้วยสารละลายมาก แต่ก็มีอัตราการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ที่สูงมากเช่นกัน ดังนั้นวิธีการกัดด้วย RIE เพียงอย่างเดียวจึงไม่เหมาะสมสำหรับการสร้างไดอะแฟรมซิลิกอนที่หนา 10-20 ไมครอนจากแผ่นเวเฟอร์ที่มีความหนาเกินกว่า 200 ไมครอน

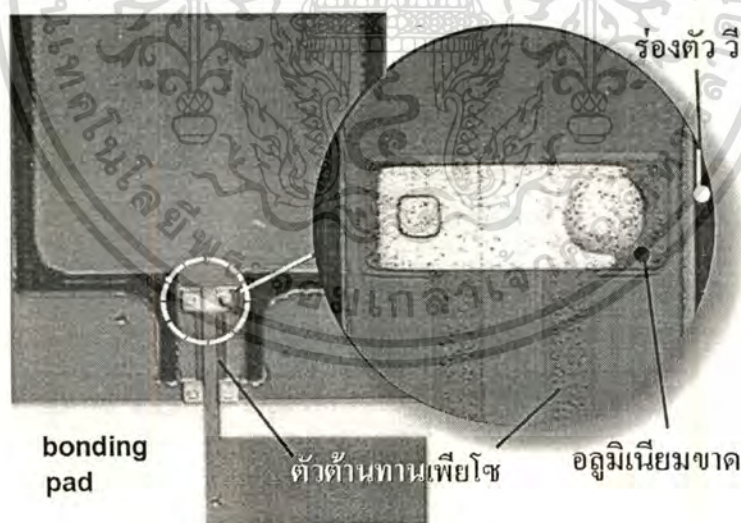
ในรูปที่ 5.23(ก) (ข) และ (ค) เป็นภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวซิลิกอนที่ถูกกัดด้วยพลาสมาของก๊าซผสม $\text{SF}_6:\text{O}_2$ 75:25 % ณ เวลา 0, 4 และ 8 นาทีที่เงื่อนไขตามรูปที่ 5.22 ตามลำดับ จะพบว่าออกไซด์และเนื้อซิลิกอนถูกกัดทำลายลงไปมากตั้งแต่นาทีที่ 4 และถูกกัดจนหมด ณ นาทีที่ 8 แต่จากการทดลองทุกช่วงเวลาดังกล่าว 2 นาทีนั้นไม่สามารถทราบได้แน่นอนว่าออกไซด์เริ่มถูกกัดจนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทั่งหมดไป ณ เวลาเท่าใด แต่การนำเอา RIE มาใช้เพื่อสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งนั้นไม่ได้เป็นตัว
กัณฑ์จึงไม่ต้องการข้อมูลที่เงื่อนไขอื่นใดของพารามิเตอร์ที่ควบคุมอยู่นี้



รูปที่ 5.23 ภาพถ่าย SEM ของไดอะแฟรมเมื่อกัณฑ์ด้วย SF_6 เป็นเวลา (ก) 0 นาที (ข) 4 นาที และ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(ค) 8 นาที
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

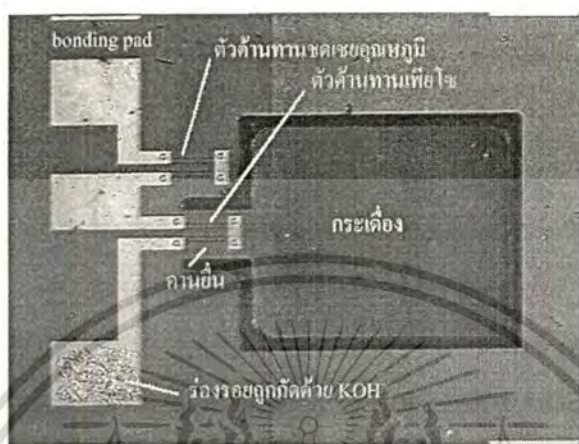
เทคนิคการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งในโครงสร้างของ Bulk micromachine นั้นมีความยุ่งยากเป็นอย่างมาก การสร้างที่ประสบผลสำเร็จนอกจากจะต้องมีอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการสร้างอย่างมากมายแล้ว ยังต้องอาศัยประสบการณ์โดยเฉพาะการควบคุมการกัดทั้งสามวิธีขั้นต้นให้มีความแน่นอน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะสามารถควบคุมการกัดได้ระดับหนึ่ง แต่โครงสร้างที่มีลักษณะสูงด้านบนแผ่นเวเฟอร์จะเพิ่มปัญหาในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีขึ้นอีก กล่าวคือแพทเทิร์นใดๆไม่สามารถกำหนดให้ใกล้ขอบหนึ่งของหลุมได้ต่ำกว่า 40 ไมครอนได้ เพราะในขณะที่หมุนเวียงน้ำยาไวแสงนั้นหลุมจะกักน้ำยาไวแสงส่วนหนึ่งไว้ ทำให้หนากว่าบริเวณที่เป็นพื้นเรียบ ทำให้การอบ post bake ไม่แห้งซึ่งจะเกิดความแตกต่างกัน เมื่อเข้าสู่ขั้นตอน Develop จะพบได้ทันทีว่าน้ำยาไวแสงส่วนนี้จะไม่เกาะผิวซิลิกอนซึ่งวิธีแก้ที่แน่นอนนั้นไม่มี ในบางครั้งการเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาอบฟิล์มจะทำให้ฟิล์มบางส่วนไหม้ หรืออาจแก้ไขด้วยการฉายแสงให้นานขึ้น 5-10 วินาที หรือต้องลดความเร็วของการหมุนเวียงโดยเริ่มที่ความเร็วต่ำประมาณ 5000 rpm. เป็นเวลา 15-20 วินาทีแล้วจึงเพิ่มอัตราเร็วมากขึ้นจนถึง 4000 rpm. จากสถิติการสร้างพบว่าแพทเทิร์นที่ใกล้หลุมเกินกว่า 20 ไมครอนจะไม่มีน้ำยาไวแสงปกคลุมอยู่ ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.24 จะพบว่าแพทเทิร์นอะลูมิเนียมไม่เชื่อมต่อกัน เนื่องจากอยู่ใกล้กับหลุมเกินกว่า 40 ไมครอน



รูปที่ 5.24 จุดเสียของตลาดลายอะลูมิเนียมเนื่องจากวางแพทเทิร์นไว้ชิดกับขอบหลุมต่ำกว่า 40 ไมครอน

ส่วนในรูปที่ 5.25(ก) เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของด้านหน้าของอุปกรณ์ จะสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณปลายกระเดื่องจะมีสีเข้มแสดงถึงการโค้งงอของคานเนื่องจากมวลตรวจสอบมีขนาดเล็กใหญ่กว่าคานยื่นมาก ส่วนบริเวณใกล้ห่ออะลูมิเนียมมีร่องรอยความเสียหายจากการที่สารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ล้างชิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KOH รั่ว ส่วนรูปที่ 5.25(ข)เป็นภาพถ่ายด้านหลังของอุปกรณ์ ซึ่งจากการสังเกตพบว่ามวลตรวจ
สอบถูกกัดออกไปจนเหลือประมาณ 70%



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.25 ชิปตัวตรวจจับอัตราเร่ง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

5.3 การวัดลักษณะเฉพาะของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

ตัวตรวจจับอัตราเร่งที่ใช้ทดสอบในหัวข้อนี้ มีขนาดดังต่อไปนี้

ขนาดของคาน

w กว้าง	320 ไมครอน
L ยาว	300 ไมครอน
h หนา (วัดจากเครื่องวัดความหนา) 14 ไมครอน	
m มวล (คำนวณ)	3.13×10^{-9} กิโลกรัม
I_y โมเมนต์ของความเฉื่อย	7.31×10^{-20} กิโลกรัม.เมตร ³

ขนาดของมวลตรวจสอบ (สมมุติว่าการกัดได้มวลอย่างสมบูรณ์)

c_1 จุดศูนย์กลางบนแกน x	600 ไมครอน
c_2 จุดศูนย์กลางบนแกน y	0 ไมครอน
c_3 จุดศูนย์กลางบนแกน z	200 ไมครอน
M_0 มวล (คำนวณ)	0.637×10^{-6} กิโลกรัม

ความต้านทานเพียโซ

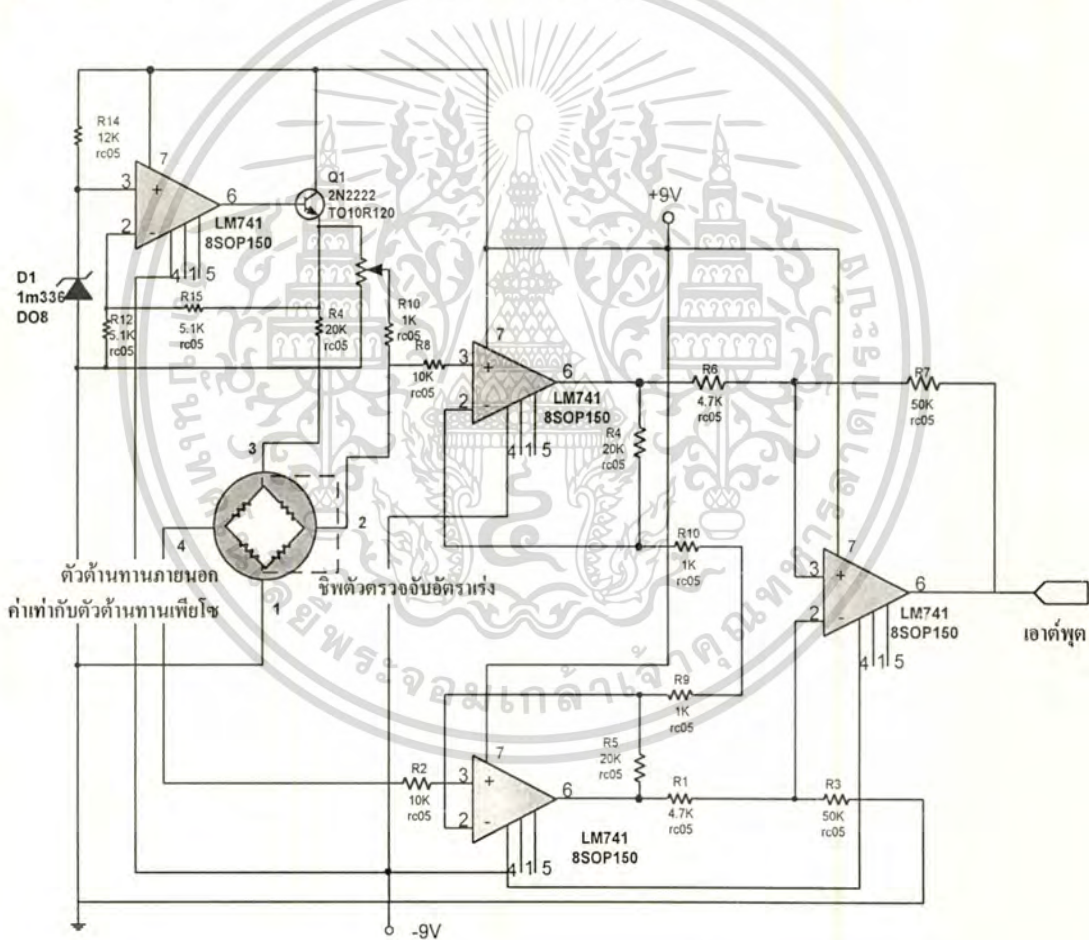
R ความต้านทาน	496 โอห์ม
L_r ความยาวตัวต้านทาน	200 ไมครอน
$z_1 - z_2$ ความกว้างตัวต้านทาน	20 ไมครอน
Z_r ระยะทางจากกึ่งกลางคานถึงกึ่งกลางของตัวต้านทาน	30 ไมครอน

ก่อนจะนำชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งไปวัดสัญญาณจะต้องตัวต้านทานเข้ากับวงจรวิธสโตนบริดจ์ซึ่งจะต่อสัญญาณออกไปสู่วงจรขยายดังรูปที่ 5.26 วงจรขยายมีองค์ประกอบสามส่วน (พิจารณาจากซ้ายสุดของรูป) ส่วนแรกเป็นวงจรแรงดันคงที่ ที่จะทำจ่ายแรงดันคงที่ประมาณ 2.5 โวลต์แก่วงจรบริดจ์ ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของวงจรวิธสโตนบริดจ์ และส่วนที่ 3 เป็นวงจรขยายอินสตรูเมนต์เพื่อนำสัญญาณออกไปวัด เมื่อต่อตัวต้านทานของชิพเข้ากับวงจรบริดจ์ จำเป็นต้องปรับแรงดันให้บริดจ์สมดุลเสียก่อนที่จะวัดผลด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ R_{10}

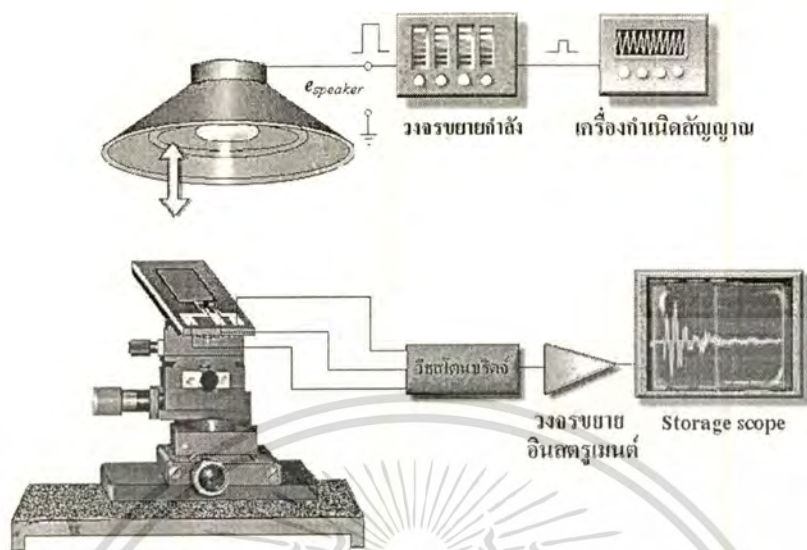
ด้านหลังของชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งจะถูกติดอยู่กับชิพซิลิกอนอีกชิ้นหนึ่งซึ่งกัดเป็นหลุมสี่เหลี่ยมลึกประมาณ 10 ไมครอน หลุมเหล่านี้จะอนุญาตให้มวลตรวจสอบของชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งแกว่งขึ้นลงอย่างอิสระภายใต้ขอบเขต 10 ไมครอน ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแกว่งมากเกินไปที่ความถี่

ก้ำก๋อน ส่วนด้านบนของชิพจะไม่ปิดฝาไว้ ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบความไวต่อแรงกระตุ้นไมวากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกขนาดเล็กซึ่งได้เลือกใช้ลำโพงรถยนต์ช่วงเสียงกลางเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานกระตุ้น และต่อเชื่อมลำโพงกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ กำหนดให้ลำโพงอยู่ห่างจากชิพเท่ากับ 3.6 เซนติเมตร ส่วนลำโพงมีปากกรวยเป็นรูปวงรี มีความยาวแกนเท่ากับ 5 และ 7 นิ้ว เนื่องจากขนาดของชิพเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของกรวยลำโพง และระยะห่างเพียง 3.6 เซนติเมตร ดังนั้นจึงอนุมานว่าทิศทางการส่งพลังงานจากแหล่งกำเนิดเป็นเส้นตรงหรือประมาณได้ว่าค่าทิศทางพลังงาน (Directivity) ของลำโพงเท่ากับ 1 (หรืออาจประมาณว่าอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 0.8) สัญญาณที่ส่งออกจากวงจรบริดจ์และส่งผ่านเข้าวงจรขยายอินสตรูเมนต์และบันทึกสัญญาณด้วยดิจิตอลสโตรีจสโคป (Digital Storage Scope) ในรูปที่ 5.27 เป็นการจัดการทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

