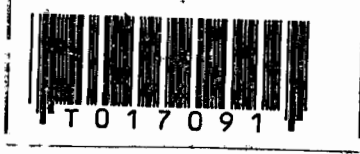


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเม็ยโซรีซิสที่ปบบนไดอะแฟรมบาง
SILICON DIFFUSED-ELEMENT THIN-DIAPHRAGM
PIEZORESISTIVE PRESSURE TRANSDUCER



ธัญญา สักดีโสภิชฐ์
THANYA SAKSOPIT

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช
ADVISOR
ASSOC.PROF.DR.SOMKIAT SUPADECH

เลขหมู่
เลขทะเบียน 17091
วัน, เดือน, ปี 5 ก.พ. 2535

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2534
ISBN 974-8157-05-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
คำนำ	III
บทที่ 1 ทฤษฎีของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป	1
1.1 โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป	1
1.2 ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีป (piezoresistive effect)	2
1.2.1 โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน	2
1.2.2 เปียโซรีซิสทีวิตีในซิลิกอนชนิดเอ็น (piezoresistivity in n-type silicon)	5
1.2.3 เปียโซรีซิสทีวิตีในซิลิกอนชนิดพี (piezoresistivity in p-type silicon)	6
1.3 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีปในตัวต้านทาน	8
1.4 การเลือกชนิด ระนาบของฐานรอง และการวางตัว (orientation) ของตัวต้านทาน	10
1.5 ตำแหน่งการวางตัวต้านทานบน ไดอะแฟรม	12
1.6 วงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge Circuit)	13
1.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีป	15
1.8 ผลของมิสมัทช์ (mismatch) ของบริดจ์ตัวต้านทาน	17
1.9 การขยับเลื่อนของสัญญาณ (Electrical Drift)	18
1.9.1 อินเตอร์เฟสแทรป (interface trap) และ ออกไซด์ชาร์จ (oxide charge)	18
1.9.2 การ์ดริง (guard-ring)	19
1.10 กระบวนการกีดซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic)	21
1.11 เทคนิคการควบคุมความหนาของไดอะแฟรม	25

บทที่ 2	การออกแบบ การสร้าง และการเก็บบรรจุ	28
2.1	การออกแบบไดอะแฟรม	28
2.2	การออกแบบตัวต้านทาน	30
2.3	การออกแบบการ์ดริง	31
2.4	ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ	31
2.5	การผลิตกระจกมาสก์ต้นแบบ (photomask)	34
2.6	การสร้างบนแผ่นผลึก	39
2.6.1	การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง	39
2.6.2	ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดัน	40
2.7	กระบวนการแอสเซมบลีและเก็บบรรจุ	52
บทที่ 3	การทดลองและผลการทดลอง	55
3.1	การทดลองและผลการทดลองกัฏฐานรองซิลิกอนเพื่อสร้าง ไดอะแฟรม	55
3.1.1	การกัดด้วยเทคนิคร่องตัววี (v-groove)	55
3.1.2	การกัดด้วยไฟฟ้า โดยใช้แสง เป็นมอโนเตอร์	56
3.2	การทดลองและผลการทดลองวัดค่าความไวต่อความดัน (pressure sensitivity)	63
3.2.1	การทดลองและผลการทดลองวัดค่าความไวของตัวต้านทานในแนวสัมผัส R_x และตัวต้านทานในแนวรัศมี R_y	64
3.2.2	ผลการทดลองวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน	69
3.3	การทดลองและศึกษาผลทางด้านอุณหภูมิ	74
3.3.1	การทดลองและผลการทดลองวัดค่าความไวต่ออุณหภูมิของแรงดันออฟเซต (temperature sensitivity of the offset, TSO)	74
3.3.2	การทดลองและผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความไว (temperature coefficient of the pressure sensitivity, TCS)	80
3.3.3	เสถียรภาพ (stability) ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท	82

บทที่ 4	สรุปและบทวิจารณ์	86
----------------	-------------------------	-----------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลึกซึ้งห่างไกลให้ชัดเจนไปข้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ	89
เอกสารอ้างอิง	90
สารบัญภาพ	93
สารบัญตาราง	99
สัญลักษณ์	100
ภาคผนวก ก การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (Oxide layer growth)	102
ภาคผนวก ข กระบวนการแพร่สารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส	109
ภาคผนวก ค ตารางแสดงตัวกัด (etchant)	118
ภาคผนวก ง การประยุกต์ใช้งานทรานสดิวเซอร์ความดันกับระบบจำลอง การหมุนเวียนของโลหิต (cardiovascular system simulator)	119



หัวข้อวิทยานิพนธ์	ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเป็ย โซริซิสทีปบน ไดอะแฟรมบาง
นักศึกษา	นาย ัญญะ คักดีโสภิชฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2534

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ไฟฟ้าของ เนื้อสารกึ่งตัวนำ เมื่อถูกกระทำด้วยความเค้น เรียกว่า ปรากฏการณ์เป็ย โซริซิสทีป จากการค้นคว้าและวิจัยพบว่า ผลของปรากฏการณ์นี้ปรากฏเด่นชัดในเนื้อสารซิลิกอน จึงทำให้ซิลิกอนเป็นสารที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาสร้าง เป็นทรานสดิวเซอร์ความดันขนาดเล็ก เพื่อใช้ในงานวิจัยทางการแพทย์และประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ เสนองงานวิจัย ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเป็ย โซริซิสทีปบน ไดอะแฟรมบาง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ การศึกษาหาวิธีการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันจนเป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์ เริ่มต้นเป็นการศึกษาทฤษฎีของทรานสดิวเซอร์ความดัน เพื่อใช้ในการออกแบบตัวทรานสดิวเซอร์ ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก กระบวนการ แอสเซมบลี และการเก็บบรรจุ สำหรับ โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดัน ได้ออกแบบเป็นชิพฐานรองซิลิกอนแบบอินเทกเรชันชนิด n/n^+ ระบาย (100) ตัวทรานสดิวเซอร์ประกอบด้วยตัวต้านทานชนิดพีจำนวน 4 ตัว ได้จากการแพร่สารเจือ โบรมอนลงบน ไดอะแฟรมบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แผ่น ไดอะแฟรมถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการกัดเนื้อฐานรองซิลิกอนแบบ แอนไอโซทรอปิก ในสารละลาย PED ด้วยเทคนิคการกัดด้วยไฟฟ้า เพื่อควบคุมความหนาของ ไดอะแฟรม ด้วยเทคนิคนี้สามารถสร้าง ไดอะแฟรมที่มีผิวเรียบและหนาสม่ำเสมอ ได้ความหนาเฉลี่ย 14 ไมครอน ซึ่งเมื่อนำมาสร้างเป็นทรานสดิวเซอร์ความดันจะได้ค่าความไวเฉลี่ย $17.82 \mu V/V_{supply} \cdot mmHg$ โดยไม่ปรากฏความไม่เป็นเชิงเส้นและฮีสเทอรีซิสของสัญญาณแรงดันเอาต์พุต เมื่อทดสอบในช่วงความดัน 0 - 300 มม.ปรอท สำหรับการศึกษาผลทางด้านอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติของทรานสดิวเซอร์ความดัน เช่น การชยับเลื่อนของแรงดันออฟเซตตามอุณหภูมิ และการชยับเลื่อนของค่าความไวตามอุณหภูมิ ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อลดผลทางด้านนี้ด้วยการใช้ โครงสร้างการตรึงล้อมรอบตัวต้านทานแต่ละตัวไว้ ทรานสดิวเซอร์ที่สร้างขึ้นมีค่าความไวต่ออุณหภูมิของแรงดันออฟเซตเฉลี่ย $-17.5 \mu V/V \cdot ^\circ C$ และค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความไวเฉลี่ย $-0.0057 \mu V/V \cdot mmHg \cdot ^\circ C$

THESIS TITLE SILICON DIFFUSED-ELEMENT THIN-DIAPHRAGM
 PIEZORESISTIVE PRESSURE TRANSDUCER
NAME THANYA SAKSOPIT
THESIS ADVISOR ASSOC.PROF.DR.SOMKIAT SUPADECH
LEVEL OF STUDY MASTER'S IN ELECTRICAL ENGINEERING
ACADEMIC YEAR 1991

ABSTRACT

The change in resistance of a semiconductor when subjected to a stress is called a piezoresistive effect. The piezoresistive effect in silicon is very large that makes it a desirable material for miniature pressure transducers in medical research and industrial applications.

In this thesis the research on silicon diffused-element thin-diaphragm piezoresistive pressure transducer is reported. The object of the research is to find the possible methods to fabricating pressure transducer into complete device. The thesis first reviews the basic theory of pressure transducer and used for the design of pressure transducer. Then the the transducer fabrication process, the assembly processing and packaging are presented. The starting substrate is an n/n^+ (100)-oriented epitaxial wafer of 400- μm thickness. The transducer consists of four p-type resistors which are fabricated using the boron diffusion into a thin square diaphragm. A thin diaphragm is fabricated employing an electrochemical etch-stop technique using PED anisotropic etchant, and light monitoring technique has been used for controlling diaphragm thickness. A yield diaphragm using this technique is uniform with thickness about 14 μm . For transducers having a 14- μm -thick diaphragm, the average measured pressure sensitivity is 17.82 $\mu\text{V}/\text{Vsupply.mmmHg}$. No nonlinearity or hysteresis has been observed within the limits of pressure of 0 - 300 mmHg . Temperature effects such as the temperature drift of the offset voltage, and the temperature coefficient of pressure sensitivity, (TCS) have been reduced by a guard ring surrounding each resistor. The measured temperature sensitivity of the offset, (TSO) and the temperature coefficient of pressure sensitivity, (TCS) of the device are $-17.5 \mu\text{V}/\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}$ and $-0.0057 \mu\text{V}/\text{V}\cdot\text{mmHg}\cdot^{\circ}\text{C}$ respectively.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในงานด้านต่างๆ มากมาย ตั้งแต่ การขนส่ง การรักษาพยาบาล ตลอดจนการควบคุมในระบบอุตสาหกรรม ในงานเหล่านี้ " ทรานสดิวเซอร์ (transducer) " นับเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ช่วยให้ระบบรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงของสถานะแวดล้อมจากการกระตุ้นผ่านทางทรานสดิวเซอร์ ทำให้การควบคุมสามารถกระทำได้โดยผ่านทางทรานสดิวเซอร์เหล่านี้

ในบรรดาทรานสดิวเซอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอน นับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากตัวหนึ่งซึ่งได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานการวัดปริมาณต่างๆ เช่น ความขรุขระของพื้นผิว อัตราการไหล น้ำหนัก ความดัน อัตราเร่ง แรงบิด ความเค้น และการลั่นสะเทือน เป็นต้น

ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอนส่วนใหญ่อาศัยผลของ " ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีป (piezoresistive effect) " ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีปเป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเนื้อสารเนื่องจากถูกกระทำด้วยความเค้น (stress) Lord Kelvin [1] ได้รายงานการศึกษาปรากฏการณ์นี้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1856 ต่อมาก็ได้มีการศึกษาและทดลองเพิ่มเติมกับโลหะหลายๆ ชนิด ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปประยุกต์สร้างเป็นสเตรนเกจแบบเส้นลวดโลหะและแบบแผ่นโลหะบาง (metal wire and foil strain gages)

ในช่วงปี ค.ศ. 1950 ห้องปฏิบัติการหลายแห่งในสหรัฐอเมริกาได้มุ่งทำการทดลองค้นคว้าเกี่ยวกับปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีปในสารกึ่งตัวนำเป็นส่วนใหญ่ [2] และได้ยืนยันผลการทดลองว่าผลของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำมากกว่าโลหะมากๆ ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีปมีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก ในปี ค.ศ. 1954 C.S. Smith [3] ได้ทำการทดลองวัดปรากฏการณ์นี้ในเนื้อสารซิลิกอนและเยอรมันเนียม ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเนื้อสารซิลิกอนจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทิศทางของความเค้นที่กระทำในทิศทางใดทิศทางหนึ่งของผลึก ในอีก 2-3 ปีต่อมา ผลที่ได้จากการทดลองถูกนำไปใช้ในการออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันเป็นครั้งแรก ส่วนสำคัญของอุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่น ไดอะแฟรมบางหรือแผ่นเมมเบรนบางของซิลิกอน ซึ่งมีตัวต้านทานที่เกิดจากการแพร่สาร เจือถูกเชื่อมต่อกันภายใน (interconnection) เป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ เมื่อแผ่นเมมเบรนแอ่นตัวจะทำให้บริดจ์ตัวต้านทานเสียสมดุลย์ ผลที่เกิดขึ้นจะแสดงออกมาในรูปของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า

ในปัจจุบันเทคโนโลยีแบบต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้ในการค้นคว้าทดลอง วิจัย และสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเพียโซรีซิสทีปน ไดอะแฟรมบาง จุดหมายหลักของการพัฒนาได้

เน้นไปสู่โครงสร้างที่มีขนาดเล็ก (miniature) ให้ความไว (sensitivity) สูง มีความเป็นเชิงเส้น (linearity) และมีเสถียรภาพ (stability) ที่ดี โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันชนิดนี้สามารถใช้เทคโนโลยีของการสร้างวงจรรวม (integrated circuit) ได้ แนวโน้มของการพัฒนาในปัจจุบันจึงเป็นไปในรูปแบบของการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันให้อยู่ในรูปของวงจรรวมหรือไอซี (IC) โดยรวมวงจรรขยายสัญญาณ วงจรชดเชยผลทางอุณหภูมิ และวงจรชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นไว้ภายในชิพ (chip) เดียวกันเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน

สำหรับงานวิจัยทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเป็ย โซวีซีลที่ปนบน ไดอะแพรมบาง ในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นทรานซิสเตอร์ความดันที่มีโครงสร้างเป็นตัวเดี่ยวๆ (discrete) การวิจัยได้เริ่มต้นเมื่อปี พ.ศ. 2527 จนกระทั่งประสบความสำเร็จในการสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2529 [4] ในระยะแรกลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ความดันที่ไต้ยังมีความไวต่ำ จากนั้น ได้มีการพัฒนาโดยศึกษาปัญหาทาง โครงสร้าง และผลทางอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ [5] ทำให้สามารถลดผลของอุณหภูมิได้โดยใช้โครงสร้างของกักร์ดริง (guard-ring) [6] ในเวลาต่อมา เทคนิคการกัด ไดอะแพรม ได้ถูกปรับปรุงจนสามารถสร้าง ไดอะแพรมที่มีความบางและราบเรียบสม่ำเสมอ ทำให้ทรานซิสเตอร์ความดันที่สร้างขึ้นมีความไวสูง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการวิจัยทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเป็ย โซวีซีลที่ปนบน ไดอะแพรมบาง โดยเริ่มต้นจากการศึกษาทางทฤษฎี การออกแบบ การสร้างเป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์และการวัดทดสอบลักษณะสมบัติ รายละเอียดขั้นตอนของกระบวนการวิจัยสามารถสรุปเป็นบท โดยกำหนดเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 เป็นการเริ่มต้นศึกษาทฤษฎีของทรานซิสเตอร์ความดันแบบเป็ย โซวีซีลที่ปน โดยกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างและการทำงานของทรานซิสเตอร์ความดัน การศึกษาปรากฏการณ์เป็ย โซวีซีลที่ปนในเนื้อซิลิกอน สำหรับนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้าง นอกจากนี้ได้กล่าวถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ความดัน หัวข้อสุดท้ายกล่าวถึงเทคนิคการกัดเนื้อสารซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิก

บทที่ 2 เป็นขั้นตอนกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันให้เป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปทดสอบวัดลักษณะสมบัติ โดยเริ่มต้นจากการออกแบบต้นแบบและการผลิตกระจกต้นแบบ การกำหนดกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึกให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีของชุดอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการแอสเซมบลี (assembly processing) และการเก็บบรรจุที่เหมาะสม

บทที่ 3 เป็นการทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะสมบัติทางอุณหภูมิ ซึ่งวัดออกมาเป็นปริมาณต่างๆ ได้แก่ ค่าความไวต่อความดัน ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความไวกับอุณหภูมิ และค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันออฟเซตกับอุณหภูมิ เป็นต้น นอกจากนี้จะได้เสนอวิธีการลดผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วย

บทที่ 4 เป็นบทสรุปข้อมูลที่ได้จากการทำวิจัย



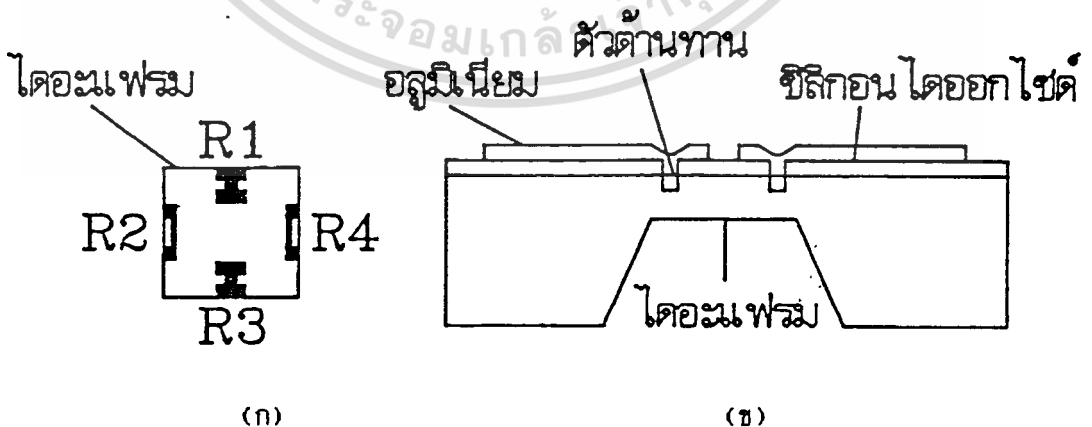
บทที่ 1

ทฤษฎีของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ

1.1 โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ

ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีฟ ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีฟเป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเนื้อสาร เมื่อถูกกระทำด้วยความเค้น(stress) โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟทั่วไปแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญได้แก่ ชิปฐานรองซิลิกอน โดยส่วนมากจะใช้ผลึกซิลิกอนระนาบ (100) และมีพื้นที่ส่วนหนึ่งซึ่งมีความไวต่อความดันเป็นแผ่นไดอะแฟรมซิลิกอนบางๆ รูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ได้จากการกัดฐานรองซิลิกอนด้วยเทคนิคแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ตัวต้านทานได้จากการแพร่สาร เจือลงบนผิวหน้าของ ไดอะแฟรม

เนื่องจากแผ่นไดอะแฟรมมีความบางมาก เมื่อป้อนความดันให้กับทรานสดิวเซอร์จะทำให้แผ่นไดอะแฟรมแอ่นตัวได้ง่าย ความเค้นที่เกิดจากการแอ่นตัวของไดอะแฟรมจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานเปลี่ยนแปลง จากผลของการเปลี่ยนแปลงนี้ เมื่อต่อตัวต้านทานเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์และป้อนแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับบริดจ์ตัวต้านทาน บริดจ์ตัวต้านทานจะส่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงออกมาในรูปของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน โดยตรงกับความดันที่ป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์ความดัน



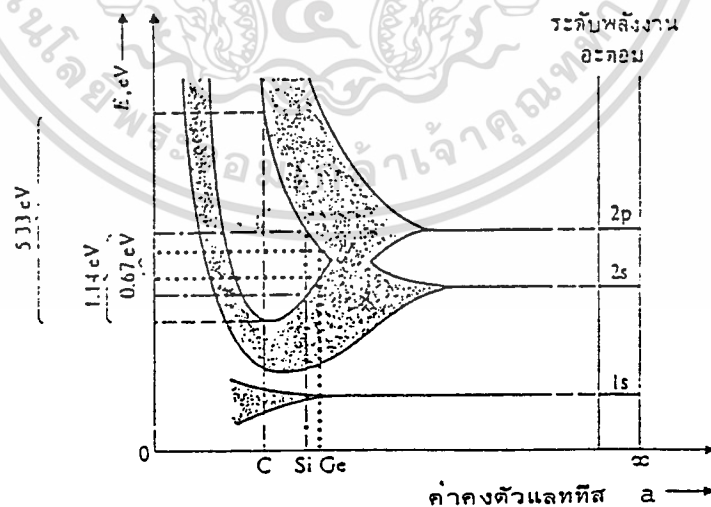
รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างทั่วไปของชิปทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ

(ก) ภาพด้านบน (top view) (ข) ภาพตัดขวาง (cross section)

1.2 ปรากฏการณ์เพียโซเรซิสทีฟ (piezoresistive effect) [7],[8],[9]

1.2.1 โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน

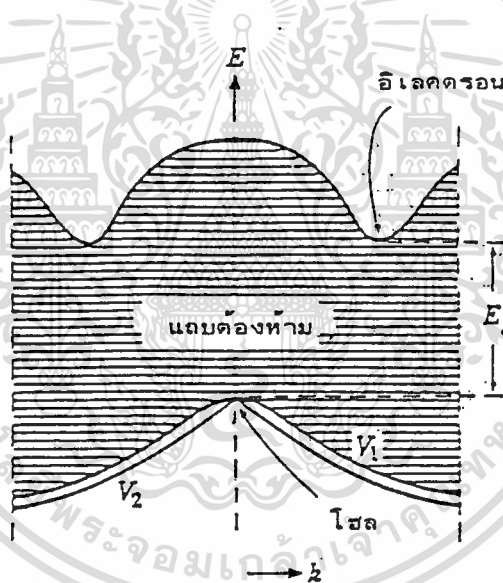
ระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะมีได้ในช่องแข็งจะปรากฏในลักษณะเป็นแถบของพลังงาน (energy bands) ซึ่งแยกจากกันด้วยบริเวณต้องห้ามซึ่งหมายถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะอยู่ไม่ได้ ดังตัวอย่างเช่น ธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งมีโครงรูปอิเล็กตรอน (electron configuration) คือ $1s^2 2s^2 2p^2$ เมื่อนำอะตอมของคาร์บอนเข้ามาใกล้กันเพื่อก่อรูปเป็นผลึก ระดับพลังงาน $2s$ และ $2p$ จะเกิดการแตกแยก เกิดเป็นแถบพลังงานซึ่งอิเล็กตรอนสามารถจะอยู่ได้ และขณะที่ระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงแถบพลังงานทั้งสองจะซ้อนกัน จนในที่สุด ถ้าระยะห่างระหว่างอะตอม a มีค่าลดลงไปอีก แถบพลังงานที่ซ้อนกันจะแยกเป็นสองแถบ โดยที่แถบพลังงานทั้งสองนี้จะอยู่แยกจากกันด้วยแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden gap) เมื่อคาร์บอนอยู่ในสถานะของแข็งที่เสถียรจะมีค่าคงตัวแลททิซที่คงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นโครงสร้างของแถบพลังงานของผลึกของแข็งชนิดใดๆ ก็คือ ตำแหน่งต่างๆ บนแกน a ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งขนาดและรูปร่างของโครงสร้างแถบพลังงานของของแข็งใดๆ จะเป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น สภาพความนำไฟฟ้าของของแข็งชนิดนั้นด้วย