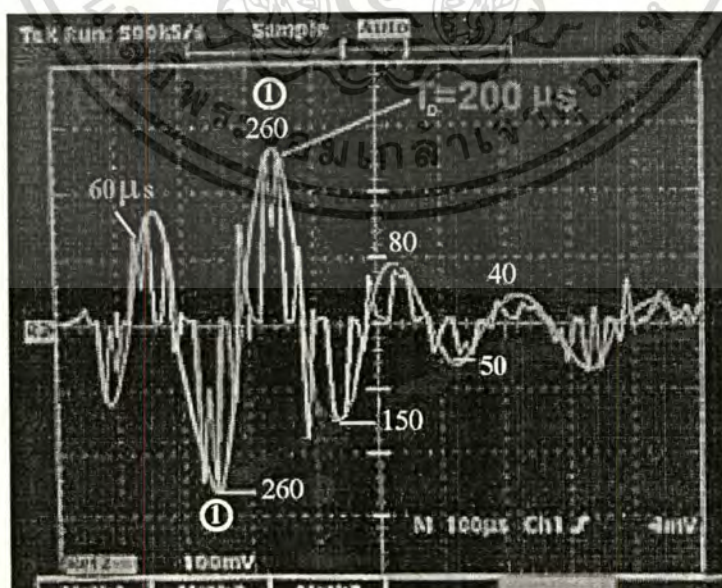


รูปที่ 5.26 วงจรวัดสัญญาณจากตัวตรวจจับอัตราเร่ง



รูปที่ 5.27 การทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับอัตราเร่ง

ขั้นแรกทดสอบการตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์โดยการป้อนสัญญาณพัลส์เคียวขนาด 15 โวลต์ที่ช่วงห่างเท่ากับ 1 ms และแสดงการตอบสนองพร้อมกับการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.28 เพื่อคำนวณหาความถี่ธรรมชาติของระบบมวลตรวจสอบและคาน



รูปที่ 5.28 การวิเคราะห์การตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ขนาด 15 โวลต์จากลำโพงเสียงกลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.28 จะสังเกตว่าสัญญาณตอบสนองที่แท้จริงจะมียอดคลื่นแฟงมาก ซึ่งนั่นเป็นการมอดูเลตของสัญญาณรบกวนและสัญญาณตอบสนองเชิงกลของตัวอุปกรณ์เอง ในการวิเคราะห์จะสร้างกรอบคลื่น (Envelop) ของสัญญาณขึ้นมาเพื่อแสดงการตอบสนองเชิงกลของระบบซึ่งพบว่าตัวตรวจจับอัตราเร่งตอบสนองในแกนลบมากกว่าแกนบวกทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักของมวลตรวจสอบทำให้แกนแกว่งในซีกลบมากกว่า การตอบสนองต่อสัญญาณซีกบวกและลบไม่สมมาตรกันนั้นเป็นลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์ Nonmonotonic หรืออุปกรณ์ที่มีการกำหนดที่ความถี่ธรรมชาติ

Logarithmic decrement

นำค่าสูงสุดในคาบที่ n หาคด้วยแอมพลิจูดของคาบต่อไปจะเป็นการทดสอบค่า logarithmic decrement ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.13) และ (2.14) การวิเคราะห์แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\delta = \ln \frac{y_M(n)}{y_M(n+1)} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.13)$$

ซีกบวกของกราฟ

แอมพลิจูดลูกที่	Vp (mV)	δ	ζ
1	260	1.178	0.184
2	80		
3	40		

ซีกลบของกราฟ

แอมพลิจูดลูกที่	Vp (mV)	δ	ζ
1	260	0.550	0.087
2	150		
3	50		
เฉลี่ย		0.880	0.138

จากกราฟจะพบว่าความถี่ธรรมชาติเกิดความหน่วงเท่ากับ 5.00 kHz ซึ่งสามารถคำนวณความถี่ธรรมชาติตามสมการ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ ได้เท่ากับ 5.05 kHz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่เมื่อเกิดการหน่วง

การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับอัตราเร่งเพื่อหาความไวต่ออัตราเร่งนั้นจะใช้วิธีเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดของคลื่นพัลส์ที่จ่ายให้กับลำโพงแล้ววัดการตอบสนองของลำโพง แรง F ที่เกิดจากพลัง

งานเสียง(หรือความดันอากาศ)ที่ทำให้แอมพลิจูดของมวล M เกิดการเหวี่ยงเท่ากับ y_M ดังสมการต่อไปนี้[1]

$$y_{M(t)} = \frac{F}{M\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t) \quad (5.1)$$

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

$$y_{Max}\left(\frac{T_D}{4}\right) = \frac{F}{M\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n \frac{T_D}{4}} \quad (5.2)$$

และเนื่องจากคุณสมบัติของตัวตรวจจับอัตราเร่งจากสมการที่ (2.19) การเหวี่ยงของมวล M จะประมาณเท่ากับอัตราเร่งของวัตถุที่ตรวจสอบอัตราเร่งดังกล่าวความสัมพันธ์ $-\omega_n^2 y_M \approx a_y$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.46) การเหวี่ยงจะทำให้ความต้านทานของตัวตรวจจับอัตราเร่งเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\Delta R/R$ ดังนี้

$$\frac{\Delta R}{R} = -2.7 \times 10^{-11} \left(c_1 + \frac{L+b}{2} \right) \frac{1}{wh^2} \omega_n^2 M y_M \quad (5.3)$$

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

$$\Delta e_o = \frac{v_s}{4} \frac{\Delta R}{R} = 6.75 \times 10^{-12} v_s \left(c_1 + \frac{L+b}{2} \right) \frac{1}{wh^2} \omega_n \frac{e^{-\zeta\omega_n \frac{T_D}{4}}}{\sqrt{1-\zeta^2}} F = S_F F \quad (5.4)$$

เรียก S_F ว่าความไวต่อแรงมีหน่วยเป็น โวลต์ต่อนิวตัน

ตัวแปร c , w , L และ b สามารถกำหนดได้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ เหลือเพียงความหนา h ของคันซึ่งสามารถคำนวณได้จากความชันกราฟที่พล็อตระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงที่ตกกระทบมวลตรวจสอบ M นั้นเอง

การคำนวณแรงที่ตกกระทบมวล M ต้องอาศัยกฎ Inverse Square Law เพื่อคำนวณ Sound Pressure Level: SPL (สัญลักษณ์ L_p และมีหน่วยเป็นเดซิเบล dB) สำหรับกำลังของเสียงที่ระยะ r เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง ดังนี้[41]

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_p = 10 \log \frac{P}{10^{-12}} - 10 \log 4\pi r^2 + 0.5 \quad (5.5)$$

เมื่อ $L_p = \text{SPL (dB)}$

$P =$ กำลังปรากฏ (Apparent Power) ที่ขั้วลำโพง $= e_{\text{speaker}}^2 / R_{\text{speaker}}$

$R_L =$ ความต้านทานของลำโพง (โอห์ม) สำหรับการทดลองนี้ $R_L = 8$ โอห์ม

$r =$ ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงตัวชิพ สำหรับการทดลองนี้ $r = 3.6$ เซนติเมตร

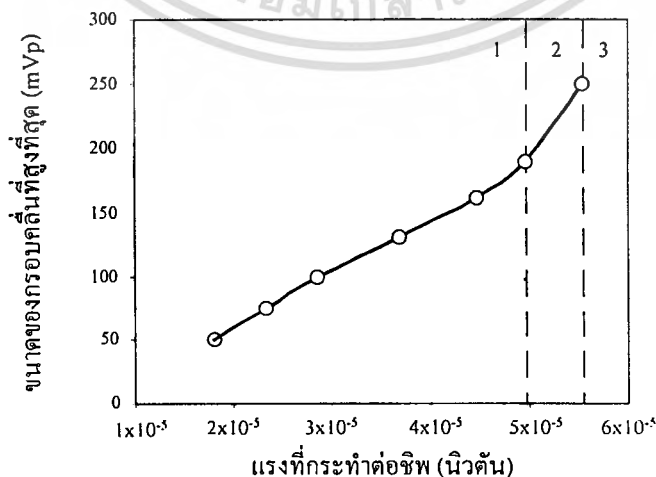
จากระยะทาง r เปรียบเทียบกับขนาดของลำโพงซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้วจึงอนุมานว่าพลังงานเสียงไม่สูญเสียไปในอากาศ และสมมุติว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ลำโพงเปลี่ยนเป็นคลื่นเสียงได้โดยสมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับความดันอ้างอิงมาตรฐานสำหรับ SPL ที่ 20 ไมโครปาสคาล ดังนั้นความดันอากาศ P_{air} ที่ระยะ r ใดๆ จะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{\text{air}} = (20 \times 10^{-6}) 10^{L_p/20} \quad \text{หน่วยนิวตันต่อตารางเมตร} \quad (5.6)$$

ดังนั้นแรงที่กระทำต่อมวล M ซึ่งมีพื้นที่ด้านบนเท่ากับ AB จะมีค่าเท่ากับ

$$F = AB \times P_{\text{air}} \quad \text{หน่วยนิวตัน} \quad (5.7)$$

ในรูปที่ 5.29 แสดงผลการทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าของขดคลื่นที่สูงที่สุดสำหรับการตอบสนองต่ออิมพัลส์กับแรงที่กระทำต่อชิพและแสดงลำดับการคำนวณตามสมการที่ (5.1) ถึง (5.7) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วลำโพงกับแรงที่กระทำต่อชิพ (หรืออัตราเร่ง) ดังตารางที่ 5.6 ดังนี้



รูปที่ 5.29 ขนาดของขดคลื่นสูงสุดสำหรับการตอบสนองต่ออิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

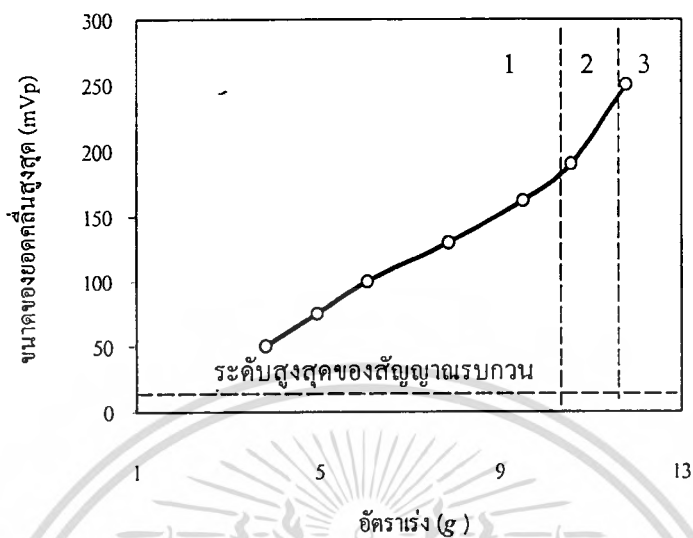
ตารางที่ 5.6 ลำดับการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างภาคินพุตซึ่งเป็นแรงดันที่ขั้วลำโพงกับภาคเอาต์พุตซึ่งเป็นขนาดขดคลื่นสูงสุดของการตอบสนองต่ออิมพัลส์

ภาคินพุต						ภาคเอาต์พุต	
แรงดันที่ ขั้วลำโพง (V)	กำลังที่ออก จากลำโพง (W)	Sound Pressure Level (dB)	แรงดันที่ตก กระทบชีพ (N/m ²)	แรงที่ตก กระทบชีพ × 10 ⁻⁵ (N)	อัตรา เร่ง (g)	ขดคลื่น สูงสุด (mV)	ΔR/R (Δz/z)
0.256	0.008	117.524	15.040	1.805	3.834	50	20.0
0.331	0.013	119.754	19.442	2.333	4.957	75	30.0
0.406	0.020	121.527	23.844	2.861	6.079	100	40.0
0.525	0.034	123.754	30.814	3.698	7.856	130	52.0
0.636	0.050	125.424	37.343	4.481	9.521	162	64.8
0.706	0.062	126.330	41.452	4.974	10.568	190	76.0
0.787	0.077	127.276	46.221	5.546	11.784	250	100.0

จากรูปที่ 5.29 พบว่าในช่วงที่ 1 ขนาดของขดคลื่นสูงสุดจะตอบสนองต่อแรงก่อนข้างเป็นเชิงเส้นตั้งแต่แรงที่ตัวตรวจจับอัตราเร่งสามารถตรวจจับได้ซึ่งมีขนาด 1.137×10^{-5} นิวตัน จนถึง 4.975×10^{-5} นิวตัน โดยมีความไวในการตอบสนอง S_F เท่ากับ 4.26×10^6 มิลลิโวลต์ต่อนิวตัน แต่ในช่วงที่สองพบว่าระบบจะมีการตอบสนองสูงกว่าช่วงที่ 1 เป็นอย่างมาก และคานจะหักเมื่อให้แรงกระทำสูงกว่า 5.546×10^{-5} นิวตัน และเมื่อป้อนแรงดันให้กับลำโพงเท่ากับ 1 โวลต์แรงดันอากาศจะทำให้คานจะหัก ณ จุดนี้ไม่สามารถคำนวณแรงกระทำต่อระบบได้เนื่องจากไม่ทราบค่า e_s ของวงจรมีการวัด การจัดการทดลองแบบนี้ถือว่าไม่ปลอดภัยต่อโครงสร้างคานเดี่ยวเนื่องจากแรงจากภายนอกจะกระทำต่อคานเดี่ยวโดยตรง ถ้ามีการเก็บบรรจุโดยป้องกันด้านบนของชีพด้วยฝาปิดอีกชั้นหนึ่งจะสามารถจำกัดการเคลื่อนที่ของคานได้แต่การทดลองนี้ต้องการวิธีการวัดด้วยอุปกรณ์ทางเครื่องกลซึ่งมีเทคนิคสำหรับการวัดที่ยุ่งยากกว่า

จากข้อมูลผลการทดลอง $\zeta = 0.124$ $\omega_n = 5.05$ kHz และ $T_0/4 = 5.0 \times 10^{-5}$ วินาที และ จะสามารถคำนวณความหนาของคานได้เท่ากับ 10.02 ไมครอนซึ่งจะนำไปคำนวณมวล M โดยแทนค่าตัวแปรที่ทราบลงในสมการความถี่ธรรมชาติของระบบตามสมการ $\omega_n \approx \sqrt{3EI/ML^3}$ [1] จะคำนวณได้ว่ามวลเท่ากับ 0.48 มิลลิกรัม แล้วนำค่าดังกล่าวไปแทนแทนแรง (แกน x) ของกราฟในรูปที่ 5.30 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอัตราเร่งที่อ้างอิงกับแรงโน้มถ่วงจะแสดง

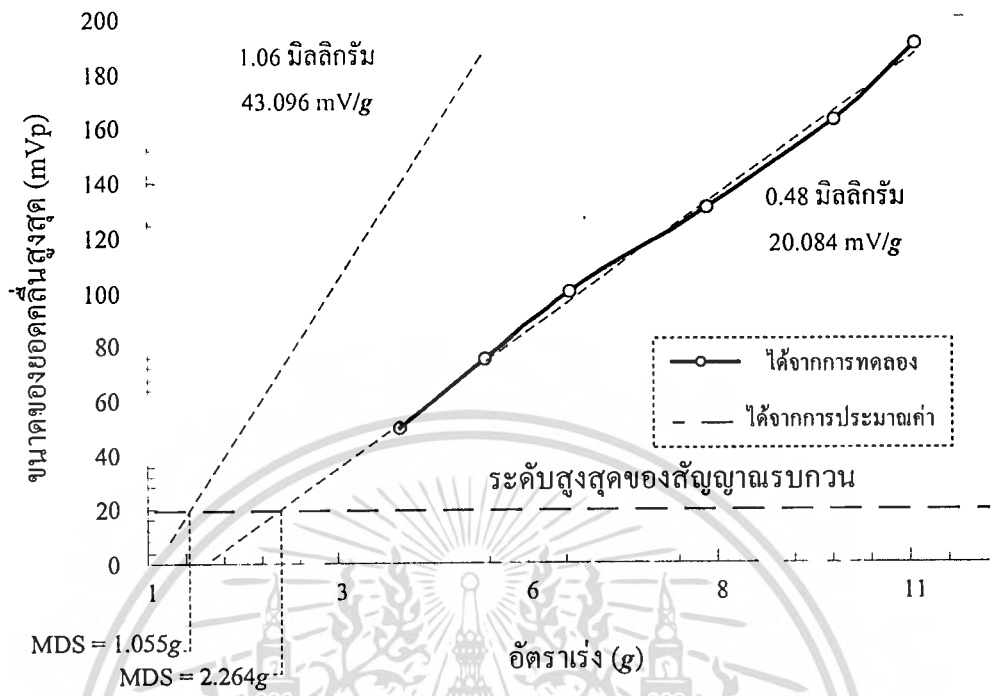
ได้ดังรูปที่ 5.30 ดังนั้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 ความไวในการตอบสนองต่ออัตราเร่ง ($1g = 9.806 \text{ m/s}^2$)

รูปที่ 5.30 มีลักษณะเหมือนรูปที่ 5.29 ทุกประการเนื่องจากแกน x เป็นค่าที่ได้จากการหารแรงกับมวลขนาด 0.48 มิลลิกรัม กราฟในช่วงแรกตั้งแต่ $3.834g$ จนถึง $10.568g$ จะมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้น ซึ่งมีค่าความไวเท่ากับ 20.084 mV/g ซึ่งการกำหนดค่าความไวอาจมีการระบุถึงความไวต่ออัตราเร่งต่อแรงดันไฟฟ้าเลี้ยง ดังนั้นช่วงเชิงเส้นของตัวตรวจจับอัตราเร่งนี้อาจระบุได้เป็น 2.231 mV/V/g และอัตราเร่งต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้นี้มีค่าเท่ากับ $2.264g$ ซึ่งขนาดสัญญาณที่วัดได้จะเท่ากับแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน ซึ่งประมาณเท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ ซึ่งคำนวณตรงกับระยะประมาณ 0.02 ไมครอน และสัญญาณอัตราเร่งสูงสุดที่สามารถตรวจจับได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างมีค่าเท่ากับ $10.568g$

ถ้าเปรียบเทียบความไวสัญญาณอัตราเร่งของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมากับอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยกำหนดให้ความหนาของคานเท่ากับผลการทดลองคือ 10.22 ไมครอน ซึ่งความแตกต่างนั้นเกิดจากขนาดของมวล M นั้นเอง โดยมวลที่ออกแบบไว้และถือว่าไม่เกิดการเสาะมุมในขณะที่ยึดนั้นจะมีขนาด 1.06 มิลลิกรัม แต่ในความเป็นจริงอาจประมาณว่าเมื่อเกิดการเสาะมุมแล้วมวล M จะเหลือประมาณ 60% ของที่ออกแบบซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ 0.638 มิลลิกรัม ในรูปที่ 5.31 เป็นการเปรียบเทียบผลเฉพาะช่วงเชิงเส้นระหว่างผลการทดลองจริงๆ (แสดงด้วยเส้นทึบ) และผลจากการประมาณค่าจากมวลที่ออกแบบ (แสดงด้วยเส้นประ)



รูปที่ 5.31 ความไวในการตอบสนองต่ออัตราเร่งในช่วงเชิงเส้นของอุปกรณ์จากผลการทดลอง (เส้นทึบ)เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีมวลตามที่ออกแบบ(แสดงด้วยเส้นประ)

ในรูปที่ 5.31 จะพบว่าความไวของอุปกรณ์ต่ออัตราเร่งนั้นถูกจำกัดด้วยขนาดของมวลนั่นเอง กล่าวคือเมื่อมวลมีขนาดใหญ่ก็จะมีค่าความไวสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสามารถขยายช่วงสัญญาณอัตราเร่งที่ต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้นอกจากจะได้จากการเพิ่มมวลแล้วการลดสัญญาณรบกวนจะเป็นวิธีที่ควรพิจารณาเช่นกัน แต่การลดสัญญาณรบกวนนั้นมีข้อเสียอยู่ทางเทคนิคมากซึ่งต้องพิจารณาทั้งจากสภาพแวดล้อมของการทำงานรวมถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด หรืออาจเพิ่มแรงดันไฟเลี้ยงแก่วงจรวิศโคมบรีดจ์ แต่วิธีนี้ก็เป็นการเพิ่มขนาดสัญญาณรบกวนขึ้นมาเช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความต้านทานของตัวต้านทานเพียโซแต่ก็เป็นการเพิ่ม thermal noise ขึ้นมาอีกเช่นกัน การวิเคราะห์ผลจากสัญญาณรบกวนถึงการจัดการระบบวัดที่มีประสิทธิภาพนั้นมีได้ อยู่ในขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนวิธีการขยายขอบเขตช่วงการวัดอัตราเร่งสูงสุดโดยไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างอาจทำได้โดยการลดขนาดมวลและต้องมีการเก็บบรรจุมิให้แรงจากภายนอกกระทำต่อคานหรือมวลได้โดยตรง รวมไปถึงการบรรจุวัสดุที่มีค่า ζ ที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 0.7 ไว้ในฝาปิดที่ผนึกจนอากาศไม่เข้า นอกจากนี้ผลของความชื้นและสิ่งแปลกปลอมในอากาศจะทำให้เกิดประจุตกค้างบนผิวหน้าจนเกิดการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสจนทำให้เกิดสัญญาณรบกวนโดยรวมต่อระบบได้ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไม่ว่าจะเป็นขนาดทางเรขาคณิตหรือความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมไปถึงการเก็บบรรจุชีพตัวตรวจจับอัตราเร้นนั้นนับว่าเป็นความสัมพันธ์ที่มีการแลกกัน (Trade-off relation) ต่อลักษณะเฉพาะต่างๆ (characteristics) ทั้งพฤติกรรมการตอบสนองเชิงกลและเชิงไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์เอง ซึ่งการศึกษาโดยละเอียดในสิ่งเหล่านี้อยู่นอกเหนือขอบข่ายวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเสนอแนะและวิเคราะห์เทคนิคและวิธีการในการสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่งซึ่งมีโครงสร้างที่เกิดจากการกัดด้านหน้ามาบรรจุด้านหลังและอยู่บนพื้นฐานเทคนิคสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบพลาสมาของห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. โดยจะกล่าวถึงเหตุผลสำหรับการเลือกสารละลายกัด การออกแบบตัวตรวจจับอัตราเร่ง และเทคนิคบางประการสำหรับการสร้าง และได้ทำการทดสอบลักษณะเฉพาะบางประการเชิงกลและเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่ง

ปัจจัยหลักสำหรับการสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดซิลิกอนก็คือการควบคุมการกัดให้ได้รูปทรงและคุณภาพชิ้นงานได้ตามที่ต้องการทุกครั้ง สารละลายกัดแอนไอโซโทรปิก 3 ชนิด คือ EPD KOH และ Hydrazine ถูกนำมาทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขต่างๆ ดังจะสรุปได้ในตารางที่ 6.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 ข้อเปรียบเทียบสารละลายกัดแอนไอโซโทรปิก

สารละลายกัด	เงื่อนไขใช้งาน		อัตราการกัด		คุณภาพไดอะแฟรม ^f	Repeat-Ability ^c	Reus-Ability ^d
	ความเข้มข้น	อุณหภูมิ (°C)	ซิลิกอน ^a	SiO ₂ ^b			
EPD	50:8:16	100	1.50	ช้ามาก	ลาดเอียง ~ 50-60 μm ขนาดเกรน ~ 250 μm	3	2
	50:8:16 Pz ^c		1.8	ช้ามาก	ลาดเอียง ~ 20-30 μm ขนาดเกรน ~ 50 μm	3	2
	50:12:16		1.5	ช้ามาก	ลาดเอียง ~ 50-60 μm hillocks มากมาย	3	1
KOH	2M	75	1.48	0.21	ลาดเอียง ~ 30 μm ขนาดเกรน ~ 130 μm	2	3
	4M		1.02	0.27	ลาดเอียง ~ 30 μm ขนาดเกรน ~ 100 μm	2	3
	4M IPA ^f		1.02	0.27	ลาดเอียง ~ 30 μm ขนาดเกรน ~ 100 μm	3	3
Hydrazine	50 vol%	100	1.90	ช้ามาก	ถูกกัดทำลายอย่างมาก	1	0
	80 vol%		2.50	เร็วมาก	ถูกกัดทำลายอย่างมาก	1	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

a) อัตราการกัด = ไมครอนต่อนาที b) = ไมครอนต่อชั่วโมง

c) ระดับความสามารถทำซ้ำ

4 = ได้คุณภาพเหมือนเดิมทุกครั้ง

3 = มีความแตกต่างกันเล็กน้อย

2 = แตกต่างกันอย่างมากระหว่างสามารถควบคุมได้

1 = ไม่สามารถควบคุมได้เลย

d) จำนวนครั้งนำกลับมาใช้ได้

e) PZ = ผสม Pyrazine 1 กรัมต่อสารละลาย 66 มิลลิลิตร

f) IPA = ผสม Isopropyl Alcohol จนอิ่มตัว

g) วัดความหนาที่แตกต่างจากขอบหนึ่งไปอีกขอบหนึ่งของไดอะแฟรม

ไม่ว่าจะเป็นการกัดด้วยวิธีธรรมดาหรือกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีก็ตาม สิ่งที่ต้องพิจารณาสำหรับการเลือกสารละลายในอันดับแรกคือคุณภาพไดอะแฟรมที่ได้ พบว่า KOH เป็นสารละลายที่เหมาะสมสำหรับสร้างไดอะแฟรมที่สุด แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีอัตราการกัดชั้นออกไซด์ที่สูงมาก ทางแก้ไขก็คือต้องสร้างชั้นออกไซด์ให้หนากว่า 1.5 ไมครอน ซึ่งต้องใช้เวลารสร้างที่นานและอาจเกิดไอออนแปลกปลอมฝังตัวในชั้นออกไซด์ซึ่งนับเป็นอุปสรรคประการหนึ่งสำหรับการพัฒนาสร้างอุปกรณ์ประเภท MOS ลงบนชิพเดียวกับโครงสร้างไมโครเมชัน แต่วิธีป้องกันที่ดีที่สุดก็คือการสร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์แทนซิลิกอนไดออกไซด์ แต่เนื่องจากไม่มีเครื่องมือดังกล่าวในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมก็คือการสร้างชั้นออกไซด์ที่หนาเกินกว่า 1.5 ไมครอนซึ่งต้องใช้เวลาที่ยาวนานกว่ากระบวนการที่เลือกสารละลายกัดเป็น EPD ถึง 40 ชั่วโมง ข้อเสียที่สำคัญที่สุดของ KOH ก็คือมีความไม่แน่นอนสำหรับการกัดค่อนข้างสูง แม้ว่าจะไม่สูงที่สุดเท่ากับไฮดราซีนก็ตาม ซึ่งพบว่าแม้ว่าในการกัดแต่ละครั้งจะเปลี่ยนสารละลายใหม่ทุกครั้งและควบคุมสถานะและเงื่อนไขต่างๆอย่างเข้มงวดก็พบว่าในบางครั้งจะไม่กัดเนื้อซิลิกอนเลย หรือบางครั้งจะมีอัตราการกัดออกไซด์ที่สูงมากกว่าเนื้อซิลิกอน ทั้งนี้อาจสรุปว่าสารละลาย KOH มีความอ่อนไหวต่อสิ่งปนเปื้อนโดยเฉพาะประเภทไขมันเนื่องจากสิ่งสกปรกเหล่านั้นจะเปลี่ยนแปลงการกัดไปอย่างมาก ดังนั้นการใช้สารจำพวก vacuum grease, black wax หรือ yellow wax ไม่ว่าจะเป็นการเคลือบที่ซิลิกอนโดยตรงหรือคิดเพื่อคว่ำซิลิกอนลงบนกระจกจึงมีวิธีที่เหมาะสม และจะพบข้อเท็จจริงอีกประการหนึ่งก็คือ KOH ที่ถูกใช้งานมาแล้ว 1 ครั้งจะมีอัตราการกัดออกไซด์ต่ำกว่าสารละลายที่เตรียมขึ้นใหม่ ดังนั้นเทคนิคที่สำคัญสำหรับการใช้งาน KOH คือการรักษาความสะอาดของเครื่องมือและสารละลาย และให้สารละลายเศษซิลิกอนนำมาใช้งานก่อน 1 ครั้ง ทั้งนี้ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 4 โมลาร์ซึ่งจะมีคุณภาพไดอะแฟรมสูงกว่ากรณี 2 โมลาร์ และสามารถปรับปรุงคุณภาพการกัดไดอะแฟรมด้วยการเติม IPA จนอิ่มตัวแต่อัตราการกัดซิลิกอนจะลดลง

แม้ว่าโดยทฤษฎีแล้ว EPD เป็นสารละลายที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสร้างที่ต้องการชั้นออกไซด์ที่หนาประมาณ 5,000 – 6,000 อังสตรอม เพราะมีอัตราการกัดชั้นออกไซด์ที่ต่ำกว่าการกัดเนื้อซิลิกอนถึง 100 เท่า แต่ข้อเสียที่สำคัญคือไดอะแฟรมมีความลาค่อนข้างสูงซึ่งในบางไมวากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งมีความลาดเอียงถึง 60 ไมครอนและไม่เกิดความสละควในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงขณะที่กำลังกัดเนื่องจากสารละลายมีสีดำนวล ดังนั้นวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมีจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเผ่าสังเกตจุดสิ้นสุดการกัดของสารละลาย EPD ซึ่งนอกจากจะได้คุณภาพโคอะแฟรมที่เรียบมากขึ้นและลดความลาดเอียง (ซึ่งบางครั้งพบว่ามีความลาดเอียงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 10 ไมครอน) แล้ว ยังสามารถควบคุมความหนาได้ด้วยเทคนิคการหยุดกัดที่รอยต่อซึ่งทำให้การสร้างโคอะแฟรมที่มีความหนาเพียง 10 ไมครอนเป็นไปได้