รูปที่ 1.2 แสดงการก่อรูปของแถบพลังงานของธาตุของแข็งที่ตำแหน่งระยะห่างระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูปที่ 1.2 จะเห็นว่า โครงสร้างของแถบพลังงานจะประกอบด้วยแถบยินยอม (allowed band) 2 แถบ ถูกคั่นระหว่างกลางด้วยแถบต้องห้าม ในสารกึ่งตัวนำแถบยินยอมแถบล่างเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เกือบเต็มทุกสถานะพลังงาน และแถบบนเรียกว่า แถบความนำ (conduction band) ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เพียงเล็กน้อย สำหรับซิลิกอน โครงสร้างของแถบพลังงานจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.3 (แสดงในทิศทาง $[100]$) ผลจากการศึกษาเพื่อหาค่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอน โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงาน (E) ของอิเล็กตรอนกับเวกเตอร์คลื่น (wave vector, k) ของอิเล็กตรอน ปรากฏว่า ค่าพลังงานต่ำสุดของแถบความนำอยู่ในทิศทาง $[100]$ ณ ตำแหน่งที่ค่าเวกเตอร์คลื่น k ไม่เท่ากับศูนย์ จากคุณสมบัติความสมมาตรของผลึกซิลิกอนจะปรากฏค่าพลังงานต่ำสุดเป็นแวลลีย์ (valley) ทั้งหมด 6 แห่ง ในทิศทาง $[100]$, $[\bar{1}00]$, $[010]$, $[0\bar{1}0]$, $[001]$, และ $[00\bar{1}]$ ซึ่งเรียกว่า one-band many-valley model



รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอนในทิศทาง $[100]$

ในสภาวะปกติ ระดับพลังงานค่าต่ำสุดของแวลลีย์เหล่านี้จะเท่ากันหมดและวางอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 1.1 eV เหนือค่าพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ในแถบความนำเกิดจากอะตอมสารเจือผู้ให้ แต่ก็มีบางส่วนถูกกระตุ้น (excited) ด้วยพลังงานความร้อนจากแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนทั้งหมดนี้จะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในหมู่แวลลีย์ทั้งหมด โดยอิเล็กตรอนเหล่านี้มีพลังงานจลน์

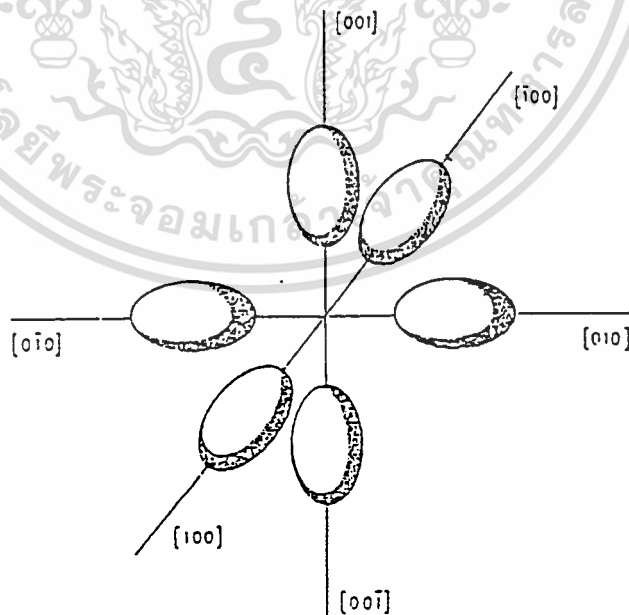
โดยที่ m_x คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ไปตามแนวขวางของผิวพลังงาน (transverse effective mass) และ m_l คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ไปตามแนวยาวของผิวพลังงาน (longitudinal effective mass) ดังแสดงในรูปที่ 1.4

มวลยังผลของอิเล็กตรอนมีสูตรการคำนวณว่า

$$m^* = \hbar^2 / (4\pi^2 d^2 E / dk^2) \quad (1.2)$$

ค่ามวลยังผลขึ้นกับทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบพลังงาน เมื่อให้สนามไฟฟ้าในทิศทาง [100] ซึ่งเป็นทิศทางตามแกนยาวของเอลลิปซอยด์ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานเป็นฟังก์ชันกับเวกเตอร์คลื่นเป็นรูปพาราโบลาซึ่งมีความโค้ง (curvature) น้อย ทำให้มวลยังผลของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในทิศทางนี้มีค่ามาก อย่างไรก็ตาม เมื่อให้สนามไฟฟ้าในทิศทาง [010] หรือ [001] รูปร่างของเอลลิปซอยด์ในทิศทางทั้งสองจะมีความโค้งมาก ทำให้มวลยังผลของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางนี้มีค่าน้อย สำหรับซิลิกอน อัตราส่วนของมวลยังผลตามขวางและมวลยังผลตามยาวต่อมวลอิเล็กตรอน m_0 มีค่า

$$m_x = 0.19m_0 ; \quad m_l = 0.98m_0 \quad (1.3)$$



รูปที่ 1.4 แสดงผิวพลังงานคงที่เอลลิปซอยด์ (constant-energy ellipsoids)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนในสเปซ k ใช้ในแถบความถี่ของซิลิกอน เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่มวลยังผลของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงตามทิศทาง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในผลึกนี้ ก็มีผลกระทบกับสภาพความนำไฟฟ้าของผลึกด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างมวลยังผล m^* และ โมบิลิตี μ ของอิเล็กตรอน เป็นดังสมการ

$$\mu = q\tau/m^* \quad (1.4)$$

โดยที่ τ เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่กับแลตทิซ ความสัมพันธ์ในสมการที่ (1.4) แสดงว่า มวลยังผลที่มีค่าน้อยเป็นผลให้ โมบิลิตีมีค่ามาก และในทำนองกลับกัน มวลยังผลที่มีค่ามากเป็นผลให้ โมบิลิตีมีค่าน้อย

สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็น สภาพการนำไฟฟ้า σ_c มีสูตรการคำนวณว่า

$$\sigma_c = nq\mu \quad (1.5)$$

อย่างไรก็ตาม สภาพการนำไฟฟ้าของผลึกซิลิกอนมีค่าขึ้นกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสองทิศทาง ซึ่งสามารถแสดงได้ว่า

$$\sigma_c = (2/3)nq\mu_{\perp} + (1/3)nq\mu_{\parallel} \quad (1.6)$$

โดยที่ μ_{\perp} คือค่าโมบิลิตีตามแกนยาวของเอลลิปซอยด์ และ μ_{\parallel} คือค่าโมบิลิตีตามแกนสั้น ค่าโมบิลิตีเฉลี่ย μ จากสมการที่ (1.6) จึงเท่ากับ

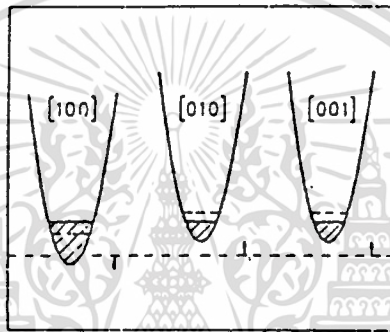
$$\mu = (2\mu_{\perp} + \mu_{\parallel})/3 \quad (1.7)$$

1.2.2 เปียโซรีซิสติวิตีในซิลิกอนชนิดเอ็น (piezoresistivity in n-type silicon)

เมื่อเกิดความเค้นในผลึกจะมีผลทำให้ระยะห่างระหว่างแลตทิซในทิศทางหนึ่งของผลึกลดลง ในขณะที่ระยะห่างระหว่างแลตทิซในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางนี้เพิ่มขึ้น เมื่อแลตทิซถูกอัดในทิศทาง [100] จะมีผลทำให้ระดับพลังงานต่ำสุดของแวลลีย์ในทิศทาง [100] ถูกลดต่ำลง ในขณะที่ระดับพลังงานต่ำสุดของแวลลีย์ในอีกสองทิศทางถูกยกขึ้น สิ่งนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการกระจายของจำนวนอิเล็กตรอนในหมู่แวลลีย์ทั้ง 6 แห่งอีกครั้งหนึ่ง โดยที่อิเล็กตรอนจะถ่ายเทมายังแวลลีย์

[100] เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในทิศทาง [100] มีค่าโมบิลิตีต่ำ การเพิ่มจำนวนของอิเล็กตรอนในแวลลีย์นี้จึงทำให้ค่าโมบิลิตีเฉลี่ยของกระแสในทิศทาง [100] ลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้สภาพความนำไฟฟ้าลดลงด้วย

เนื่องจากค่าโมบิลิตีเฉลี่ยและสภาพความนำไฟฟ้าในทิศทาง [100] ลดลงเนื่องจากแรงอัด (compression) จึงเป็นสาเหตุทำให้สภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเครียดมีค่าลบและการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของสภาพความต้านทานไฟฟ้าเป็นบวก ซิลิกอนชนิดเอ็นจะแสดงค่าเกจแฟกเตอร์เป็นลบ (negative gage factor)



รูปที่ 1.5 ภายใต้แรงอัดในทิศทาง [100] แวลลีย์ในทิศทาง [100] ถูกทำให้ต่ำลงและในทิศทาง [010] และ [001] แวลลีย์ถูกยกขึ้น อิเล็กตรอนจะไหลจากแวลลีย์ [001] และ [010] ไปยังแวลลีย์ [100]

1.2.3 เปียโซรีซิสติวิตีในซิลิกอนชนิดพี (piezoresistivity in p-type silicon)

โครงสร้างแถบพลังงานในแถบวาเลนซ์ของผลึกซิลิกอนประกอบด้วยแถบย่อย (subband) 2 แถบดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยมีค่าระดับพลังงานสูงสุดเท่ากันที่ $k = 0$ เนื่องจากความโค้งของแถบพลังงานทั้งสองแตกต่างกัน จึงเป็นผลทำให้ค่ามวลยั้งผลและค่าโมบิลิตีของโฮลในแถบย่อยทั้งสองแตกต่างกันด้วย เมื่อเกิดความเค้นดึงในผลึกจะทำให้แถบพลังงานทั้งสองแยกจากกัน โดยที่แถบพลังงานซึ่งโฮลมีค่าโมบิลิตีสูง จะลดลงต่ำกว่าแถบพลังงานซึ่งมีค่าโมบิลิตีต่ำ เป็นผลทำให้เกิดการกระจายของโฮลอีกครั้งหนึ่ง โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังแถบพลังงานซึ่งมีค่าโมบิลิตีต่ำ ผลที่เกิดขึ้นคือเมื่อจำนวนโฮลซึ่งมีค่าโมบิลิตีต่ำเพิ่มจำนวนมากขึ้น สภาพความต้านทานไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น ซิลิกอนชนิดพีจึงแสดงค่าเกจแฟกเตอร์เป็นบวก

1.3 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟในตัวต้านทาน

พิจารณาตัวต้านทานซึ่งเป็นชั้นสารเจือ(diffused layer) มีความต้านทาน R อยู่ภายใต้ความเค้นขนาน(parallel stress) σ_{\parallel} และความเค้นตั้งฉาก(perpendicular stress) σ_{\perp} แสดงในรูปที่ 1.6 ความต้านทานของตัวต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไป ΔR ดังแสดงด้วยความสัมพันธ์ [10]

$$\Delta R/R = \pi_{\parallel} \sigma_{\parallel} + \pi_{\perp} \sigma_{\perp} \quad (1.8)$$

โดยที่ π_{\parallel} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟตามยาว (longitudinal piezoresistive coefficient) มีนิยามดังสมการ [11]

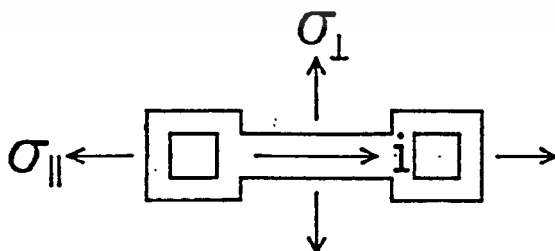
$$\Delta R/R = \pi_{\parallel} \sigma_{\parallel} \quad (1.9)$$