ไม่ว่ากรณี EPD หรือ KOH การกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีเป็นวิธีที่ทำให้การสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่งเป็นไปได้สูงสุด การสร้างชุดป้องกันการกัดที่สามารถป้องกันไฟเลี้ยงขณะทำการกัดเป็นสิ่งจำเป็น ชุดป้องกันการกัดที่ดีไม่ควรก่อให้เกิดแรงกดต่อแผ่นซิลิกอนซึ่งจะทำให้โครงสร้างที่บอบบางเกิดความเสียหาย และควรสามารถตรวจสอบการรู้ทั้งก่อนและขณะที่กัดจริงได้ วิธีการเลือกศักดาไบอัสที่เหมาะสมสำหรับกัดฐานรองในขณะเดียวกับที่ป้องกันชั้นอีพ็อกซีเอาไว้ นั้นมีสองวิธีก็คือ (1) การพลอตกราฟลักษณะกระแสและศักดาของชิ้นงานเทียบกับ CE โดยกวาดศักดาขึ้นหรือลงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งในอัตราที่ช้าพอสมควร (ซึ่งอาจเท่ากับ 1 โวลต์ต่อ 15 นาทีโดยประมาณ) และกำหนดจุดไบอัสให้เป็นค่าลบมากกว่า PP แต่วิธีนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่โครงสร้างโคอะแฟรมเกิดจากรอยต่อพีเอ็นสมบูรณ์เท่านั้น ในวิทยานิพนธ์นี้โครงสร้างของโคอะแฟรมอาจเกิดการลัดวงจรเนื่องจากร่องตัววีหรือเกิดจากความผิดพลาดจากการสร้างตัวด้านทวนเพียโซ ซึ่งอาจทำให้ทิศทางไบอัสกลับค่าจากทฤษฎีได้ วิธีการที่ (2) ก็คือการทดสอบปรับค่าศักดาพร้อมกับสังเกตการอัตราการกัดจากขนาดและปริมาณฟองอากาศและกระแสที่ไหลในวงจร ให้ปรับค่าไบอัสจนกระทั่งพบจุดที่เกิดการหยุดกัด ต่อจากนั้นและให้ปรับค่าไบอัสเล็กน้อยไปจนกระทั่งเกิดการกัดอีกครั้งหนึ่ง วิธีการเช่นนี้แม้ว่าไม่สามารถทราบจุดหยุดกัด PP ที่ถูกต้องของรอยต่อพีเอ็นได้ แต่สามารถแก้ไขให้สามารถใช้เทคนิคการหยุดกัดสำหรับอุปกรณ์ที่รอยต่อเกิดการลัดวงจรได้ ด้วยวิธีการนี้พบว่าคุณภาพโคอะแฟรมได้รับการปรับปรุงมากเช่นกัน คุณภาพโคอะแฟรมจากการกัดด้วยวิธี ECE ไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสหรือไฟเลี้ยงที่ป้อนแก่ระบบ แต่อัตราการกัดจะเพิ่มขึ้นถ้าไบอัสด้วยค่าใกล้เคียง PP มากขึ้น โดยทั่วไปอัตราการกัดที่ได้จากวิธีไฟฟ้าเคมีและการกัดด้วยสารละลายปกติมีค่าโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

ปัญหาที่สำคัญต่อการกัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีคือการรั่วของสารละลายเข้ามาในชุดป้องกันการกัด ขณะที่สารละลายรั่วเข้ามาในชุดป้องกันการลัดวงจรจะทำให้สัญญาณกระแสบนกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ซึ่งการรั่วอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดการขยายตัวของชุดกัดและแผ่นซิลิกอนภายใต้แรงแบบที่กดไว้ทำให้เกิดรอยแตกตามแนว Scribe line ที่ออกแบบไว้บนอุปกรณ์ หรือเกิดจากความลาดเอียงของแผ่นเวเฟอร์ทำให้บริเวณหนึ่งที่มีความหนาน้อยที่สุดจะถูกกัดจนทะลุก่อน หรือเกิดการทะลุเข้ามาตามร่องตัววีก็ได้ ลวดลายอะลูมิเนียมที่อยู่บนอุปกรณ์ไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ ในกรณีที่เกิดจากการขยายตัวนั้นไม่มีวิธีอื่นใดแก้ไขนอกจากอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อผิดพลาดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทักษะในการประกอบชุดป้องกันก่อนลงไปกักจริง แต่สำหรับการรั่วตามร่องตัววีนันต้องเติมสารเจือชนิดเอ็นลงในร่องเพื่อให้เกิดรอยต่อพีเอ็นในร่อง ซึ่งเมื่อไคอะแฟรมถูกกัดมาจนบรรจบรอยต่อพีเอ็นดังกล่าวจะเกิดสัญญาณหยุดกักได้เช่นเดียวกัน แต่ปัญหาที่พบคือรอยต่อที่เกิดจากกันหลุมของร่องตัววี จะมีพื้นที่เล็กกว่ารอยต่อของชั้นอีพีแทกเรียบมาก ดังนั้นจึงอาจเกิดการหยุดกักได้เพียงชั่วคราว และเปลี่ยนเป็นการรั่วได้ในเวลาเพียง 2-3 นาที ซึ่งอาจกักต่อไปด้วยสารละลายไฮดราซีนซึ่งไม่กัดอะลูมิเนียม แต่สารละลายไฮดราซีนจะทำลายไคอะแฟรมซิลิกอนอย่างมาก ดังนั้นไฮดราซีนอาจมีความเหมาะสมสำหรับเป็นตัวกักต่อจาก KOH ได้อีกไม่เกิน 15 นาที

สารละลายไฮดราซีนแม้ว่าจะมีอัตราการกัดซิลิกอนสูงที่สุดโดยไม่จำเป็นต้องสร้างชั้นป้องกันให้หนาถึง 1.5 ไมครอนเช่นเดียวกับ KOH แต่มีคุณภาพการกัดที่ต่ำที่สุดซึ่งนอกจากจะทำลายไคอะแฟรมให้เป็นร่องรอยมากมายแล้วยังกัดชั้นออกไซด์ให้เป็นร่องรอยที่ไม่สามารถคาดคะเนได้โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นสูง ซึ่งพบว่าการใช้ไฮดราซีนไม่สามารถควบคุมการกัดได้เลย แต่ไฮดราซีนมีข้อดีคือถ้าเติมเศษชิ้นซิลิกอนลงไปในสารละลายก่อนลงกัดชิ้นงานจริง จะสามารถป้องกันการกัดแพทเทิร์นอะลูมิเนียมได้ ซึ่งในบางครั้งอาจจะไม่กัดอะลูมิเนียมเลย ดังนั้นในกรณีที่เกิดด้วยไฟฟ้าเคมีและเกิดการรั่วขึ้นในชุดกักก็สามารถยุติการกัดลงทันทีและใช้สารละลายไฮดราซีนเป็นสารละลายกัดตัวต่อไป สารละลายไฮดราซีนที่ความเข้มข้นสูงจะมีอัตราการกัดที่สูงและมีคุณภาพที่ดีกว่าสารละลายที่เข้มข้นน้อยกว่า แต่ที่ความเข้มข้นต่ำก็จะไม่ทำลายออกไซด์ ไฮดราซีนจึงไม่เหมาะสมสำหรับการกัดไคอะแฟรม ถ้าต้องการสร้างอุปกรณ์ซึ่งต้องอาศัยหน้ากากชั้นออกไซด์ที่หนาเพียง 5000 อังสตรอม ควรใช้สารละลาย EPD สำหรับกัดไคอะแฟรมและใช้ KOH สำหรับกัดร่องตัววี หรือหลุมที่ลึกไม่เกิน 20 ไมครอน แต่ถ้าเลือกความหนาออกไซด์มากกว่า 1.5 ไมครอนควรเลือก KOH สำหรับกัดไคอะแฟรมทั้งนี้เนื่องจาก EPD เกิดปัญหาจากความลาดเอียง นอกจากนี้ไม่ควรกวนสารละลายในช่วงโมเมนต์สุดท้ายของการกัดเนื่องจากจะเป็นอันตรายต่อการโครงสร้างของอุปกรณ์ได้ ข้อเสนอแนะสำหรับการเตรียมชุดทดลองกักก็คือไม่ควรกวนสารละลายโดยตรง ควรควบคุมอุณหภูมิของสารละลายจากภายนอกภาชนะที่ใส่สารละลายด้วยระบบหล่อน้ำร้อนภายนอกภาชนะกักซึ่งผู้เขียนจะพัฒนาต่อไป

ปัญหาอีกประการก็คือการชดเชยมุมที่เหมาะสมกับสารละลายแต่ละชนิดเนื่องจากสารละลาย EPD และ KOH มีอัตราการเซาะมุมไม่เท่ากัน ขนาดของมุมชดเชย W ที่เหมาะสมสำหรับการกัดหลุมลึก 380 ไมครอนขึ้นไปเท่ากับ 440 และ 400 ไมครอนสำหรับ EPD และ KOH ตามลำดับ

การกัดด้วยพลาสมาไวปฏิกิริยาของก๊าซ SF_6 ถูกนำมาใช้เสริมการกัดด้วยไฟฟ้าทั้งนี้เนื่องจากต้องการตัดปัญหาการรั่วของสารละลายกัด แต่พลาสมาสามารถทำลายชั้นออกไซด์ได้เร็วกว่ากรณีสารละลายดังนั้นไม่สามารถใช้ชั้นออกไซด์เป็นมาสก์ป้องกันการกัดจากพลาสมาได้ ในงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิจัยนี้โดยเฉลี่ยเมื่อเกิดการรั่วของสารละลาย จะใช้พลาสติกเสริมการกักอีกเพียง 1-2 นาทีก็สามารถสร้างโครงสร้างคานและมวลโดยสมบูรณ์ได้

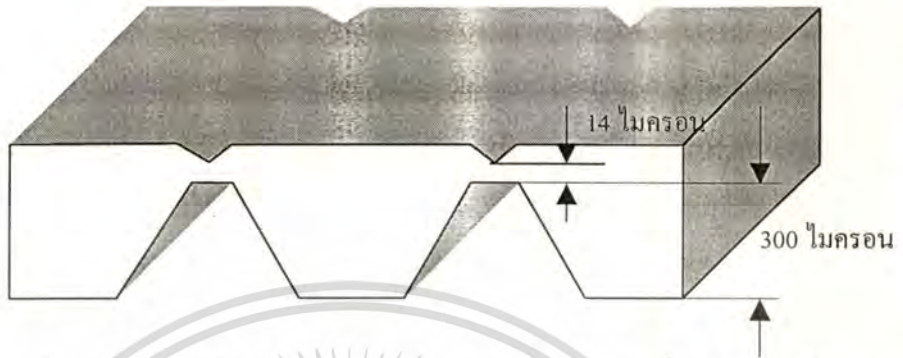
ปัญหาทางด้านโครงสร้างของคานยื่นและมวลตรวจสอบเกิดจากการวางแพทเทิร์นไม่ตรงตามทิศทาง <110> ตามทฤษฎีได้ ในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์นี้ไม่มีอุปกรณ์วัดระนาบหรือทิศทางที่แน่นอนของผลึกได้เลย ซึ่งแม้ว่าจะไม่เป็นปัญหาใหญ่สำหรับอุปกรณ์ที่มีเพียงโครงสร้างแบบไดอะแฟรมหรือจะเป็นปัญหาที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สภาพต้านทานเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ (ตามทฤษฎี) แต่จะเป็นปัญหาอย่างมากกับโครงสร้างของคานยื่นที่มีมวลตรวจสอบขนาดใหญ่ การ misalignment จะเกิดขึ้นตั้งแต่การกัดแผ่นผลึกครั้งแรกสุด รอยหักที่เกิดจากการตัดไม่ตรงทิศทาง <110> จะมีลักษณะซิกแซกไม่เป็นเส้นตรงชัดเจนทำให้ไม่สามารถวางซ้อนแพทเทิร์นมาส์กต่างๆ ได้ตรงทิศทาง ซึ่งจะพบปัญหาได้ชัดเจนว่ามวลตรวจสอบที่เกิดจากการกัดมีลักษณะไม่ตรงตามที่ต้องการ ในบางครั้งมวลตรวจสอบจะมีขนาดเล็กเกินกว่าที่ออกแบบมาก หรือในบางครั้งก็เกิดการ Overcompensate จนทำให้มวลตรวจสอบไม่ถูกกัดแยกออกจากไดอะแฟรม วิธีแก้ไขสำหรับกรณีนี้ไม่มี แต่อาจเลี่ยงโดยการออกแบบให้ร่องด้านหน้ากว้างกว่า 40 ไมครอนแต่จะเป็นการเพิ่มพื้นที่สำหรับสร้างชิพ

ความบอบบางของคานที่บางเพียง 5 ถึง 10 ไมครอนเท่านั้นนับเป็นปัญหาของโครงสร้างเช่นกัน การเคลื่อนย้ายและตัดแยกชิพออกจากกันจำเป็นต้องระมัดระวังเป็นอย่างสูง เทคนิคการเสริมความแข็งแรงด้วย Yellow wax ก่อนการตัดแยกจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในการออกแบบมาส์กจำเป็นต้องมี scribe line เพื่อให้การหักแยกเป็นไปได้ แต่ก็กลายเป็นข้อเสียในขณะเดียวกันเนื่องจากโครงสร้างตาข่ายของแนวหักชิพนี้จะทำให้แผ่นเวเฟอร์โดยรวมเสี่ยงต่อการแตกหักซึ่งอาจเกิดตั้งแต่ขั้นตอนกัดนั่นเอง ดังนั้นวิธีแก้ไขก็ต้องออกแบบให้ scribe line มีความกว้างเพียง 10 ไมครอนซึ่งจะถูกกัดเป็นร่องตัววีที่ลึกไม่เกิน 3 ไมครอน จากประสบการณ์ของผู้เขียนเองได้เปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบมาส์กหลายครั้งพบว่าสิ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดมากที่สุดคือ การไม่สามารถแยกชิพออกจากแผ่นเวเฟอร์ได้ ถ้าต้องการออกแบบให้สามารถหักแยกชิพได้อย่างสะดวกโครงสร้างของแผ่นเวเฟอร์ก็จะบอบบางและเสี่ยงต่อความเสียหายมากขึ้น แม้ว่าจะตั้งใจให้ชิพหักแยกตามแนว scribe line แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างของอุปกรณ์จะเกิดแนวหักแยกที่บอบบางกว่าขึ้นทำให้ไม่สามารถหักด้วยมือได้ การขยายขนาดของชิพรวมทั้งการสร้างเครื่องมือหักแยกเป็นพิเศษจึงเป็นวิธีที่ถูกต้อง พบว่าการขยายพื้นที่ชิพจาก 3×3 มิลลิเมตร² เป็น 6×6 มิลลิเมตร² จะทำให้การหักแยกเป็นไปอย่างปลอดภัยขึ้นแต่จะสูญเสียพื้นที่สำหรับอุปกรณ์ไป แต่วิธีที่รับประกันความเสียหายที่ดีที่สุดคือไม่ควรกัดร่องด้านหลังจนทะลุมาด้านหน้าในขั้นตอนเดียว แต่ควรกัดให้ลึกประมาณ 350 ไมครอนเท่านั้น ซึ่งเกือบชนร่องด้านหน้าที่ระยะ 20 ถึง 30 ไมครอนดังรูปที่ 6.1 ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ในการควบคุมเวลาในการกัดด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นอย่างสูง หลังจากนั้นต้องเสริมโครง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างที่ขอบบางด้วย Yellow wax ก่อนที่จะนำไปตัดแยกด้วยเลื่อย SAW ต่อไป และจะกัดต่อด้านหลังต่อไปด้วย RIE จนพบว่าโครงสร้างของคานาได้เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์



รูปที่ 6.1 หลุมด้านหลังควรถูกกัดลึกประมาณ 300 ไมครอนเพื่อลดความเสี่ยงต่อความเสียหาย

ปัญหาที่เป็นสิ่งสำคัญอีกประการสำหรับการสร้างก็คือความสะอาดของกระบวนการ แม้ดูเหมือนว่าการสร้างอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยตัวต้านทานเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่ต้องการควบคุมสิ่งแวดล้อมในกระบวนการเช่นเดียวกับการสร้างอุปกรณ์ประเภท MOS แต่ในความจริงกลับเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่งกว่ากรณี MOS เสียอีก ซึ่งปัญหาจะเริ่มตั้งแต่การสร้างมาส์กกระจกชั้นแบบ ร่องรอยของฝุ่นละอองบนมาส์กจะเป็นบ่อเกิดของ hillock จำนวนมากมายหลังจากการกัดด้วยสารเคมี hillock เหล่านี้เองทำให้โคอะเฟรมเกิด hillock ขึ้นเช่นกันและเป็นสาเหตุให้โคอะเฟรมทะลุในบางจุดเมื่อต้องการกัดโคอะเฟรมที่บางมากๆ (ต่ำกว่า 10 ไมครอน) นอกจากนี้ปัญหาจากสิ่งแปลกปลอมยังทำให้อัตราการกัดทั้งของ EPD และ โดยเฉพาะ KOH เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเป็นอย่างมาก คราบไขมันจากการล้างด้วยอะซิโตนหรือไตรคลอโรเอทิลีนทำให้อัตราการกัดเปลี่ยนแปลง ในบางครั้งทำให้เกิดคราบสีน้ำตาลไม่สะท้อนแสงเกิดขึ้นที่ผิวหน้าซิลิกอนซึ่งจะป้องกันการกัดจากสารเคมีทุกประเภทไม่ว่าจะเป็น BHF, KOH หรือ EPD แต่สามารถกำจัดด้วย RIE ของ SF_6 แต่เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองจนเกินไป ดังนั้นถ้าไม่มีอุปกรณ์ RIE แล้วจำเป็นต้องกำจัดงานที่เสียออกไป การทำความสะอาดสารเคมีทั้งก่อนและหลังการกัดด้วย KOH หรือ EPD นั้นต้องการน้ำบริสุทธิ์จำนวนมาก

หลังการกัดด้วย KOH จำเป็นต้องกำจัดออกไซด์ทิ้งไปทั้งนี้เพื่อป้องกันอะตอมไฮโดรเจนแปลกปลอมในกระบวนการ แต่การสร้างออกไซด์อีกหลายครั้งเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาของ Thermal cycle ขึ้นและจะสะสมในรูปความเค้นตกค้าง (Residual stress) ในออกไซด์และในโครงสร้างคานาขึ้นซึ่งพบว่าการหักเสียหายได้ง่าย ดังนั้นในกระบวนการเพื่อสร้างตัวต้านทานควรใช้อุณหภูมิสูงแต่ใช้เวลาที่สั้นลง แต่การสร้างชั้นออกไซด์สำหรับป้องกัน KOH ต้องใช้เวลายาวนานเนื่องจากต้องการออกไซด์ที่หนามากกว่า 1.5 ไมครอน ดังนั้นเมื่อการกัดครั้งสุดท้ายสิ้นสุดลง ควรกำจัด

ออกไซด์เหล่านี้ด้วย RIE แต่การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ผ่านกระบวนการที่มากครั้งขึ้นก็เป็นการเพิ่มไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสี่ยงต่อความเสียหายเช่นกัน และความหนาไดอะแฟรมน้อยที่สุดสามารถสร้างได้อย่างปลอดภัยคือ 14 ไมครอนซึ่งประมาณเท่ากับความหนาของชั้นอีพ็อกซี

ขั้นตอนการแพร่สารเจือปนเป็นปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งกำเนิดสารเจือปนหลายหรือเสื่อมสภาพ ทำให้ไม่สามารถประกันได้ว่าตัวต้านทานทุกตัวจะมีค่าที่เท่ากันหรืออย่างน้อยที่สุดก็ควรมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ในบางครั้งไม่สามารถกำจัด BSG หลังจากการแพร่ให้หมดไปจากวินโดว์คอนแทกทำให้อุปกรณ์ตัวต้านทานใช้งานไม่ได้ซึ่งนับเป็นปัญหาอย่างมาก แม้ว่าอุปกรณ์บางตัวจะมีโครงสร้างคานและมวลเป็นที่น่าพอใจแต่ก็อาจพบว่าตัวต้านทานใช้งานไม่ได้เนื่องจากวินโดว์คอนแทกมีฉนวนกันนั่นเอง

ชิพตัวตรวจจับอัตราเร่งที่นำมาวิเคราะห์จะมีขนาดความกว้างของคานเท่ากับ 320 ไมครอน และมีความยาว 300 ไมครอน ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรวัดไดโนมิตรีที่มีการปรับสมดุลของแรงดันเอาต์พุตก่อนให้แรงกระทำแก่ระบบ การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะเชิงกลของตัวตรวจจับอัตราเร่งเริ่มจากการให้อิมพัลส์ที่เกิดจากพลังงานเสียงแก่คานและมวลโดยตรงซึ่งคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบเท่ากับ 5.05 กิโลเฮิร์ตซ์ และเมื่อพลอตกราฟระหว่างสัญญาณของขดลวดลื่นสูงสุดที่เกิดจากการตอบสนองต่ออิมพัลส์และแรงที่เกิดจากพลังงานเสียงที่มาตกกระทบชิพจะคำนวณความหนาของคานได้เท่ากับ 10.02 ไมครอนซึ่งต่างจากการวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา (14.14 ไมครอน) เท่ากับ 29.13% และคำนวณมวลได้เท่ากับ 0.48 มิลลิกรัม ซึ่งแตกต่างจากมวลที่มีขนาดสมมุติตามที่ออกแบบไว้ (1.063 มิลลิกรัม) เท่ากับ -54.84% หรือแตกต่างจากมวลตามที่ออกแบบแต่ถูกกัดเซาะมุมจนเหลือมวลประมาณ 60% (0.637 มิลลิกรัม) เท่ากับ -24.64% และคำนวณความไวต่ออัตราเร่งได้เท่ากับ 20.084 mV/g ภายในช่วงเชิงเส้นตั้งแต่ 2.26 ถึง 1.56g และตอบมีช่วงตอบสนองความถี่ราบเรียบเท่ากับกึ่งหนึ่งของความถี่ธรรมชาติคือ 1.25 กิโลเฮิร์ตซ์ การขยายขอบเขตการตอบสนองต่ออัตราเร่งของอุปกรณ์ตัวตรวจจับอัตราเร่งสามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้าง การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน การเก็บบรรจุที่มีประสิทธิภาพซึ่งสามารถป้องกันอันตรายต่อโครงสร้างจากแรงและสิ่งปนเปื้อนต่างๆหรือความชื้นจากอากาศ รวมถึงการเลือกระบบของเครื่องมือวัดที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ การจัดการทดลองวัดในวิธานิพนธ์นี้มีสัญญาณรบกวนสูงสุดประมาณ 20 ไมโครโวลต์ ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ สิ่งหนึ่งที่เป็นควรแก้ไขเป็นอย่างยิ่งก็คือการไม่เก็บบรรจุอุปกรณ์ซึ่งนอกจากจะสร้างความเสียหายแก่คานแล้วยังมีผลจากสัญญาณรบกวนจากอากาศรอบๆอุปกรณ์ด้วย

อย่างไรก็ดีเทคนิควิธีการสร้างหรือวิธีการวัดข้อมูลในวิธานิพนธ์ฉบับนี้ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกหลายประการซึ่งต้องการเครื่องมือและงบประมาณจำนวนมาก อาทิ โพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) หัววัดอัตราเร่งที่มีความละเอียดสูง เครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง และเครื่องมือสอบเทียบสัญญาณอัตราเร่ง เป็นต้น ผู้เขียนหวังว่าการศึกษาการสร้างตัวตรวจจับอัตราเร่งสำหรับประเทศไทยยังคงดำเนินต่อไปได้ในภายภาคหน้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cyril M. Hearris, Charles E. Crede, *Shock And Vibration Handbook* , vol.1
Mc Graw-Hill, 1961, pp.(1-9)-(1-10).
- [2] James W. Dally, William F.Tilly, Kenneth G. McConnel, *Instrumentation for Engineering Measurement*, John Willey&Sons, 1984, pp.292-2.
- [3] M.Tabib-Azar, A. Garcia – Valenzuela, “ Sensoring means and sensor shells: a new method of comparative study of piezoelectric, piezoresistive, electrostatic, magnetic, and optical sensors,” *Sensors and Actuators A* 48(1995),pp.87-100.
- [4] Jan Söderkvist, “Micromachined gyroscopes,” *Sensors and Actuators A* 43 (1994) 65-71.
- [5] Gropel, W., Hesse I, Zemel, J.N,editors, *Sensors: A Comprehensive Survey*, vol.7, VCH Publication, 1994, pp.340.
- [6] Lynn Michelle Roylance, James B. Angell, “ A batch-fabricated silicon accelerometer,” *IEEE Trans. On Electron Devices*, vol.Ed-26, No.12, Dec.1979, p.1911-1917.
- [7] Nwaboso O.,Cristopher, *Automotive Sensory Systems*, Chapman & Hall, 1993, pp.163-164.
- [8] S. Middelhoek, Audet, S.A., *Silicon Sensors*, Academic Press, 1989, p.113.
- [9] Singh Jasprit, *Optoelectronics*, Mc. Graw Hill Press, 1996, p,131-150.
- [10] Wang Z.Z, Suski J., Collard D., “Silicon piezoresistive modeling: application to the simulation of MOSFETs,” *Sensors and Actuators A* 46-47(1995), p.628-631.
- [11] Charles S. Smith, “ Piezoresistance effect in germanium and silicon,” *Physical Review*, April 1, 1954, p.42-49.
- [12] H.C.J.M. Van Gestel, *et al*, “ On-chip piezoresistive stress measurement in three dimensions,” *Sensors and Actuators A* 25-27(1991) 801-807.
- [13] Yazo Kanda, “Graphical representation of the piezoreisistance coefficients in silicon,” *IEEE Tans. On Electron Devices*, vol.Ed-29, No.1, Jan.1979, p.1911-1917.
- [14] Kloeck,Ben, in *Sensors: A Comprehensive Survey*, VCH Pub. Vol.7(Mechanical sensors), 1994, 146-171.
- [15] Khazan, A.D., “ Transducers and their elements,” PTR Prentice Hall, 1994, p.299.
- [16] Chu, W.H. and Mehregany, M. , “A study of residual stress distribution through the thickness of p+ silcon films,” *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol.Ed-40, No.7, July 1993, p.1245-1250.
- [17] Yamada, K., *et al*, “ Nonlinearity of piezoresistance effect of p-type silicon diffused layers,” *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol.Ed-29, No.1, Jan.1982, p.71-75.
- [18] Wright, C.P., *Application Measurement Engineering*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1995, p.133.
- [19] Diem, B., Rey, P., *et al*, “ SOI ‘SIMOX’; From bulk to surface micromachining a new age for sensors and actuators,” *Sensors and Actuators A* 46-47(1995), p.8-16.
- [20] Ott, H.W., *Noise Reduction Techniques in Electronics Systems*, Mc.Graw-Hill, 1986, p.198.
- [21] *Designer's Reference Manual*, Analog Device, 1996, p.7-8.

- [22] Chen.H., Shen, S., Minhang B., "Over-range capacity of a piezoresistive microaccelerometers," *Sensors and Actuators A* 48(1997), p.197-201.
- [23] Timo Veijolam Heikki Kuisma, *et al.*, "Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer," *Sensors and Actuators A* 48 (1995), p.239-248.
- [24] Karsten Sager, *et al.*, "Ambient humidity and moisture - a decisive failure source in piezoresistive sensors," *Sensors and Actuators A* 46-47 (1995), p.171-175.
- [25] Kurt E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Proceeding of the IEEE*, vol.70, No.5, May 1979. pp.420-456.
- [26] Gardner, Julian.W, *Microsensors: Principles and Applications*, John Willey&Sons, 1994, pp.47.
- [27] H. Camon, Z. Moktadir, "Atomic scale simulation etched in aqueous KOH solution," *Sensors and actuators A* 46-47 (1995) pp.27-29.
- [28] O.Than and S. Buttgenbach, "Simulation of anisotropic chemical of crystalline silicon using a cellular automata model," *Sensors and Actuators A* 45(1994) pp.85- 89.
- [29] W.R Runyan, " *Semiconductor Measurements and Instrumentation*," Mc.Graw Hill, 1975.
- [30] Hubbard Ted J. and Antonsson Erik K, "Emergent faces in crystal etching," *J. of Microelectromechanical systems*, vol.3, No.1, March 1994, pp.19 - 28.
- [31] Xiang-ping Wu, Ko Weh H., "Compensation corner undercutting in anisotropic etching of (100) silicon," *Sensors and Actuators A* 12, 1989, pp.207-215.
- [32] Wen H. Ko,James T. Sumino, *et al*, in "Semiconductor Integrated Circuit Technology and Micromachining" from *Sensors: A Comprehensive Survey*, vol.1,VCH Publication, ,1989, pp.149.
- [33] Ernest Bassous, "Fabrication of novel three- dimensional microstructures by the anisotropic etching of (100) and (110) silicon," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-25, NO.10, October 1978, pp.1178-1183.
- [34] Kenneth E. Bean, "Anisotropic Etching of silicon," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-25, NO.10, October 1978, pp.1185-1193.
- [35] Runyan, W.R., *Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology*, Wesley Company, 1990, pp.269-290.
- [36] Wolf Stanley and Tauber Richard N. Editors, *Silicon Processing For VLSI ERA*, vol.1 , Lattice Press, 1986, pp.546.
- [37] Rossnagel M. Stephen, *Handbook of Plasma Processing Technology*, NOYES Publications USA.,1990, pp. 203.
- [38] Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, John Willey & Sons, 1983, p.839.
- [39] ศรีเมษ รัตนชัย และคณะ. 2534 "การศึกษาเทคนิคการควบคุมความหนาไดอะแฟรมของซิลิกอนในสารละลาย EPD" การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 , พ.ศ. 2534 , หน้า 2-136 ถึง 2-142.
- [40] ศรีเมษ รัตนชัย และคณะ 2539 "ข้อพิจารณาเชิงเรขาคณิตของการกัดส่วนมวลของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอนระนาบ (100)" การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, พ.ศ.2538 , หน้า 521-527 .
- [41] Ballou, Glen M., Editor, *Handbook For Sound Engineers: Second Edition*, SAMS, 1961.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

หน่วยมาตรฐานสากล

ปริมาณ	หน่วย	สัญลักษณ์
ความยาว	เมตร	m
มวล	กิโลกรัม	kg
เวลา	วินาที	s
อุณหภูมิ	เคลวิน	K
กระแส	แอมแปร์	A
ความถี่	เฮิรตซ์	Hz
แรง	นิวตัน	N
ความดัน	ปาสคาล	Pa
พลังงาน	จูลล์	J
กำลังไฟฟ้า	วัตต์	W
ประจุไฟฟ้า	คูลอมบ์	C
ความต่างศักย์	โวลท์	V
ความนำ	ซีเมนส์	S
ความต้านทาน	โอห์ม	Ω
ความจุไฟฟ้า	ฟารัด	F

ภาคผนวก ข
ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ปริมาณ	สัญลักษณ์	ค่า
อังสตรอม	$\text{\AA}$	$10^{-4} \mu\text{m} = 10^{-8} \text{cm}$
ค่าคงที่ อาโวกาโดร	N_{AVO}	$6.02204 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
รัศมีของบอห์	a_B	$0.52917 \text{\AA}$
ค่าคงที่โบลซ์มาน	k	$1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K (R/N}_{\text{AVO}})$
ค่าประจุไฟฟ้า	q	$1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$
มวลนิ่งของอิเล็กตรอน	m_0	$0.91095 \times 10^{-30} \text{ kg}$
อิเล็กตรอนโวลต์	eV	$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$
ค่าคงที่ของก๊าซ	R	$1.98719 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Permeability in vacuum	μ_0	$1.25663 \times 10^{-8} \text{ H/cm}(4\pi \times 10^{-9})$
Permittivity in vacuum	ϵ_0	$8.85418 \times 10^{-14} \text{ F/cm}(1/\mu_0 c^2)$
ค่าคงที่ แพลงค์	h	$6.62617 \times 10^{-34} \text{ J-s}$
Reduced Planck constant	$\hbar$	$1.05458 \times 10^{-34} \text{ J-s}(\hbar/2\pi)$
มวลนิ่งของโปรตอน	M_p	$1.67264 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Speed of light in vacuum	c	$2.99792 \times 10^{10} \text{ cm/s}$
Standard atmosphere		$1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
Thermal voltage at 300 k	kT/q	0.0259 V
Wavelength of 1-eV quantum	λ	$1.23977 \mu\text{m}$
อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	g	9.806 m/s^2