เป็นกรณีที่กระแสและความเค้น σ อยู่ในทิศทางเดียวกัน

และ π_{\perp} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟตามขวาง (transverse piezoresistive coefficient) มีนิยามดังสมการ [11]

$$\Delta R/R = \pi_{\perp} \sigma_{\perp} \quad (1.10)$$

เป็นกรณีที่กระแสและความเค้น σ อยู่ในทิศทางตั้งฉากกัน



รูปที่ 1.6 แสดงตัวต้านทาน R ซึ่งเป็นชั้นสารเจืออยู่ภายใต้ความเค้นขนาน σ_{\parallel}

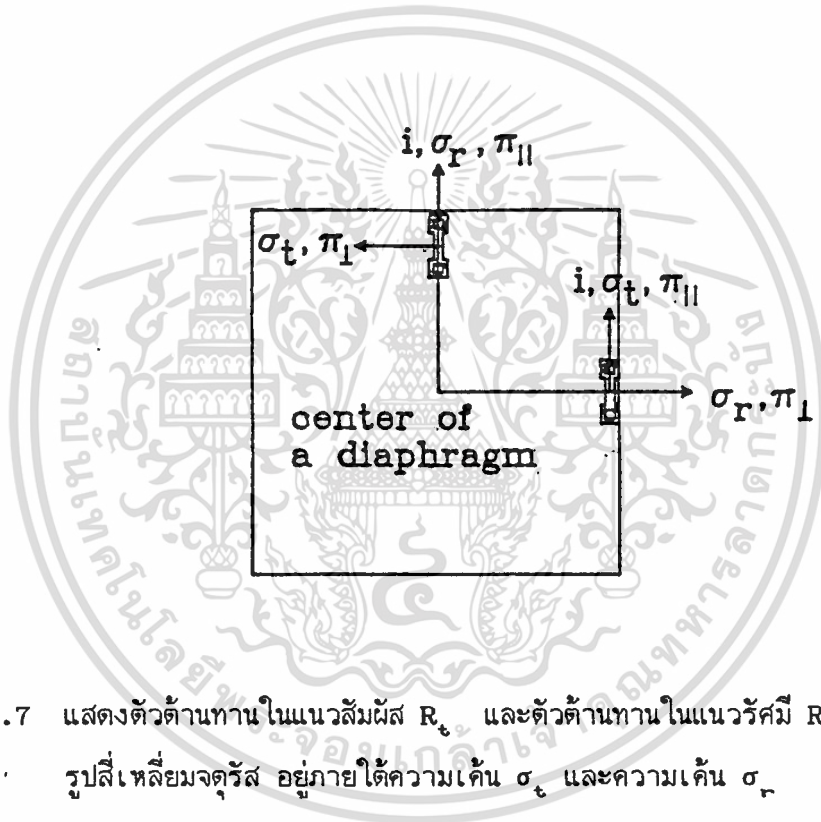
และ ความเค้นตั้งฉาก σ_{\perp}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควรใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวต้านทานในแนวสัมผัส (tangential resistor) R_t และตัวต้านทานในแนวรัศมี (radial resistor) R_r ซึ่งวางอยู่บนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส อยู่ภายใต้ความเค้น σ_t และความเค้น σ_r ดังแสดงในรูปที่ 1.7 อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสองจะแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า [10]

$$(\Delta R/R)_t = \pi_{||}\sigma_t + \pi_{\perp}\sigma_r \quad (1.11)$$

$$(\Delta R/R)_r = \pi_{||}\sigma_r + \pi_{\perp}\sigma_t \quad (1.12)$$



รูปที่ 1.7 แสดงตัวต้านทานในแนวสัมผัส R_t และตัวต้านทานในแนวรัศมี R_r บนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส อยู่ภายใต้ความเค้น σ_t และความเค้น σ_r

สำหรับสารกึ่งตัวนำซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ diamond-cubic ดังเช่นซิลิกอน เมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสที่ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์อิสระ (independent coefficient) 3 ตัว ได้แก่ π_{11} , π_{12} และ π_{44} สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสที่ $\pi_{||}$ และ π_{\perp} ในทิศทางใดๆ ของผลึกจะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ π_{11} , π_{12} และ π_{44} ดังสมการ [11]

$$\pi_{||} = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \quad (1.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
 $\pi_{\perp} = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)$ (1.14)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ l_1, m_1 และ n_1 เป็นโคเรคชันโคไซน์ระหว่างเวกเตอร์ที่ขนานกับแกนยาวของตัวต้านทานกับทิศทางของแกนผลึก (crystallographic axes) l_2, m_2 และ n_2 เป็นโคเรคชันโคไซน์ระหว่างเวกเตอร์ที่ขนานกับแกนสั้นของตัวต้านทานกับทิศทางของแกนผลึก

สัมประสิทธิ์ π_{11}, π_{12} และ π_{44} มีค่าขึ้นกับชนิดของซิลิกอน (เอ็นหรือพี) ตารางที่ 1.1 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ π_{11}, π_{12} และ π_{44} ในซิลิกอนทั้งชนิดเอ็นและพีที่อุณหภูมิห้อง โดย C.S. Smith [3] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในซิลิกอนชนิดพีค่าสัมประสิทธิ์ π_{44} มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ π_{11} และ π_{12} ส่วนในซิลิกอนชนิดเอ็นค่าสัมประสิทธิ์ π_{11} และ π_{12} มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ π_{44} ดังนั้นสามารถประมาณได้ว่า [12] ค่าสัมประสิทธิ์ $\pi_{11} = -2\pi_{12}$ และ $\pi_{44} = 0$ ในซิลิกอนชนิดเอ็น และ $\pi_{11} = \pi_{12} = 0$ ในซิลิกอนชนิดพี จากสมการที่ (1.13) และสมการที่ (1.14) สำหรับตัวต้านทานชนิดเอ็น

$$\begin{aligned}\pi_{\parallel} &= \pi_{11} [1 - 3(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2)] \\ \pi_{\perp} &= \pi_{11} [-1/2 + 3/2(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)]\end{aligned}\quad (1.15)$$

สำหรับตัวต้านทานชนิดพี

$$\begin{aligned}\pi_{\parallel} &= 2\pi_{44} (l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \\ \pi_{\perp} &= -\pi_{44} (l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)\end{aligned}\quad (1.16)$$

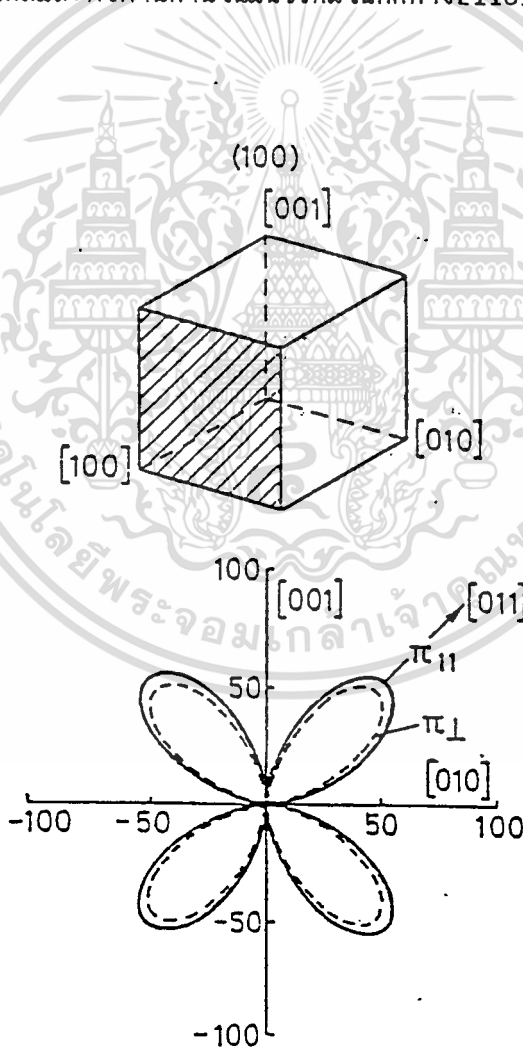
ตารางที่ 1.1

ค่าสัมประสิทธิ์เพีย ไชร์ชิสทีปที่อุณหภูมิห้องสำหรับซิลิกอนชนิดเอ็นและพี

วัสดุ	พิกัดความต้านทาน (ohm-cm)	π_{11}	π_{12}	π_{44}
		(10 ⁻¹² cm ² /dyne)		
n-Si	11.7	-102.2	+53.4	-13.6
p-Si	7.8	+6.6	-1.1	+138.1

1.4 การเลือกชนิด ระนาบ(orientation) ของฐานรองและทิศทางของตัวต้านทาน

การเลือกชนิดและระนาบของฐานรองที่นำมาใช้สร้างทรานซิสเตอร์ความดันจะต้องเข้ากันได้กับกระบวนการมาตรฐานของซิลิกอน เมื่อพิจารณาถึงชนิดและระนาบของแผ่นผลึกซิลิกอนซึ่งเป็นที่ยอมรับใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในอุตสาหกรรม รวมทั้งเทคนิคการกัดและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัด ไดอะแฟรมพบว่าแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) มีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ความดันแบบเป็ยโซริซิสทีป โดยพื้นฐานแล้วทรานซิสเตอร์ความดันเกือบจะทั้งหมดเป็นตัวต้านทานชนิดพี สำหรับแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) สัมประสิทธิ์เป็ยโซริซิสทีปขนาด π_{\parallel} และตั้งฉาก π_{\perp} มีค่าเกือบจะเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 1.8 [9] เมื่อพิจารณาจากรูป สามารถสรุปได้ว่าควรวาง (align) ตัวต้านทานทั้งสอง ซึ่งแบ่งเป็นตัวต้านทานในแนวสัมผัสและตัวต้านทานในแนวรัศมีในทิศทาง [110] ทั้งหมด



รูปที่ 1.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์เป็ยโซริซิสทีปขนาด π_{\parallel} และตั้งฉาก π_{\perp} สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตฐานรองซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) ที่อุณหภูมิต้อง [9] ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวต้านทานชนิดพีเมื่อวางในทิศทาง [110] สามารถคำนวณหาค่าไดเรกชันโคไซน์ได้

$l_1 = m_1 = 2/2; n_1 = 0$ และ $l_2 = m_2 = 2/2; n_2 = 0$ แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการที่ (1.16) ได้ผลว่า

$$\pi_{\parallel} = (2\pi_{44})(1/4) = \pi_{44}/2 \quad (1.17)$$

และ
$$\pi_{\perp} = (-\pi_{44})(1/2) = -\pi_{44}/2 \quad (1.18)$$

แทนค่าสัมประสิทธิ์ π_{\parallel} และ π_{\perp} จากสมการที่ (1.17) และสมการที่ (1.18) ลงในสมการที่ (1.11) และสมการที่ (1.12) ตามลำดับ ได้

$$(\Delta R/R)_{\perp} = (\pi_{44}/2)(\sigma_{\perp} - \sigma_{\parallel}) \quad (1.19)$$

และ
$$(\Delta R/R)_{\parallel} = (\pi_{44}/2)(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \quad (1.20)$$

หรือ
$$-(\Delta R/R)_{\perp} = (\Delta R/R)_{\parallel} = (\pi_{44}/2)(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \quad (1.21)$$

สมการที่ (1.19) และ (1.20) เป็นสมการซึ่งแสดงว่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานในแนวสัมผัส R_{\perp} และตัวต้านทานในแนวรัศมี R_{\parallel} มีค่าขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีป π_{44} และค่าความแตกต่างของความเค้น σ_{\parallel} และ σ_{\perp} นอกจากนี้ในสมการที่ (1.21) ได้แสดงว่า อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานในแนวสัมผัส $(\Delta R/R)_{\perp}$ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานในแนวรัศมี $(\Delta R/R)_{\parallel}$ แต่เปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้ามกัน

เทอมของความเค้นดิฟเฟอเรนเชียล (differential stress) $\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}$ ซึ่งเกิดจากการแ่นตัวของไดอะแฟรม สามารถเขียนแสดงเป็นความสัมพันธ์กับขนาดของไดอะแฟรมได้ดังสมการ [13]

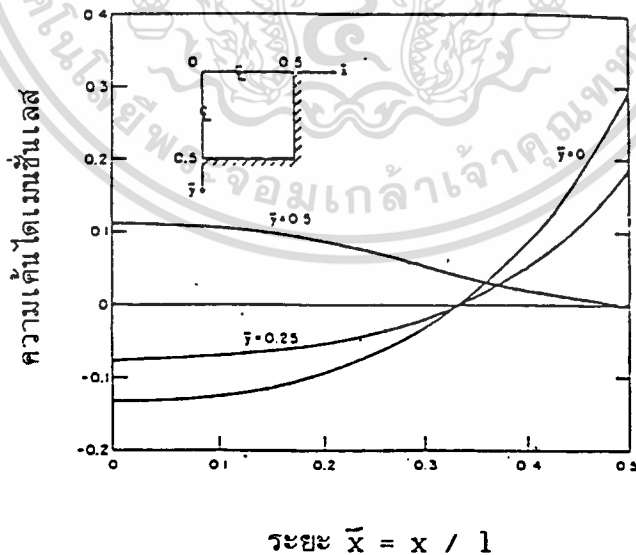
$$\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp} = \bar{\sigma}(x,y) (l/d)^2 P \quad (1.22)$$

โดยที่ $\bar{\sigma}$ เป็นความเค้นไดเมนชันเลส (dimensionless stress) ซึ่งมีค่าแปรตามตำแหน่งของตัวต้านทานบนไดอะแฟรม l และ d คือขนาดและความหนาของไดอะแฟรมตามลำดับ และ P คือ ความดันซึ่งกระทำกับไดอะแฟรม แทนค่าจากสมการที่ (1.22) ลงในสมการที่ (1.21) จะได้

$$-(\Delta R/R)_{\bar{x}} = (\Delta R/R)_{\bar{y}} = (\pi_{44}/2) \bar{\sigma}(x,y) (l/d)^2 P \quad (1.23)$$

1.5 ตำแหน่งการวางตัวด้านทานบน ไดอะแฟรม

สำหรับแผ่นไดอะแฟรมซิลิกอนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความหนาสม่ำเสมอ d เมื่อมีความดัน P กระทำบนแผ่นไดอะแฟรมในลักษณะตั้งฉากและกระจายไปทั่วแผ่นอย่างสม่ำเสมอ และพิจารณาว่าการแอ่นตัวของไดอะแฟรมมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความหนาของไดอะแฟรม [14] ความเค้นไคเมนชั้นเลสจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งต่างๆ บนไดอะแฟรม รูปที่ 1.9 แสดงการกระจายค่าความเค้นไคเมนชั้นเลสใน 1 ควอดแรนท์ (quadrant) ของไดอะแฟรมสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขอบในตัว (built-in) เส้นกราฟแสดงว่าที่ตำแหน่งชิดขอบไดอะแฟรม ค่าความเค้นไคเมนชั้นเลสมีค่ามาก ดังนั้นตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการวางตัวด้านทานในแนวล้มผัสคือ ตำแหน่งที่ $\bar{x} = 0.5$; $\bar{y} = 0$ และตัวด้านทานในแนวรัศมีคือ $\bar{x} = 0$; $\bar{y} = 0.5$ โดยที่ $\bar{x} = x/l$; x คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมถึงขอบ

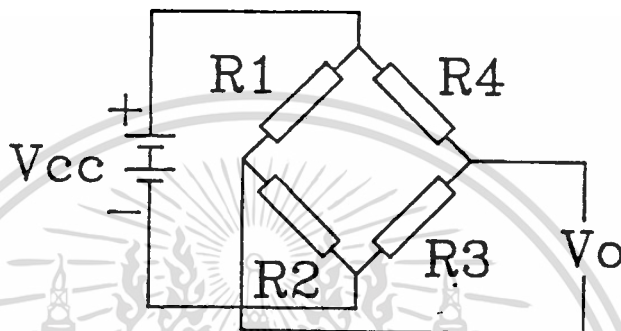


รูปที่ 1.9 แสดงการกระจายของความเค้นไคเมนชั้นเลสใน 1 ควอดแรนท์ของไดอะแฟรม

ซึ่งมีขอบในตัว [14] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 วงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge circuit)

เนื่องจากลักษณะของทรานสดิวเซอร์ความต้านแบบเป็ยโซวีซีสที่ปอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ดังนั้นจึงสามารถนำวงจรวีทสโตนบริดจ์มาใช้กับทรานสดิวเซอร์ความต้านชนิดนี้เพื่อที่จะแปลงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ΔR ให้อยู่ในรูปของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า V_o ลักษณะของวงจรวีทสโตนบริดจ์แสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 แสดงวงจรวีทสโตนบริดจ์ของตัวต้านทาน

หลักการของวีทสโตนบริดจ์คือ ถ้าอัตราส่วน $R_1/R_2 = R_4/R_3$ แล้ว แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เรียกว่าบริดจ์สมดุล (balanced bridge) แต่ถ้าความต้านทานของตัวต้านทาน R_1 , R_2 , R_3 , หรือ R_4 ตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนแปลงจะทำให้บริดจ์เสียสมดุล (unbalanced bridge) ทำให้แรงดันเอาต์พุต V_o ไม่เท่ากับศูนย์

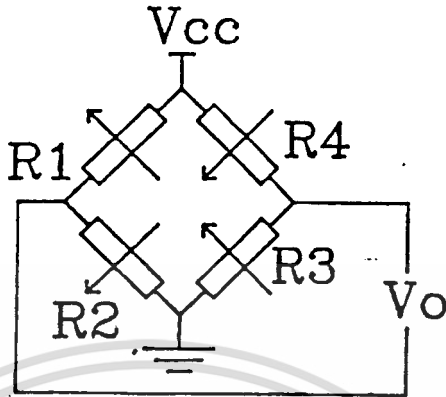
เมื่อนำตัวต้านทานชนิดพี R_1 , R_2 , R_3 , และ R_4 ซึ่งวางอยู่บนไดอะแฟรมสี่เหลี่ยมจตุรัสในทิศทาง [110] และมีค่าความต้านทานเท่ากันหมดคือ R มาเชื่อมต่อกันเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.10 กำหนดให้ตัวต้านทาน R_1 และ R_3 เป็นตัวต้านทานในแนวรัศมี R_r และกำหนดให้ตัวต้านทาน R_2 และ R_4 เป็นตัวต้านทานในแนวสัมผัส R_t เมื่อป้อนความดันกระทำกับไดอะแฟรม ความต้านทานของตัวต้านทาน R_1 และ R_3 จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น

$$R_1 = R_3 = R + \Delta R \quad (1.24)$$

ในทำนองเดียวกัน ความต้านทานของตัวต้านทาน R_2 และ R_4 จะเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น

$$R_2 = R_4 = R - \Delta R \quad (1.25)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานซึ่งต่อเป็นวงจรวัดแรงดัน โดยอะแพรมของทรานสดิวเซอร์ความดัน

ดังแสดงในรูปที่ 1.11 เมื่อป้อนแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ (constant voltage source) V_{cc} ให้กับวงจรวัดแรงดัน จะคำนวณแรงดันเอาต์พุต V_o ได้จากสมการ [10]

$$V_o/V_{cc} = (1/2) [(\Delta R/R)_p - (\Delta R/R)_s] \tag{1.26}$$

แทนค่า $(\Delta R/R)_p$ และ $(\Delta R/R)_s$ จากสมการที่ (1.23) ลงในสมการที่ (1.26) จะได้

$$V_o/V_{cc} = (\pi_{44}/2) \sigma(x,y) (l/d)^2 P \tag{1.27}$$

หรือ
$$V_o/V_{cc} = S P \tag{1.28}$$

โดยที่ S คือ pressure sensitivity ซึ่ง

$$S = (\pi_{44}/2) \sigma(x,y) (l/d)^2 \tag{1.29}$$

รูปสมการที่ (1.28) แสดงให้เห็นว่าความไวของสัญญาณเอาต์พุตของบริดจ์ตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากับผลคูณของค่า pressure sensitivity กับความดันที่ป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์ความดัน

1.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ความดันแบบเบย์โซริชิสทีป สำหรับบริดจ์ตัวต้านทาน แรงดันเอาต์พุทของบริดจ์ถูกกำหนดจาก [13]

$$V_o/V_{cc} = (1/2)[(\Delta R/R)_p - (\Delta R/R)_n] = \pi_{44}[(\sigma_p - \sigma_n) + \sigma_T] + \beta \quad (1.30)$$

โดยที่ σ_T คือความเค้นซึ่งเกิดจากความร้อน และ β คือผลรวมของแรงดันออฟเซตซึ่งเกิดจากมิสแมทช์ของตัวต้านทาน

จากสมการที่ (1.30) ในภาวะซึ่งไม่มีความดันกระทำกับไดอะแฟรมหรือ $P = 0$ ความเค้น σ_p และ σ_n ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวของไดอะแฟรมจะมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันเอาต์พุทของบริดจ์จะเป็นค่าแรงดันออฟเซตซึ่งแสดงได้ว่า

$$V_o (p = 0) = V_{cc} (\pi_{44} \sigma_T + \beta) \quad (1.31)$$

จากสมการที่(1.31) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง แรงดันออฟเซตจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิซึ่งแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันออฟเซตต่ออุณหภูมิ (temperature sensitivity of the offset, TSO) ดังสมการ [13]

$$TSO = (1/V_{cc})(\partial V_o/\partial T) = (\partial \pi_{44}/\partial T)\sigma_T + \pi_{44}(\partial \sigma_T/\partial T) + \partial \beta/\partial T \quad (1.32)$$

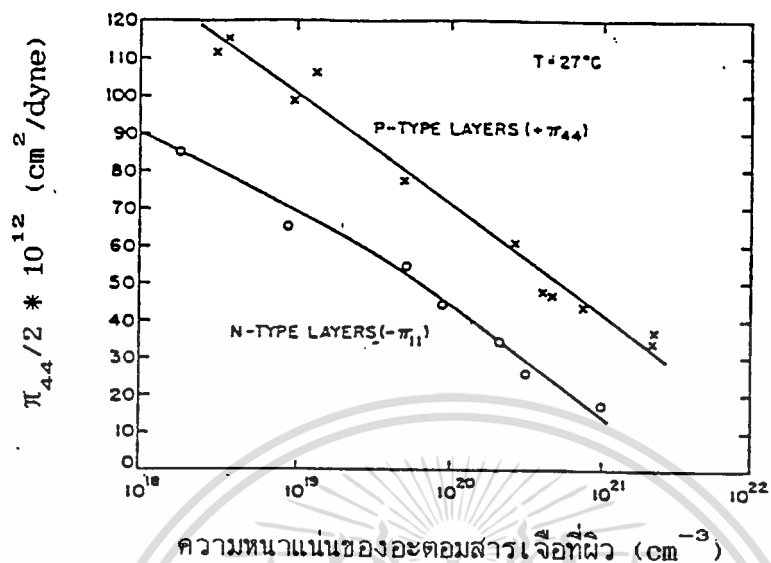
จากสมการที่ (1.29) ค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันจะเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิซึ่งแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับอุณหภูมิ (the temperature coefficient of the pressure sensitivity, TCS) ดังสมการ [13]

$$TCS = (1/S)(\partial S/\partial T) = (1/\pi_{44})(\partial \pi_{44}/\partial T) \quad (1.33)$$

สมการที่ (1.33) แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับอุณหภูมิเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์เบย์โซริชิสทีป π_{44} กับอุณหภูมิ