ภาคผนวก ค
คุณสมบัติของซิลิกอนที่ 300 เคลวิน

คุณสมบัติ	ค่าคงที่
Atom/cm ³	5.0×10^{22}
Atomic weight	28.09
Breakdown field (V/cm)	3×10^5
Crystal structure	Diamond
Density (g/cm ³)	2.328
Dielectric constant	11.9
Effective density of states in conduction band , N_c (cm ⁻³)	2.8×10^{19}
Effective Mass , m^*/m_0	
Electrons	$m^*_e = 0.98$, $m^*_c = 1.09$
Holes	$m^*_{hh} = 0.16$ $m^*_{hh} = 0.49$
Electrons affinity , χ (V)	4.05
Energy gap (eV) at 300K	1.12
Intrinsic carrier concentration (cm ⁻³)	1.45×10^{10}
Intrinsic Debye length (μ m)	24
Intrinsic Resistivity (Ω -cm)	2.3×10^5
Lattice constant ($\text{\AA}$)	5.43095
Linear coefficient of thermal expansion, $(\Delta L / (L \Delta T)) (^{\circ}\text{C}^{-1})$	2.6×10^{-6}
Melting point ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1415
Minority carrier lifetime (s)	2.5×10^{-3}
Mobility drift (cm ² /V-s)	1500 , 450
Optical-phonon energy (eV)	0.063
Phonon mean free path λ_0 ($\text{\AA}$)	76 (electron) 55 (hole)
Specific heat (J/g- $^{\circ}\text{C}$)	0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermal conductivity at 300 K (W/cm-°C)	1.5
Thermal diffusivity (cm²/s)	0.9
Vapor pressure (Pa)	1 at 1650°C
	10 ⁻⁶ at 900°C



ภาคผนวก ง

การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

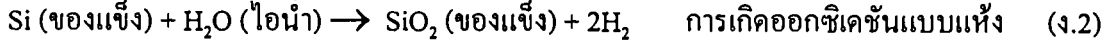
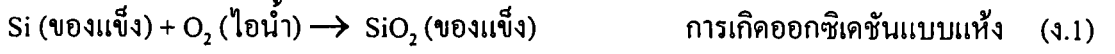
กระบวนการเกิดออกไซด์บนซิลิกอนนั้นเรียกว่ากระบวนการออกซิเดชัน ออกไซด์บนซิลิกอนสามารถสร้างได้โดยวิธีการต่างๆมากมาย โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้การสร้างด้วยการให้ความร้อนแก่ซิลิกอนโดยตรงภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนหรือไอน้ำ ซึ่งจะได้ชั้นออกไซด์ที่มีความหนาออกไซด์ประมาณ 60 ถึง 15000 อังสตรอม ในวิทยานิพนธ์นี้ SiO_2 มีหน้าที่สองประการคือ (1) เป็นหน้าากปกป้องการแพร่สารเจือ (diffusion mask) และ (2) เป็นหน้าากป้องกันการกัดจากสารเคมีคุณสมบัติของแก้วซิลิกา

แก้ว หรือ อสังฐานของ SiO_2 นั้น มีชื่อเรียกว่าซิลิกาหลอมละลาย (fused silica) หรืออาจเรียกว่า ควอตซ์หลอมละลาย (fused quartz) ก็ได้ SiO_2 นั้นมีทั้งสถานะที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ถ้าอยู่ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 1710°C และจะมีสัณฐานเป็นผลึกถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1710°C ทั้งสองสถานะสามารถเปลี่ยนแปลงสถานะไปมาเมื่อข้ามอุณหภูมิดังกล่าว สถานะที่เป็นอสัณฐานมีความหนาแน่น ($2.15\text{-}2.25 \text{ g/cm}^3$) ต่ำกว่าสัณฐานของผลึก (2.65 g/cm^3) การที่มีโครงสร้างหนาแน่นต่ำกว่าจะเปิดโอกาสให้สิ่งเจือปนให้อิออนของโบรอน(B^{3+}) หรือ ฟอสฟอรัส (P^{5+}) เข้ามาแทนที่อะตอมซิลิกอนในเนื้อออกไซด์ได้ และเกิดเป็นแก้วชนิดใหม่ที่มีอะตอมดังกล่าวเป็นผู้สร้างโครงข่าย (network former) กับออกซิเจนขึ้นมาแทน เกิดเป็น B_2O_3 หรือ P_2O_5 สิ่งเจือปนอื่นๆ อาทิ Na K Pb หรือ Ba จะเข้าไปเป็นอะตอมแทรก interstitial atoms ระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน ทำให้ความแข็งแรงโครงข่ายลดลง อะตอมแปลกปลอมดังกล่าวได้เข้าไปเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเล็กน้อยจึงถูกเรียกว่า network modifier ซึ่งอาจจะทำให้อะตอมอื่นๆสามารถแพร่ผ่านเนื้อออกไซด์ได้มากขึ้น

การสร้างออกไซด์ด้วยไอน้ำนั้น นับเป็นการสร้างสิ่งเจือปนเข้าไปในเนื้อออกไซด์โดยตรง ไอน้ำจะรวมตัวกับออกซิเจนในโครงข่ายเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลขึ้นแทนที่ ทำให้โครงสร้างของแก้วอ่อนแอลงเช่นกัน

จลนศาสตร์ของกระบวนการออกซิเดชัน

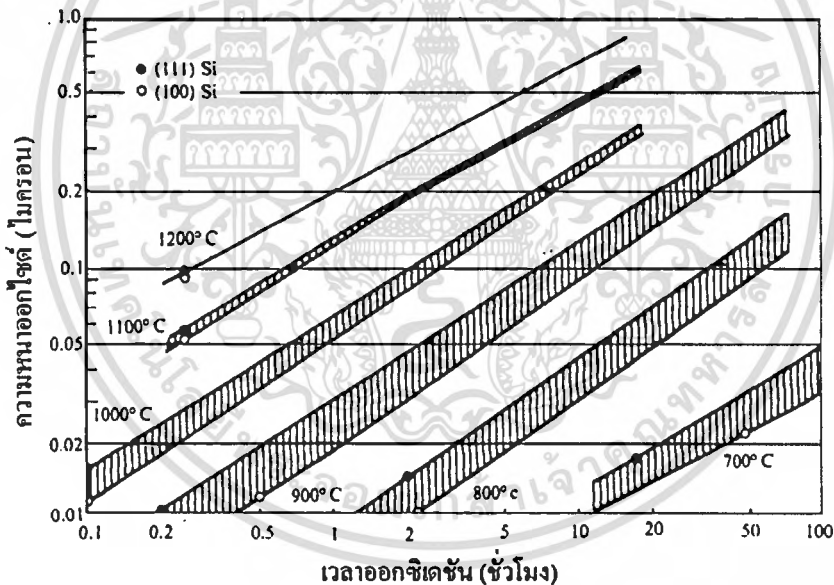
ซิลิกอนเมื่อสัมผัสกับอากาศที่มีออกซิเจนหรือไอน้ำจะเกิด SiO_2 ได้โดยง่ายแม้ที่อุณหภูมิห้อง (หนาประมาณ 20 อังสตรอม) และจะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงกว่ามากมายถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์เป็นไปดังนี้ คือ



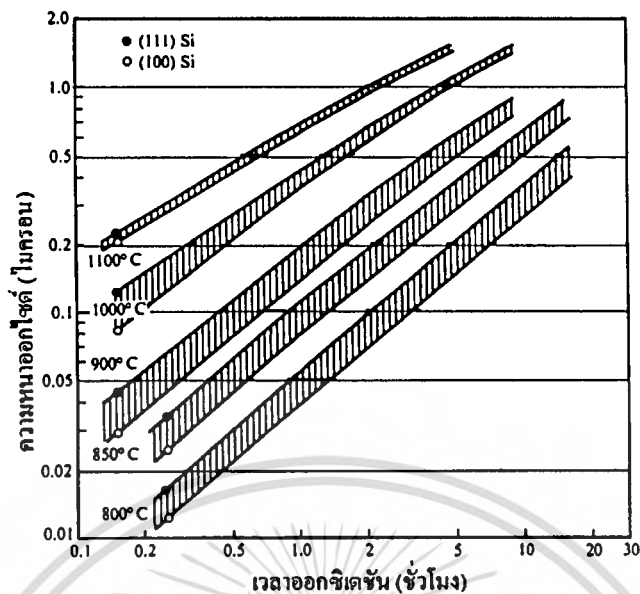
หลังจากที่เกิดออกไซด์ในชั้นแรก ตัวออกซิเจน เช่น O_2 หรือ H_2O จะแพร่ผ่านออกไซด์ชั้นที่ 1 และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไปที่ผิวรอบตัวของ Si/SiO_2 ถ้าความหนาของ SiO_2 ทั้งหมดนั้น เท่ากับ t_{ox} อัตราส่วน 54% จะเป็นออกไซด์ที่เกิดเหนือผิวซิลิกอนดั้งเดิม และอีก 46% จะเป็นออกไซด์ที่เกิดขึ้นใต้ผิวซิลิกอนดั้งเดิม

เนื่องจากซิลิกอนและออกไซด์บริเวณรอยต่อมีความแตกต่างกันมาก ออกไซด์จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าจึงถูกบีบรัดจากเนื้อซิลิกอนที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเกิดเป็นความเค้นอัด (compressive stress) ซึ่งมีขนาดประมาณ 3×10^9 dyne/cm² ณ อุณหภูมิห้อง แต่จะมีค่าสูง ($\sim 7 \times 10^9$ dyne/cm²) ที่อุณหภูมิ ประมาณ 950°C ดังนั้นโครงสร้างภายในจึงไม่ปลอดภัยถ้าใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยมีแนวโน้มว่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นถ้าชั้นออกไซด์อยู่ด้านบน

รูปที่ ง.1 และ ง.2 เป็นกราฟแสดงความหนาออกไซด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่สร้างด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง และแบบชื้นตามเวลา ตามลำดับ



รูปที่ ง-1 ความหนาออกไซด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ของกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง[35]



รูปที่ ง-2 ความหนาออกไซด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ของกระบวนการออกซิเดชันแบบชั้น[35]

เมื่อต้องการทราบความหนาออกไซด์โดยรวม เช่น ถ้าต้องการออกซิเดชันแบบแห้ง 2 ชั่วโมง และต่อเนื่องด้วยการออกซิเดชันแบบชื้นอีก 2 ชั่วโมงที่ 1100°C ให้พิจารณารูปที่ ง-1 เป็นประการแรก จะพบว่าได้ความหนา ณ 2 ชั่วโมงเท่ากับ 0.2 ไมครอน และให้นำค่า 0.2 ไมครอนไปเป็นค่าเริ่มต้นของรูป ง-2 ซึ่งตรงกับ 0.5 ชั่วโมง และนับต่ออีก 2 ชั่วโมง ($0.5 + 2 = 2.5$ ชั่วโมง) จะพบว่ามีความหนารวมเท่ากับ 0.6 ไมครอน

ภาคผนวก จ

กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน

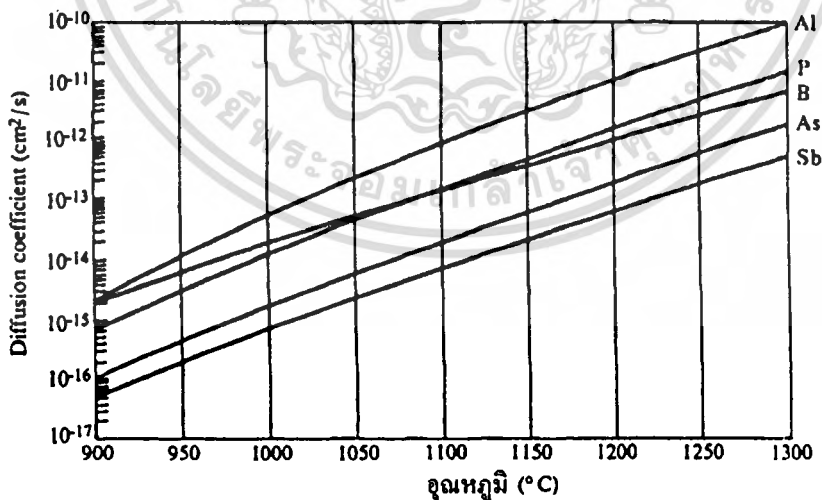
กระบวนการแพร่สารเจือแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ กระบวนการดีโพสิชัน (deposition diffusion) และกระบวนการขับเคลื่อน (drive-in diffusion) กระบวนการดีโพสิชันคือการวางสารกึ่งตัวนำ (เช่น ซิลิกอน) ในบรรยากาศของสารเจือ (เช่น โบรอน หรือ ฟอสฟอรัส) ในช่วงเวลาหนึ่ง ส่วนกระบวนการขับเคลื่อนนั้นก็คือการใช้เพียงพลังงานความร้อน ขับให้สารเจือที่มีอยู่ส่วนหนึ่งในชิ้นงานนั้นๆ ให้ลึกลงไปเนื้อสารกึ่งตัวนำนั้นอีก โดยไม่จำเป็นต้องกระทำภายใต้บรรยากาศของแหล่งกำเนิดสารเจืออีก วิศวกรจะแสดงให้เห็นว่าการกระจายความเข้มข้นของสารเจือในเนื้อสารกึ่งตัวนำจากกระบวนการทั้งสองไม่เท่ากัน

คณิตศาสตร์ของการแพร่

เพื่อความง่ายจะสมมติกระบวนการแพร่เฉพาะใน 1 มิติ (สมมติเป็นแกน x) โดยกฎของฟิคส์ (Fick's Law) ดังนี้

$$F = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (จ.1)$$

เมื่อ N เป็นความเข้มข้นสารเจือ D คือความสามารถในการแพร่ของอะตอมสารเจือ ในรูปที่ จ.1 เป็นกราฟการหาค่า D ณ อุณหภูมิต่างๆของซิลิกอน



รูปที่ จ-1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือชนิดต่างๆในซิลิกอน ณ อุณหภูมิต่างๆ

กระบวนการพรีดีโพสิชัน (Deposition)

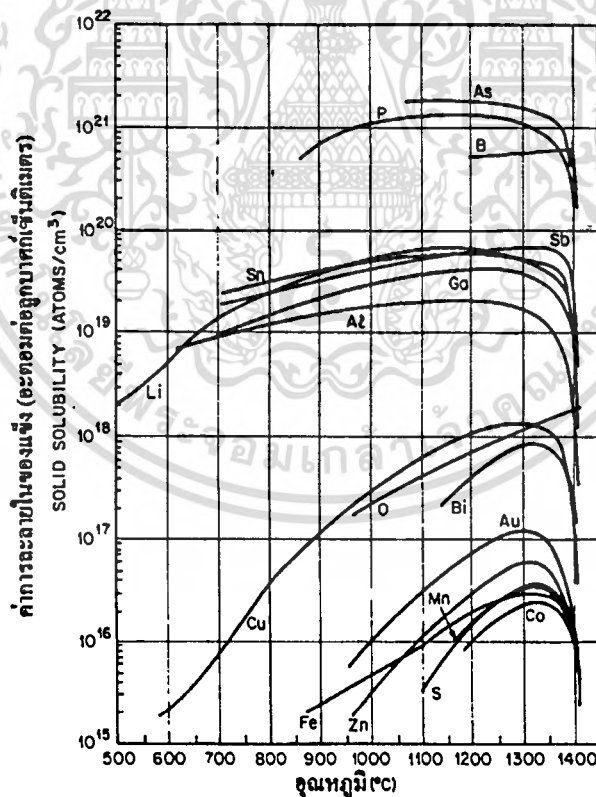
จากสมการความต่อเนื่องและสมมุติฐานว่าสารเจือในซิลิกอนเกิดจากแหล่งกำเนิดสารเจือภายนอกเท่านั้น พาหะที่เกิดจากการเกิดใหม่ (Regeneration carrier) หรือจากการรวมตัวกลับ (Recombination carrier) หรือจากอำนาจสนามไฟฟ้าให้เป็น 0 จะได้สมการการกระจายตัวของความเข้มข้นสารเจือดังนี้

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (จ.2)$$

ถ้ามีเงื่อนไขว่า บริเวณผิวมีอะตอมสารเจืออยู่อย่างสูงที่สุดได้เพียงปริมาณหนึ่ง เรียกว่า Solid solubility (จะขอใช้ตัวแปร N_0) และที่ระยะทาง x ซึ่งมากพอสารเจือที่เดิมจะเป็นศูนย์ ($N(0) = N_0$ และ $N_\infty = 0$) จะได้ผลเฉลยของการแพร่สารเจือเมื่อทำการเติมสารเจือเป็นเวลา t ดังนี้

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (จ.3)$$

ค่า N_0 หาได้จากกราฟในรูปที่ จ-2 ดังนี้

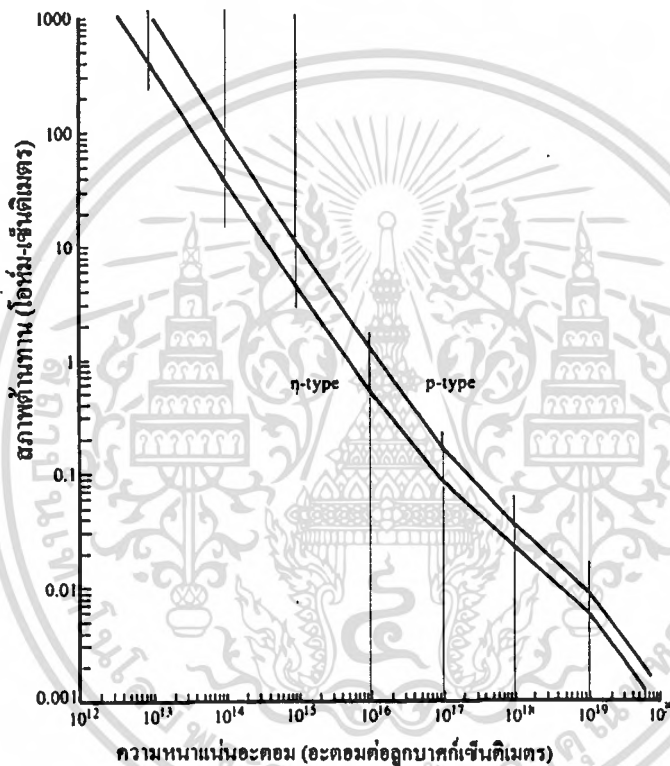


รูปที่ จ-2 Solid Solubility (N_0) ของสารเจือใดๆในซิลิกอน ที่ อุณหภูมิต่างๆ [38]

เมื่อเติมสารเจือลงไปจะเกิดรอยต่อระหว่างสารเจือที่เติมไปใหม่กับสารเจือที่มีอยู่เดิมที่ฐานรอง ถ้าการแพร่ นั้นลงไปได้ลึกที่สุดเท่ากับ x_j ความเข้มข้น ณ จุดนั้นจะเท่ากับความเข้มข้นอะตอมของฐานรอง N_{BC} นั่นเอง ดังนั้นสมการ (จ.3) จะเปลี่ยนแปลงโดยคำนึงถึง N_{BC} ด้วยดังนี้

$$N(x,t) = N_o \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) - N_{BC} \quad (\text{จ.4})$$

จากสมการดังกล่าว สามารถคำนวณหารอยต่อโดยแทนค่า $N(x,t) = N(x_j, t) = N_{BC}$ ซึ่งวิธีหาค่า N_{BC} จากสภาพด้านทานที่วัดได้โดย 4-point probe นั้นให้ดูที่กราฟในรูปที่ จ.3 ดังนี้



รูปที่ จ-3 คำนวณความหนาแน่นอะตอม N_{BC} เมื่อทราบค่าสภาพด้านทาน

บริเวณที่เกิดรอยต่อจะมีเงื่อนไขว่า $N(x_j, t) = N_{BC}$ และจะได้สมการรอยตอดังนี้

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_{BC}}{N_o}\right) \quad (\text{จ.5})$$

ซึ่งในภาคผนวก ฉ ได้แสดงค่าของ complementary error function เพื่อการคำนวณหารอยต่อ x_j หลังจากนั้นจะคำนวณปริมาณสารเจือ(dose) ทั้งหมดที่ถูกเติมลงไปเมื่อผ่านไป t วินาทีคือ

$$Q(t) = \int_0^\infty N(x,t) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_o \sqrt{Dt} \quad (\text{จ.6})$$

กระบวนการขับลึก (Drive-in)

เมื่อนำแหล่งกำเนิดสารเจือออกไปจากระบบ โดยทิ้งผลึกสารกึ่งตัวนำที่ทำการดีโพสิตแล้วไว้ที่อุณหภูมิ T ใดๆ เป็นเวลา t วินาที ปริมาณสารเจือทั้งหมด Q ซึ่งคำนวณไว้ในขั้นตอนฟรีดีโพสิตจะยังคงเดิม (ถ้าไม่ถือว่าเกิดแพร่กลับออกไปสู่บรรยากาศรอบๆ) ความเข้มข้นของสารเจือตามความลึกจะเขียนได้ดังนี้

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt} \quad (จ.6)$$

การกระจายความเข้มข้น $N(x,t)$ จะเป็นแบบเกาส์ หลังจากผ่านกระบวนการขับลึกแล้วความเข้มข้นของพาหะที่ผิวหน้าจะลดลง โดยแทนเงื่อนไข $x = 0$ ดังนี้

$$N(0,t) = \frac{Q(t_p)}{\sqrt{\pi Dt}} \quad \text{ที่เวลา } t > 0 \quad (จ.7)$$

ณ เวลา $t = 0$ จะพบว่า $N(0,0) = N_0$ และความเข้มข้นสารเจือที่ผิวจะมีลักษณะแปรผกผันกับระยะแพร่ L_D

ต่อไปนี้จะเป็นการคำนวณความต้านทานจากการแพร่โบรอน ลงบนเวเฟอร์ซิลิคอนอีพิแทกเซียล ชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตรบนฐานรองชนิดพีที่มีสภาพต้านทานเท่ากับ 5 โอห์ม-เซนติเมตร) ถ้าต้องการเจือสารลงในแพทเทิร์นตัวต้านทานเพ็ชชีที่มีขนาดกว้าง 20 ไมครอนและยาว 200 ไมครอน และกำหนดให้มีความต้านทานเท่ากับ 1 กิโลโอห์มควรจะต้องเลือกเงื่อนไขเวลาและอุณหภูมิอย่างไร

จากบทที่ 2 ตัวต้านทานเพ็ชชีในอุดมคติควรมีรอยต่อที่ตื้นมากหรือประมาณว่าสารเจือทั้งหมดอยู่ที่ผิวเท่านั้น และเพื่อป้องกันความเค้นดก้างในโครงสร้างมากเกินไปจึงไม่ควรแพร่สารเจือหรือผ่านชั้นตอนแพร่สารเจือนานเกินไป ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิในการดีโพสิตที่ 1000°C และอุณหภูมิขับลึกที่ 1100°C จากกราฟรูปที่ จ-1 จ-2 และ จ-3 ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$D_1 = 2 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s} \quad N_0 = 4.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ และ } N_{BC} = 10^{15} \text{ โอห์ม-เซนติเมตร}$$

จากสมการที่ (จ.4) จะคำนวณตัวแปร $\text{erfc}(x_j/2\sqrt{Dt}) = 2.5) = 0.40 \times 10^{-5} = \text{erfc}(3.26)$ ดังนั้นจะมีตัวแปรที่ต้องเลือกเองระหว่างรอยต่อ x_j กับเวลาแพร่สารเจือ t ถ้าเลือกให้เวลาเท่ากับ 1200 วินาที จะคำนวณรอยต่อได้เท่ากับ 0.319 ไมครอนซึ่งถือว่าเล็กพอเมื่อเทียบกับรอยต่อระหว่างชั้นอีพิกับฐานรอง (ซึ่งประมาณ 14 ไมครอน) ทั้งนี้ปริมาณสารเจือทั้งหมดตามสมการที่ (จ.6) จะเท่ากับ $Q = 3.907 \times 10^{15}$ ถ้าขับลึกต่อที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา t_2 ชั่วโมงโดยมุ่งหวังที่ความต้านทานโดยรวมเท่ากับ 1 กิโลโอห์มหรือสภาพต้านทานผิวเท่ากับ 100 Ω

จากกราฟในรูปทั้งสามได้ค่าตัวแปรต่างๆดังต่อไปนี้

$$D_2 = 2 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s} \quad N_0 = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ และ } N_{BC} = 10^{15} \text{ โอห์ม-เซนติเมตร}$$

ในขั้นตอนต่อจากนี้เป็นการคำนวณย้อนกลับซึ่งต้องอาศัยการหาสภาพนำเฉลี่ย $\bar{\sigma}$ ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

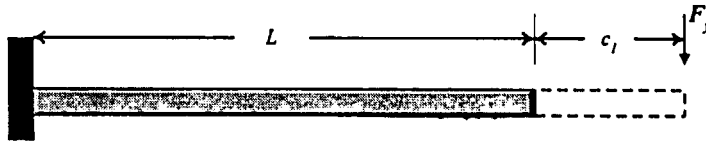
$$\bar{\sigma} = \frac{q}{x_j} \int_0^{x_j} (N - N_{BC}) \mu_p dx \tag{จ.8}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{q}{x_j} \int_0^{x_j} \left(\frac{Q}{\sqrt{4Dt_2}} e^{-x^2/(4Dt_2)} - N_{BC} \right) \mu_p dx \tag{จ.9}$$

เมื่อ q = ประจุไฟฟ้า = 1.6×10^{-19} คูลอมป์ และ μ_p = สภาพคล่องของซิลิกอนชนิดพี = $60\text{cm}^2/(\text{v.s})$
 ถ้าพิจารณาสมการที่ (จ.9) จะพบว่าพจน์แรกก็คือ $\text{erf}(x_j)$ = นั่นเอง แทนค่า $\bar{\sigma} = 100$ โหมห์/เซ็นติเมตร
 และสมมติ $x_j = 0.45$ ไมครอน จะพบว่าต้องใช้เวลาในการขับเคลื่อนประมาณ 2 ชั่วโมง

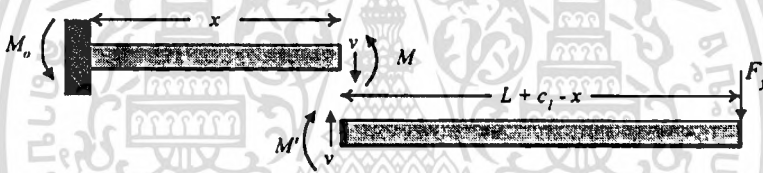


ภาคผนวก ฉ

การคำนวณระยะเห $y(x)$ ของคานยื่น

รูปที่ ฉ-1 คานยื่น

จากรูป ถ้าคานยาวเท่ากับ L แรงกระทำ F_y สมมติให้จุดศูนย์กลางมวลเพื่อตรวจสอบอยู่ที่ระยะ $L + c_l$ บนแกน x เท่านั้น เมื่อพิจารณารอยตัดของคาน ณ ระยะ x ใดๆ จะเกิดโมเมนต์รวมดังรูปที่ ฉ-2 ดังนี้



รูปที่ ฉ-2 โมเมนต์ในคานยื่น

พิจารณารอยตัดด้านขวามือ

$$M' + F_y(L + c_l - x) = 0$$

$$M' = -F_y(L + c_l - x)$$

สมการความโค้งของคานยื่นเนื่องจากโมเมนต์ $M(x)$ ณ ระยะ x ใดๆ

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{F_y(L + c_l - x)}{EI_z}$$

อินทิเกรต

$$\frac{dy}{dx} = \frac{F_y}{EI_z} \left[(L + c_l)x - \frac{x^2}{2} \right] + A$$

แต่ $dy/dx = 0$ ที่ $x = 0$ ดังนั้น $A = 0$

อินทิเกรต

$$y = \frac{F_y}{EI_z} \left[(L + c_l) \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right] + B$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขขอบ $y(0) = 0$ ดังนั้น $B = 0$

จะได้ว่า

$$y(x) = \pm \frac{F_y}{2EI_z} x^2 \left(L + c_1 - \frac{x}{3} \right) \quad 0 \leq x \leq L.$$

$$y(L) = \pm \frac{F_y}{2EI_z} L^2 \left(\frac{2}{3} L + c_1 \right) \quad x = L$$

ที่ระยะ $L \leq x \leq L + 2c_1$ การหาค่าจะเป็นไปตามสมการเส้นตรง ดังนั้น

$$y - y(L) = \frac{dy(L)}{dx} (x - L)$$

$$y = \frac{F_y}{2EI_z} \left[L^2 + Lc_1 - \frac{L^2}{2} \right] (x - L) + \frac{F_y}{EI_z} L^2 \left(\frac{2}{3} L + c_1 \right)$$

ดังนั้น

$$y(x) = \begin{cases} \frac{F}{2EI_z} x^2 \left(L + c_1 - \frac{x}{3} \right) & 0 \leq x \leq L \\ \left[\frac{F_y}{2EI_z} + \frac{F_y L c_1}{EI_z} \right] (x - L) + \frac{F_y L^2}{2EI_z} \left(\frac{2}{3} L + c_1 \right) & L \leq x \leq L + 2c_1 \end{cases}$$