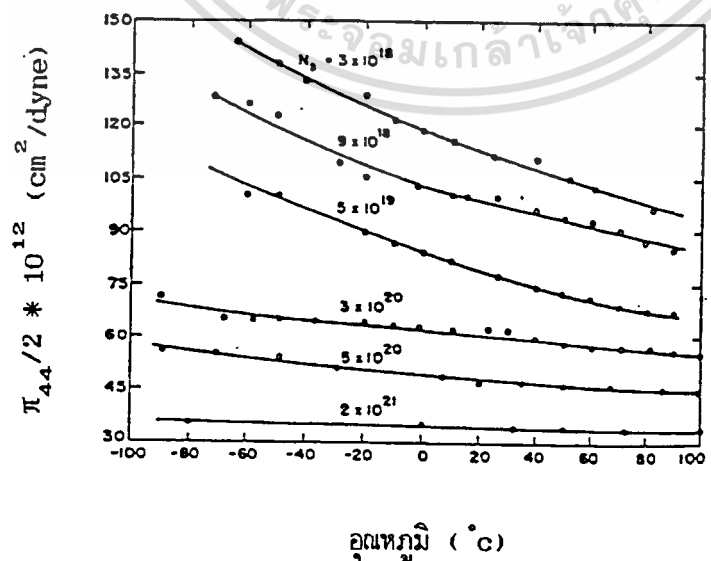
ค่าสัมประสิทธิ์เบย์โซริชิสทีป π_{44} มีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือ จากผลการทดลอง [15] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เบย์โซริชิสทีป π_{44} ลดลง เมื่อความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูงขึ้น การแปรค่าของสัมประสิทธิ์ π_{44} ในซิลิกอนชนิดพีกับค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ

ห้องแสดงในรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์เฮย์ใช้วิธีสี่ขั้ว $\pi_{4.4}$ กับความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ $\pi_{4.4}$ ในชั้นพีกับอุณหภูมิและความหนาแน่นอะตอมสารเจือ แสดงในรูปที่ 1.13 [15] ถ้าความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าประมาณ 10^{20} cm^{-3} ขึ้นไป ค่าสัมประสิทธิ์ $\pi_{4.4}$ เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้อยมาก ถ้าความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าต่ำมากๆ ค่าสัมประสิทธิ์ $\pi_{4.4}$ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 1.13 การแปรค่าสัมประสิทธิ์ $\pi_{4.4}$ ในชั้นพีกับอุณหภูมิที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่าต่างๆ การคำนวณเป็นเอกสารที่ส่งมอบให้สำหรับโครงการวิจัยของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศแห่งชาติ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 ผลของมismatch (mismatch) ของบริดจ์ตัวต้านทาน

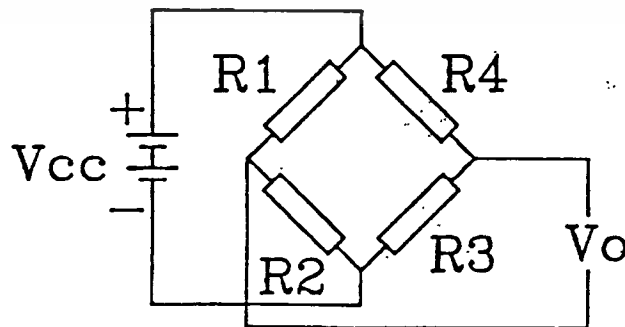
ในสภาวะที่ไม่มีความดันกระทำกับตัวต้านทาน เมื่อไบอัส(bias) บริดจ์ตัวต้านทานด้วยแหล่งจ่ายศักดาตงที่ตั้งแสดงในรูปที่ 1.14 ที่อุณหภูมิเริ่มต้นคงที่ค่าหนึ่งแรงดันเอาต์พุท ΔV_o ของบริดจ์จะมีค่าเป็นศูนย์ถ้า

$$R1 \cdot R3 = R2 \cdot R4 \quad (1.34)$$

โดยกำหนดให้ค่าความต้านทาน $R1 = R2 = R3 = R4$ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้น ความต้านทานของตัวต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเป็น $R1 + \Delta R1$, $R2 + \Delta R2$, $R3 + \Delta R3$, และ $R4 + \Delta R4$ ถ้าสัมประสิทธิ์ความร้อนของตัวต้านทาน (thermal coefficient of resistance) มีค่าเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสี่จะเท่ากัน นั่นคือ $\Delta R1 = \Delta R2 = \Delta R3 = \Delta R4$ บริดจ์จะยังคงอยู่ในภาวะสมดุลย์ ซึ่งแสดงได้ว่า [2]

$$(1 + \Delta R1/R1)(1 + \Delta R3/R3) = (1 + \Delta R2/R2)(1 + \Delta R4/R4) \quad (1.35)$$

ในทางปฏิบัติ การแพร่สารเจือสร้างตัวต้านทานด้วยเทคนิคการแพร่ด้วยความร้อนจะทำให้ค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน ความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละตัวจึงมีค่าไม่เท่ากัน เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนของตัวต้านทานต่างกันด้วย เมื่อนำตัวต้านทานมาต่อเป็นวงจรบริดจ์จะปรากฏค่าแรงดันออฟเซตค่าหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นค่าแรงดันออฟเซตนี้จะขยับเลื่อน(drift) ตามอุณหภูมิด้วย



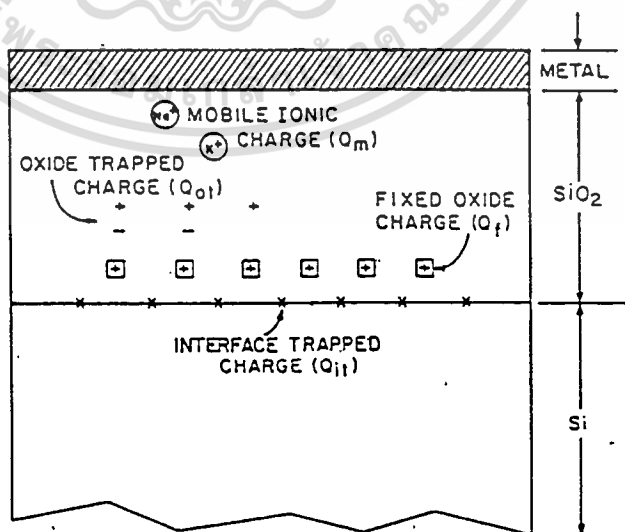
1.9 การขยับเลื่อนของสัญญาณ (electrical drift)

การดริฟท์หรือขยับเลื่อนของสัญญาณในทรานซิสเตอร์ความดันแบบเปียโซริซิสทีปเป็นผลจากกระแสรั่วที่ผิว (surface leakage current) กระแสรั่วที่ผิวเกิดจากสิ่งเจือปน (impurity) ซึ่งกระจายอยู่ในชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และที่รอยเชื่อมต่อระหว่างชั้นซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ (Si-SiO₂ interface) ซึ่งได้แก่ ประจุ (charges) และแตรป (traps) ชนิดต่างๆ เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าจากการไบอัสให้กับบริดจ์ตัวต้านทาน ประจุบางชนิดจะเคลื่อนที่ได้เกิดเป็นกระแสรั่วที่ไหลไปรบกวนระหว่างตัวต้านทานข้างเคียงมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ความดัน โดยทำให้สัญญาณเอาท์พุทขยับเลื่อนและกระเพื่อม (fluctuation)

1.9.1 อินเตอร์เฟสแตรป (interface trap) และออกไซด์ชาร์จ (oxide charge) [16]

การจำแนกประเภทพื้นฐานของประจุและแตรปเหล่านี้แสดงในรูปที่ 1.15 ซึ่งได้แก่ อินเตอร์เฟสแตรปชาร์จ (interface-trapped charge) ฟิกซ์ออกไซด์ชาร์จ (fixed-oxide charge) ออกไซด์แตรปชาร์จ (oxide-trapped charge) โมบิลไอออนิกชาร์จ (mobile ionic charge)

อินเตอร์เฟสแตรปชาร์จ Q_{it} เกิดเนื่องจากคุณสมบัติของรอยเชื่อมต่อของซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์และขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของรอยต่อทั้งสอง ตำแหน่งที่ตั้งของแตรปเหล่านี้อยู่ที่รอยเชื่อมต่อของซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ โดยมีสถานะพลังงานอยู่ในแถบต้องห้ามของซิลิกอน



ความหนาแน่นอินเตอร์เฟสแทรป(interface trap density) (คือจำนวนของอินเตอร์เฟสแทรปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) มีค่าขึ้นกับระนาบ ความหนาแน่นอินเตอร์เฟสแทรปในระนาบ(100) มีค่าน้อยกว่าในระนาบ(100) ประมาณหนึ่งอันดับ(order) ค่าของ Q_{it} สำหรับซิลิกอนระนาบ(100) สามารถทำให้มีค่าต่ำเพียง 10^{10} ซม.⁻² ซึ่งจะมีจำนวนอินเตอร์เฟสชาร์จประมาณ 1 ตัวต่ออะตอมที่ผิว 10^5 อะตอม สำหรับซิลิกอนระนาบ(100) Q_{it} มีค่าประมาณ 10^{11} ซม.⁻²

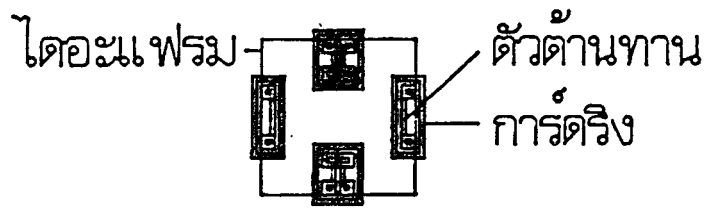
ฟิสิกส์ออกไซด์ชาร์จ Q_{ox} มีตำแหน่งอยู่ภายในช่วงประมาณ 30 อังสตรอมของรอยเชื่อมต่อซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ ประจุเหล่านี้อยู่กับที่และไม่สามารถถูกประจุหรือคายประจุได้ โดยปกติแล้ว Q_{ox} มีค่าบวกและขึ้นกับเงื่อนไขการทำออกซิเดชันและการแอนนัลและระนาบของซิลิกอน เมื่อกระบวนการออกซิเดชันสิ้นสุด อีออนของซิลิกอนบางตัวจะยังคงอยู่ใกล้กับรอยเชื่อมต่อ อีออนเหล่านี้และพันธะที่ไม่สมบูรณ์ของซิลิกอน(เช่น พันธะระหว่าง Si-Si และ Si-O) ที่ผิว เป็นสาเหตุให้เกิดเป็นฟิสิกส์ออกไซด์ชาร์จ Q_{ox} ซึ่งอาจคำนึงได้ว่า Q_{ox} เป็นแผ่นประจุ(charge sheet) อยู่ที่รอยเชื่อมต่อของซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ ความหนาแน่นฟิสิกส์ออกไซด์ชาร์จโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 10^{10} ซม.⁻² สำหรับผิวระนาบ(100) และประมาณ 5×10^{10} ซม.⁻² สำหรับผิวระนาบ(100)

ออกไซด์แทรปชาร์จ Q_{ot} เกี่ยวข้องกับจุดเสีย(defects) ในซิลิกอนไดออกไซด์ ประจุเหล่านี้เกิดจากสาเหตุตั้งเช่น การแผ่รังสีเอ็กซ์ หรือ high-energy electron bombardment แทรปเหล่านี้จะกระจายอยู่ทั่วไปในชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