ภาคผนวก ข

ตารางค่า Complementary Error Function

z	$\text{erfc}(z)$	z	$\text{erfc}(z)$	z	$\text{erfc}(z)$	z	$\text{erfc}(z)$	z	$\text{erfc}(z)$	z	$\text{erfc}(z)$	z	$\text{erfc}(z)$
0.00	1.000000	0.43	0.531113	0.86	0.231950	1.29	0.091040	1.72	0.149720	2.15	0.231619	2.58	0.265600
0.01	0.980173	0.44	0.531173	0.87	0.231500	1.30	0.090920	1.73	0.149670	2.16	0.231500	2.59	0.265460
0.02	0.971731	0.45	0.531218	0.88	0.231313	1.31	0.090790	1.74	0.149610	2.17	0.231313	2.60	0.265320
0.03	0.964659	0.46	0.531245	0.89	0.231045	1.32	0.090660	1.75	0.149540	2.18	0.231045	2.61	0.265180
0.04	0.958499	0.47	0.531255	0.90	0.230702	1.33	0.090530	1.76	0.149460	2.19	0.230702	2.62	0.265040
0.05	0.952912	0.48	0.531240	0.91	0.230282	1.34	0.090400	1.77	0.149370	2.20	0.230282	2.63	0.264900
0.06	0.947735	0.49	0.531200	0.92	0.229782	1.35	0.090270	1.78	0.149270	2.21	0.229782	2.64	0.264760
0.07	0.942912	0.50	0.531135	0.93	0.229202	1.36	0.090140	1.79	0.149160	2.22	0.229202	2.65	0.264620
0.08	0.938394	0.51	0.531045	0.94	0.228542	1.37	0.090010	1.80	0.149040	2.23	0.228542	2.66	0.264480
0.09	0.934212	0.52	0.530930	0.95	0.227802	1.38	0.089880	1.81	0.148910	2.24	0.227802	2.67	0.264340
0.10	0.930212	0.53	0.530795	0.96	0.226982	1.39	0.089750	1.82	0.148770	2.25	0.226982	2.68	0.264200
0.11	0.926337	0.54	0.530635	0.97	0.226082	1.40	0.089620	1.83	0.148630	2.26	0.226082	2.69	0.264060
0.12	0.922522	0.55	0.530450	0.98	0.225102	1.41	0.089490	1.84	0.148480	2.27	0.225102	2.70	0.263920
0.13	0.918761	0.56	0.530240	0.99	0.224042	1.42	0.089360	1.85	0.148330	2.28	0.224042	2.71	0.263780
0.14	0.915054	0.57	0.530005	1.00	0.222902	1.43	0.089230	1.86	0.148180	2.29	0.222902	2.72	0.263640
0.15	0.911401	0.58	0.529745	1.01	0.221682	1.44	0.089100	1.87	0.148030	2.30	0.221682	2.73	0.263500
0.16	0.907801	0.59	0.529460	1.02	0.220382	1.45	0.088970	1.88	0.147880	2.31	0.220382	2.74	0.263360
0.17	0.904254	0.60	0.529150	1.03	0.219002	1.46	0.088840	1.89	0.147730	2.32	0.219002	2.75	0.263220
0.18	0.900761	0.61	0.528815	1.04	0.217542	1.47	0.088710	1.90	0.147580	2.33	0.217542	2.76	0.263080
0.19	0.897321	0.62	0.528455	1.05	0.216002	1.48	0.088580	1.91	0.147430	2.34	0.216002	2.77	0.262940
0.20	0.893934	0.63	0.528070	1.06	0.214382	1.49	0.088450	1.92	0.147280	2.35	0.214382	2.78	0.262800
0.21	0.890599	0.64	0.527660	1.07	0.212682	1.50	0.088320	1.93	0.147130	2.36	0.212682	2.79	0.262660
0.22	0.887316	0.65	0.527225	1.08	0.210902	1.51	0.088190	1.94	0.146980	2.37	0.210902	2.80	0.262520
0.23	0.884084	0.66	0.526765	1.09	0.209042	1.52	0.088060	1.95	0.146830	2.38	0.209042	2.81	0.262380
0.24	0.880901	0.67	0.526280	1.10	0.207102	1.53	0.087930	1.96	0.146680	2.39	0.207102	2.82	0.262240
0.25	0.877766	0.68	0.525770	1.11	0.205082	1.54	0.087800	1.97	0.146530	2.40	0.205082	2.83	0.262100
0.26	0.874679	0.69	0.525235	1.12	0.203002	1.55	0.087670	1.98	0.146380	2.41	0.203002	2.84	0.261960
0.27	0.871639	0.70	0.524675	1.13	0.200862	1.56	0.087540	1.99	0.146230	2.42	0.200862	2.85	0.261820
0.28	0.868646	0.71	0.524090	1.14	0.198662	1.57	0.087410	2.00	0.146080	2.43	0.198662	2.86	0.261680
0.29	0.865699	0.72	0.523480	1.15	0.196402	1.58	0.087280	2.01	0.145930	2.44	0.196402	2.87	0.261540
0.30	0.862799	0.73	0.522845	1.16	0.194082	1.59	0.087150	2.02	0.145780	2.45	0.194082	2.88	0.261400
0.31	0.859944	0.74	0.522185	1.17	0.191702	1.60	0.087020	2.03	0.145630	2.46	0.191702	2.89	0.261260
0.32	0.857134	0.75	0.521500	1.18	0.189262	1.61	0.086890	2.04	0.145480	2.47	0.189262	2.90	0.261120
0.33	0.854369	0.76	0.520790	1.19	0.186762	1.62	0.086760	2.05	0.145330	2.48	0.186762	2.91	0.260980
0.34	0.851639	0.77	0.520055	1.20	0.184202	1.63	0.086630	2.06	0.145180	2.49	0.184202	2.92	0.260840
0.35	0.848944	0.78	0.519295	1.21	0.181582	1.64	0.086500	2.07	0.145030	2.50	0.181582	2.93	0.260700
0.36	0.846284	0.79	0.518510	1.22	0.178902	1.65	0.086370	2.08	0.144880	2.51	0.178902	2.94	0.260560
0.37	0.843659	0.80	0.517700	1.23	0.176162	1.66	0.086240	2.09	0.144730	2.52	0.176162	2.95	0.260420
0.38	0.841069	0.81	0.516865	1.24	0.173362	1.67	0.086110	2.10	0.144580	2.53	0.173362	2.96	0.260280
0.39	0.838514	0.82	0.516005	1.25	0.170502	1.68	0.085980	2.11	0.144430	2.54	0.170502	2.97	0.260140
0.40	0.835994	0.83	0.515120	1.26	0.167582	1.69	0.085850	2.12	0.144280	2.55	0.167582	2.98	0.260000
0.41	0.833509	0.84	0.514210	1.27	0.164602	1.70	0.085720	2.13	0.144130	2.56	0.164602	2.99	0.259860
0.42	0.831049	0.85	0.513275	1.28	0.161562	1.71	0.085590	2.14	0.143980	2.57	0.161562	3.00	0.259720
0.43	0.828614	0.86	0.512315	1.29	0.158462	1.72	0.085460	2.15	0.143830	2.58	0.158462	3.01	0.259580
0.44	0.826204	0.87	0.511330	1.30	0.155302	1.73	0.085330	2.16	0.143680	2.59	0.155302	3.02	0.259440
0.45	0.823819	0.88	0.510320	1.31	0.152082	1.74	0.085200	2.17	0.143530	2.60	0.152082	3.03	0.259300
0.46	0.821459	0.89	0.509285	1.32	0.148802	1.75	0.085070	2.18	0.143380	2.61	0.148802	3.04	0.259160
0.47	0.819124	0.90	0.508225	1.33	0.145462	1.76	0.084940	2.19	0.143230	2.62	0.145462	3.05	0.259020
0.48	0.816814	0.91	0.507140	1.34	0.142062	1.77	0.084810	2.20	0.143080	2.63	0.142062	3.06	0.258880
0.49	0.814529	0.92	0.506030	1.35	0.138602	1.78	0.084680	2.21	0.142930	2.64	0.138602	3.07	0.258740
0.50	0.812259	0.93	0.504895	1.36	0.135082	1.79	0.084550	2.22	0.142780	2.65	0.135082	3.08	0.258600
0.51	0.809994	0.94	0.503735	1.37	0.131502	1.80	0.084420	2.23	0.142630	2.66	0.131502	3.09	0.258460
0.52	0.807744	0.95	0.502550	1.38	0.127862	1.81	0.084290	2.24	0.142480	2.67	0.127862	3.10	0.258320
0.53	0.805509	0.96	0.501340	1.39	0.124162	1.82	0.084160	2.25	0.142330	2.68	0.124162	3.11	0.258180
0.54	0.803289	0.97	0.500105	1.40	0.120402	1.83	0.084030	2.26	0.142180	2.69	0.120402	3.12	0.258040
0.55	0.801084	0.98	0.498845	1.41	0.116582	1.84	0.083900	2.27	0.142030	2.70	0.116582	3.13	0.257900
0.56	0.798894	0.99	0.497560	1.42	0.112702	1.85	0.083770	2.28	0.141880	2.71	0.112702	3.14	0.257760
0.57	0.796719	1.00	0.496250	1.43	0.108762	1.86	0.083640	2.29	0.141730	2.72	0.108762	3.15	0.257620
0.58	0.794559			1.44	0.104682	1.87	0.083510	2.30	0.141580	2.73	0.104682	3.16	0.257480
0.59	0.792414			1.45	0.100542	1.88	0.083380	2.31	0.141430	2.74	0.100542	3.17	0.257340
0.60	0.790284			1.46	0.096352	1.89	0.083250	2.32	0.141280	2.75	0.096352	3.18	0.257200
0.61	0.788169			1.47	0.092022	1.90	0.083120	2.33	0.141130	2.76	0.092022	3.19	0.257060
0.62	0.786069			1.48	0.087592	1.91	0.082990	2.34	0.140980	2.77	0.087592	3.20	0.256920
0.63	0.783984			1.49	0.083062	1.92	0.082860	2.35	0.140830	2.78	0.083062	3.21	0.256780
0.64	0.781914			1.50	0.078432	1.93	0.082730	2.36	0.140680	2.79	0.078432	3.22	0.256640
0.65	0.779859			1.51	0.073702	1.94	0.082600	2.37	0.140530	2.80	0.073702	3.23	0.256500
0.66	0.777819			1.52	0.068872	1.95	0.082470	2.38	0.140380	2.81	0.068872	3.24	0.256360
0.67	0.775794			1.53	0.063942	1.96	0.082340	2.39	0.140230	2.82	0.063942	3.25	0.256220
0.68	0.773784			1.54	0.058912	1.97	0.082210	2.40	0.140080	2.83	0.058912	3.26	0.256080
0.69	0.771789			1.55	0.053782	1.98	0.082080	2.41	0.139930	2.84	0.053782	3.27	0.255940
0.70	0.769809			1.56	0.048552	1.99	0.081950	2.42	0.139780	2.85	0.048552	3.28	0.255800
0.71	0.767844			1.57	0.043222	2.00	0.081820	2.43	0.139630	2.86	0.043222	3.29	0.255660
0.72	0.765894			1.58	0.037792	2.01	0.081690	2.44	0.139480	2.87	0.037792	3.30	0.255520
0.73	0.763959			1.59	0.032262	2.02	0.081560	2.45	0.139330	2.88	0.032262	3.31	0.255380
0.74	0.762039			1.60	0.026632	2.03	0.081430	2.46	0.139180	2.89	0.026632	3.32	0.255240
0.75	0.760134			1.61	0.020902	2.04	0.081300	2.47	0.139030	2.90	0.020902	3.33	0.255100
0.76	0.758244			1.62	0.015072	2.05	0.081170	2.48	0.138880	2.91	0.015072	3.34	0.254960
0.77	0.756369			1.63	0.009142	2.06	0.081040	2.49	0.138730	2.92	0.009142	3.35	0.254820
0.78	0.75												

Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)
4.30	0.119147D-08	4.73	0.324348D-10	5.16	0.293308D-12	5.44	0.143363D-13
4.31	0.109239D-08	4.74	0.203464D-10	5.17	0.264208D-12	5.45	0.128342D-13
4.32	0.100003D-08	4.75	0.184850D-10	5.18	0.237786D-12	5.46	0.114873D-13
4.33	0.915161D-09	4.76	0.167742D-10	5.19	0.213964D-12	5.47	0.102797D-13
4.34	0.837317D-09	4.77	0.152187D-10	5.20	0.192491D-12	5.48	0.919719D-14
4.35	0.765944D-09	4.78	0.138048D-10			5.49	0.822708D-14
4.36	0.700518D-09	4.79	0.125194D-10	5.21	0.173198D-12	5.50	0.735789D-14
4.37	0.640536D-09	4.80	0.113521D-10	5.22	0.155701D-12		
4.38	0.585612D-09	4.81	0.102914D-10	5.23	0.139992D-12	5.51	0.657916D-14
4.39	0.535276D-09	4.82	0.932791D-11	5.24	0.125844D-12	5.52	0.588172D-14
4.40	0.489171D-09	4.83	0.845296D-11	5.25	0.113103D-12	5.53	0.525717D-14
		4.84	0.765961D-11	5.26	0.101632D-12	5.54	0.469802D-14
4.41	0.446950D-09	4.85	0.693754D-11	5.27	0.913067D-13	5.55	0.419751D-14
4.42	0.408291D-09	4.86	0.628112D-11	5.28	0.820141D-13	5.56	0.374959D-14
4.43	0.372906D-09	4.87	0.568932D-11	5.29	0.736527D-13	5.57	0.334888D-14
4.44	0.340520D-09	4.88	0.515062D-11	5.30	0.661308D-13	5.58	0.299027D-14
4.45	0.310886D-09	4.89	0.466202D-11			5.59	0.267078D-14
4.46	0.283773D-09	4.90	0.421393D-11	5.31	0.593654D-13	5.60	0.238559D-14
4.47	0.258978D-09			5.32	0.532816D-13		
4.48	0.236102D-09	4.91	0.381721D-11	5.33	0.478119D-13	5.61	0.213113D-14
4.49	0.215568D-09	4.92	0.345307D-11	5.34	0.428892D-13	5.62	0.190637D-14
4.50	0.196616D-09	4.93	0.312304D-11	5.35	0.384766D-13	5.63	0.170940D-14
		4.94	0.282401D-11	5.36	0.345063D-13	5.64	0.153685D-14
4.51	0.179295D-09	4.95	0.255311D-11	5.37	0.309396D-13	5.65	0.138482D-14
4.52	0.163467D-09	4.96	0.230774D-11	5.38	0.277362D-13	5.66	0.124949D-14
4.53	0.149008D-09	4.97	0.208554D-11	5.39	0.248593D-13	5.67	0.113853D-14
4.54	0.135401D-09	4.98	0.188437D-11	5.40	0.222748D-13		
4.55	0.123740D-09	4.99	0.170326D-11	5.41	0.199383D-13	5.68	0.103879D-14
4.56	0.112729D-09	5.00	0.153746D-11	5.42	0.178779D-13	5.69	0.953471D-15
4.57	0.102677D-09			5.43	0.160110D-13	5.70	0.871904D-15
4.58	0.933034D-10	5.01	0.138834D-11				
4.59	0.851726D-10	5.02	0.125343D-11	5.44	0.143363D-13	5.71	0.797892D-15
4.60	0.774960D-10	5.03	0.113141D-11	5.45	0.128342D-13	5.72	0.730041D-15
		5.04	0.102107D-11	5.46	0.114873D-13	5.73	0.667916D-15
4.61	0.703306D-10	5.05	0.921310D-12	5.47	0.102797D-13	5.74	0.610078D-15
4.62	0.641787D-10	5.06	0.811132D-12	5.48	0.919719D-14	5.75	0.556941D-15
4.63	0.583747D-10	5.07	0.714963D-12	5.49	0.822708D-14	5.76	0.507400D-15
4.64	0.531083D-10	5.08	0.635994D-12	5.50	0.735789D-14	5.77	0.461852D-15
4.65	0.482970D-10	5.09	0.569469D-12			5.78	0.419751D-15
4.66	0.439130D-10	5.10	0.513982D-12	5.61	0.212744D-14	5.79	0.374959D-15
4.67	0.399191D-10			5.62	0.189730D-14	5.80	0.334888D-15
4.68	0.362814D-10	5.11	0.465122D-12	5.63	0.169250D-14	5.81	0.299027D-15
4.69	0.329687D-10	5.12	0.416133D-12	5.64	0.150951D-14	5.82	0.267078D-15
4.70	0.299326D-10	5.13	0.401912D-12	5.65	0.134604D-14	5.83	0.238559D-15
		5.14	0.362004D-12	5.66	0.120003D-14	5.84	0.213113D-15
4.71	0.272071D-10	5.15	0.325994D-12	5.67	0.106963D-14	5.85	0.190637D-15
4.72	0.247084D-10			5.68	0.953249D-15	5.86	0.170940D-15
				5.69	0.849347D-15	5.87	0.153685D-15
				5.70	0.756621D-15	5.88	0.138482D-15
				5.71	0.673885D-15	5.89	0.124949D-15
						5.90	0.113853D-15
						5.91	0.103879D-15
						5.92	0.953471D-15
						5.93	0.871904D-15
						5.94	0.797892D-15
						5.95	0.730041D-15
						5.96	0.667916D-15
						5.97	0.610078D-15
						5.98	0.556941D-15
						5.99	0.507400D-15
						6.00	0.461852D-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายศรีเมษ รัตนชัย เกิดเมื่อวันที่ 30 เมษายน 2511 ที่จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาวชิราวุธศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์)จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2532 ปัจจุบันรับตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย 4 ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานที่เคยตีพิมพ์

[1] ศรีเมษ รัตนชัย และคณะ. 2534 “การศึกษาเทคนิคการควบคุมความหนาไดอะแฟรมของซิลิกอนในสารละลาย EPD” การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 , พ.ศ. 2534 , หน้า 2-136 ถึง 2-142.

[2] ศรีเมษ รัตนชัย และคณะ 2539 “ข้อพิจารณาเชิงเรขาคณิตของการกัดส่วนมวลของตัวตรวจจับอัตราเร่งแบบซิลิกอนระนาบ (100)” การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, พ.ศ.2538 , หน้า 521-527 .

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้

1. 363 ถนนทิพย์ช้าง ต.สวนดอก อ.เมือง จ.ลำปาง โทร 054-217492
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 02-3267980 โทรสาร 02-739 -0643
2. อีเมล srime@hotmail.com
3. ICQ No.23221672
4. <http://www.geocities.com/Nashville/7501>