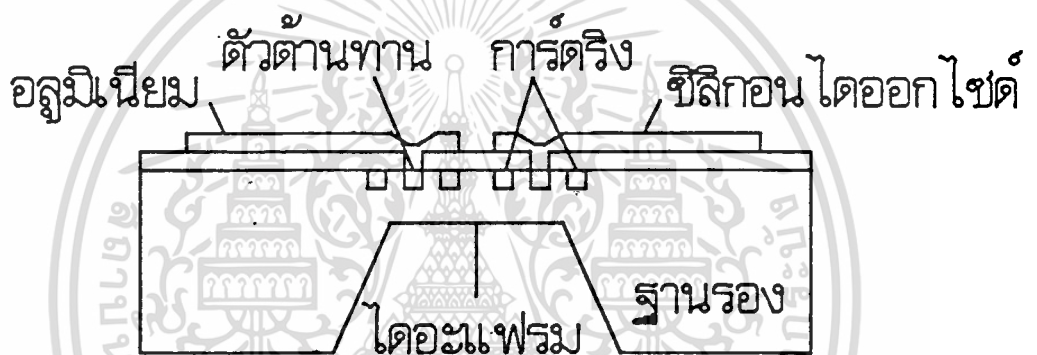
โมบิลอ็อกซิดชาร์จ Q_{ox} ดังเช่น โซเดียมหรืออีออนของธาตุอัลคาไลอื่นๆ จะเคลื่อนที่ภายในออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิและศักดาไฟฟ้าค่าสูง รอยทางของอีออนของโลหะอัลคาไลเป็นสาเหตุการเกิดปัญหาทางเสถียรภาพในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเมื่อทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงอีออนเหล่านี้มีทิศทางเคลื่อนที่ไปมาผ่านชั้นออกไซด์ขึ้นกับเงื่อนไขการไบอัส

1.9.2 การ์ดริง(guard-ring)

การ์ดริงเป็น โครงสร้างที่ทำหน้าที่ป้องกันกระแสรั่วที่ผิว ลักษณะโครงสร้างของการ์ดริงแสดงในรูปที่ 1.16 การ์ดริงชนิดนี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดตรงกันข้ามกับฐานรอง บริเวณเปลือยพาหะ(depletion region) ที่รอยต่อพี-เอ็นของการ์ดริงและฐานรองซึ่งมีแรงดันภายในตกคร่อม 0.6 โวลท์จะเปรียบเสมือนเป็นกำแพงศักย์ที่ต้านทานการไหลของกระแสรั่ว ดังนั้นการสร้างการ์ดริงล้อมรอบตัวต้านทานแต่ละตัวจะช่วยป้องกันการรบกวนของกระแสรั่วที่ไหลไปรบกวนกระแสไบอัสของตัวต้านทาน และลดการรบกวนของกระแสรั่วระหว่างตัวต้านทานด้วย



(ก)



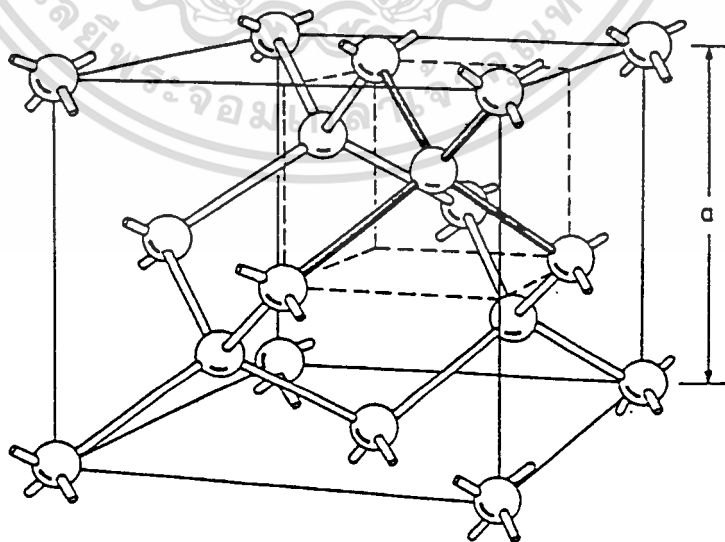
(ข)

รูปที่ 1.16 แสดงส่วนของกัรตริง (ก) แสดงภาพด้านบน (top view)
(ข) แสดงภาพตัดขวาง (cross section)

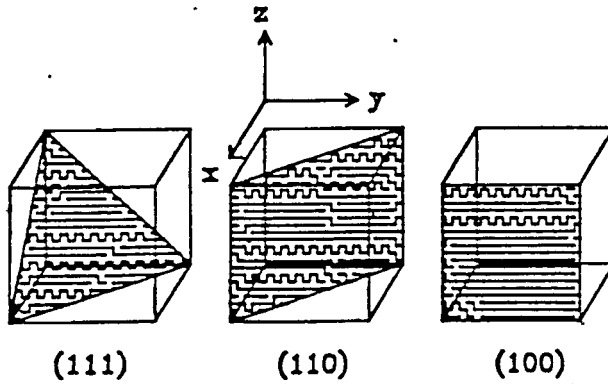
1.10 กระบวนการกัดซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic)

การกัดซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิกได้กลายมาเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจากซิลิกอน กระบวนการกัดซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิกคือ กระบวนการที่สารละลาย (etchant) กัดเนื้อสารซิลิกอนในแต่ละระนาบของผลึกซิลิกอนไม่เท่ากันหรือกล่าวได้ว่าอัตราการกัดของสารละลายแปรตามระนาบของผลึก ซิลิกอนมีโครงสร้างผลึกแบบผลึกเพชร (diamond) ดังแสดงในรูปที่ 1.17 ในผลึกแบบเพชรทิศทางของผลึกจะตั้งฉากกับระนาบของผลึกเสมอ [17] ดังแสดงในรูปที่ 1.18 ซึ่งแสดงตำแหน่งและการวางตัวและทิศทางของระนาบ (100) (110) และ (111) การที่สารละลายมีอัตราการกัดในระนาบหนึ่งของผลึกเร็วกว่าอีกระนาบหนึ่ง เป็นผลมาจากความหนาแน่นของการจัดเรียงอะตอมของผลึกซิลิกอนในระนาบต่างๆ ไม่เท่ากัน [18]

สารละลายซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ pyrocatechol $C_6H_4(OH)_2$, ethylenediamine $NH_2(CH_2)_2NH_2$, และ deionized water หรือมีชื่อย่อว่า PED เป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก [18] อัตราการกัดของ PED ในผลึกซิลิกอนระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้ $(100) > (110) > (111)$ [18] ในทางปฏิบัติชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะถูกใช้เป็นตัวฉนวนป้องกันการกัดของสารละลายเนื่องจากอัตราการกัดของซิลิกอนไดออกไซด์ใน PED ช้ามาก

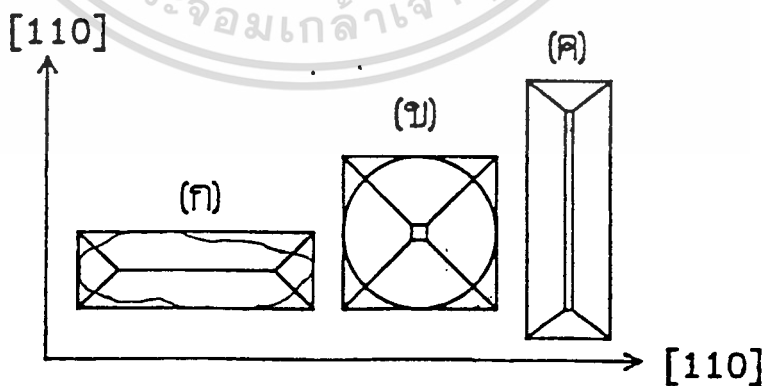


รูปที่ 1.17 แสดงโครงสร้างผลึกของผลึกซิลิกอน



รูปที่ 1.18 แสดงตำแหน่งและการวางตัวและทิศทางของระนาบ (100) (110) และ (111) ในผลึกซิลิกอน

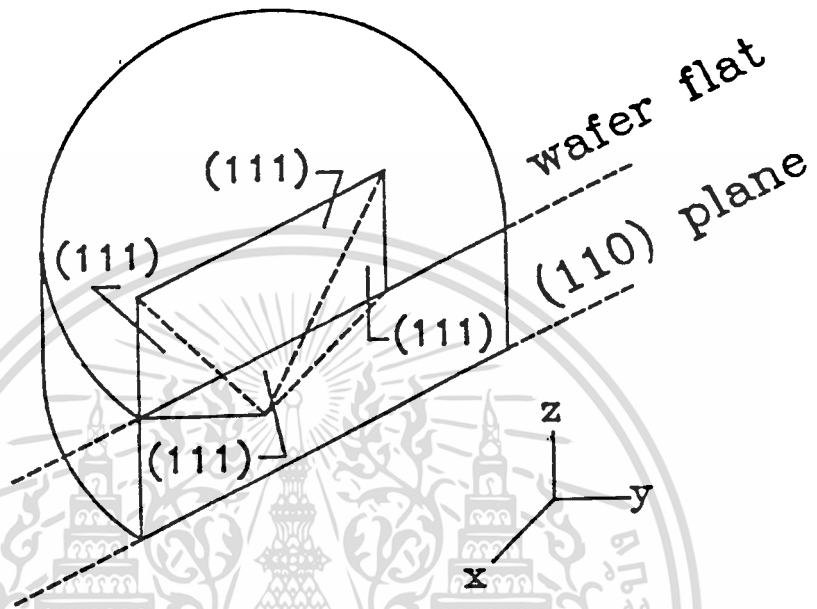
รูปที่ 1.19 [19] แสดงรูปร่างของหลุม 3 หลุม ซึ่งเกิดจากการกัดของสารละลาย PED บนแผ่นฐานรองซิลิกอนระนาบ (100) ชั้นออกไซด์ที่ผิวของฐานรองถูกเปิดออกเป็นช่อง โดยมีลักษณะทางเรขาคณิตแบบต่างๆ เมื่อเริ่มกระบวนการกัด สารละลายจะกัดเนื้อซิลิกอนในระนาบ (100) จนกระทั่งเวลาผ่านไปนานพอสมควร ฐานรองซิลิกอนจะถูกกัดลงไปเป็นหลุมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าล้อมรอบผิวที่ถูกเปิดเป็นช่อง หลุมเหล่านี้จะถูกล้อมรอบด้วยผนังที่ลู่เข้าหากันเป็นรูปตัววี (V-shape) ซึ่งเป็นระนาบ (111) แต่ละด้านทำมุมกับระนาบ (100) ของผิวของฐานรองเป็นมุม 54.74 องศา และด้านของสี่เหลี่ยมแต่ละด้านจะขนานหรือตั้งฉากกับทิศทาง. [110]



รูปที่ 1.19 แสดงหลุมที่เกิดจากการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกบนผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ที่แตกต่างกัน 3 แบบคือ (ก) ไม่เป็นรูปทรง (ข) รูปวงกลม และ (ค) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ผนังของหลุมที่เกิดจากการกัดเป็นระนาบ (111) ที่ลู่เข้าหากันเป็นรูปตัววี [19] โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



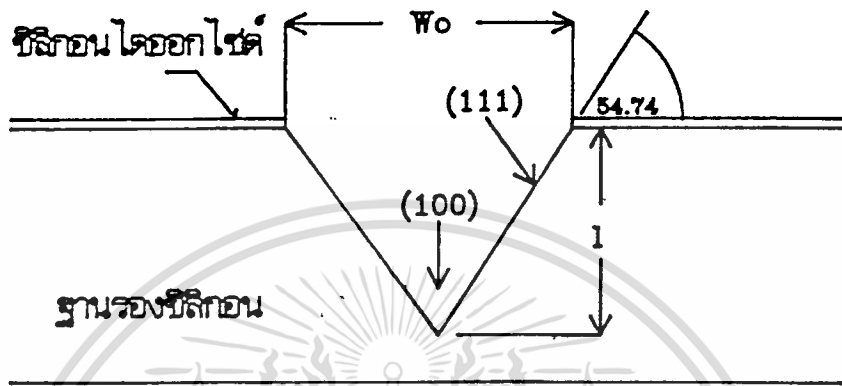
รูปที่ 1.20 แสดงเซตของระนาบ (111) ที่สมมูลกันจำนวน 4 ระนาบในผลึกระนาบ (100) ซึ่งตัดกันที่ผิวไปตามทิศทาง [110]

ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้จะพิจารณาได้จากรูปที่ 1.20 ซึ่งแสดงตำแหน่งและการวางตัวของระนาบทั้งสามคือ (100) (110) และ (111) ในผลึกซิลิกอน ดังจะเห็นได้ว่ารอยตัดของระนาบ (111) กับระนาบ (001) จะขนานและตั้งฉากกับทิศทาง [110] พิจารณารูปที่ 1.21 อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของหลุมที่ได้จะมีค่า 0.707 แสดงว่าหากเราเปิดช่องออกไซด์เป็นแนวยาวรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 10 ไมครอน สารละลายจะกัดเนื้อซิลิกอนลึกลงไป 0.707 ไมครอน ถ้าช่องออกไซด์ที่ผิวของฐานรองถูกเปิดออกเป็นช่องซึ่งมีขนาดใหญ่และใช้เวลาดำเนินการกัดน้อยก็จะได้หลุมซึ่งเป็นรูปตัวยู (U-shape) ดังแสดงในรูปที่ 1.22 ความกว้างของพื้นหลุมจะหาได้จากสมการ [16]

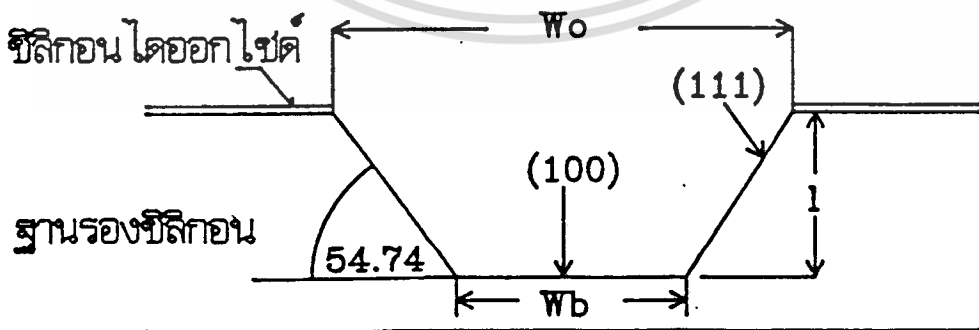
$$W_b = W_o - \sqrt{2l} \cot 54.7^\circ$$

$$= W_o - \sqrt{2l} \quad (1.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



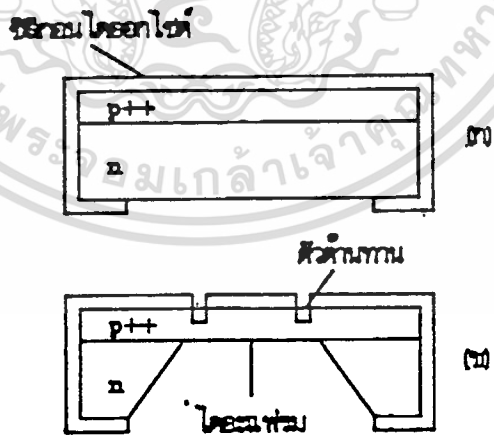
รูปที่ 1.21 แสดงภาพตัดขวางของหลุมรูปตัววี



1.11 เทคนิคการควบคุมความหนาของ ไดอะแพรม

ความหนาของ ไดอะแพรมนับเป็นพารามิเตอร์ซึ่ง ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ว่ามีผลต่อความไวของทรานซิสเตอร์ความดันมากที่สุด ในกระบวนการกัฏฐานรองซิลิกอนด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อสร้างเป็น ไดอะแพรม ได้มีรายงานการทดลองนำเทคนิคต่างๆมาใช้เพื่อควบคุมความหนาของ ไดอะแพรมเช่น เทคนิค boron etch - stop, เทคนิค v - groove เป็นต้น

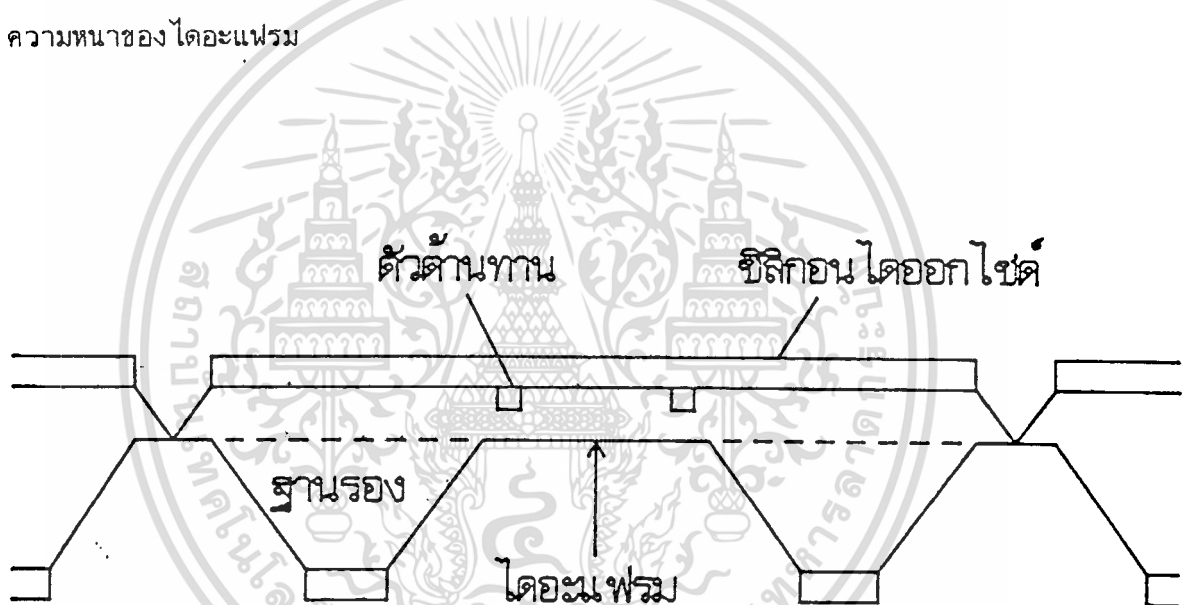
ในปี คศ.1971 ได้มีการนำเทคนิค boron etch-stop [18] มาใช้ในการทดลองกัฏเนื้อสารซิลิกอนโดยอาศัยคุณสมบัติว่าสารละลาย PED จะหยุดกัฏที่รอยต่อ p^{++} ซึ่งเป็นชั้นสารเจือของ โบรอนที่มีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงคือ มีค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือมากกว่า $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ขึ้นไป โดยชั้น p^{++} นี้ถูกสร้างชั้นด้วยกระบวนการอิพิแทกซีจึงสามารถกำหนดความหนาของ ไดอะแพรมได้ในช่วง 10-30 ไมครอน ด้วยเทคนิคนี้จึงสามารถสร้าง ไดอะแพรมซึ่งมีผิวที่เรียบสม่ำเสมอได้ . โดยมีความหนาของ ไดอะแพรมเท่ากับความหนาของชั้นอิพิที่สร้างชั้นดังแสดงด้วยภาพตัดขวางในรูปที่ 1.23 อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นอิพิซึ่งเป็นส่วนของ ไดอะแพรมมีค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูงมาก ดังนั้นจึงเกิดปัญหาในการแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรร เช่น ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เป็นต้น



รูปที่ 1.23 แสดงการใช้เทคนิค boron etch-stop ควบคุมความหนาของ ไดอะแพรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

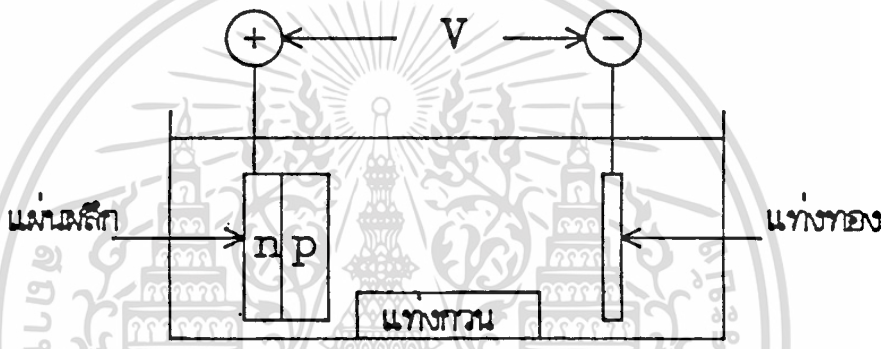
สำหรับวิธีการควบคุมความหนาของไดอะแพรมด้วยเทคนิค v-groove [10] แสดงด้วยภาพตัดขวางในรูปที่ 1.24 ช่องออกไซด์บนแผ่นผลึกด้านหน้าถูกเปิดออกเป็นช่องแคบๆ ซึ่งกำหนดให้เป็นบริเวณขอบของชิพทรานซิสเตอร์ความดัน เมื่อเริ่มต้นกระบวนการกัด สารละลายจะกัดเนื้อซิลิกอนตรงบริเวณที่ไม่มีชั้นออกไซด์ปกคลุมทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นผลึก เมื่อเวลาผ่านไปนานพอสมควรช่องแคบๆ ด้านหน้าจะถูกสารละลายกัดเป็นรูปตัววี ผังของหลุมที่ได้คือระนาบ (111) เนื่องจากอัตราการกัดของสารละลายในระนาบ (111) ช้ามากๆ ดังนั้นจึงดูเหมือนว่ากระบวนการกัดเนื้อซิลิกอนทางด้านหน้าสิ้นสุดลง ส่วนด้านหลังนั้นกระบวนการกัดยังคงดำเนินอยู่ เมื่อสารละลายกัดเนื้อซิลิกอนจนกระทั่งร่องด้วยทางด้านหลังชิพร่องตัววีทางด้านหน้า ชิพทรานซิสเตอร์ก็จะแยกออกจากกันเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการ โดยที่ความลึกของร่องรูปตัววีจะเป็นตัวกำหนดความหนาของไดอะแพรม



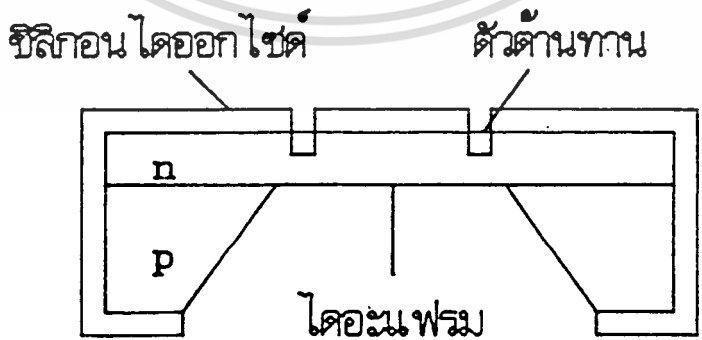
รูปที่ 1.24 แสดงการใช้เทคนิค v-groove ควบคุมความหนาของไดอะแพรม ในการกัดซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิก

ในปี 1981 K.D.Wise ได้เสนอเทคนิคการกัดซิลิกอนด้วยไฟฟ้าในสารละลาย PED ซึ่งสารละลายจะหยุดการกัดที่รอยต่อพี-เอ็น (electrochemical p-n junction etch-stop) [20] โดยใช้หลักการเดียวกันกับเทคนิค boron etch-stop หากแต่ที่ชั้นอิที่สร้างขึ้นนั้น ไม่จำเป็นจะต้องมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูงมากๆ ดังมีชุดทดลองแสดงในรูปที่ 1.25 ศักดาไฟฟ้าค่าต่ำๆ ประมาณ 0.6 โวลต์ ถูกป้อนให้กับแผ่นผลึกทางด้านใดด้านหนึ่งซึ่งประกอบเป็นรอยเอกสารพี-เอ็นเพื่อป้องกันส่วนนั้น ไว้จากการกัดของสารละลาย ศักดาไฟฟ้าค่าบวกนี้จะป้องกันซิลิกอนทั้งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดพีหรือเอ็น โดยมีเงื่อนไขว่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น จะต้องไม่ทำให้เกิดการฟอเวียดไบอัส (forward bias) ที่รอยต่อ เมื่อเริ่มกระบวนการสารละลายจะเริ่มกัดเนื้อซิลิกอนทางด้านซึ่งไม่มีศักดาไฟฟ้าป้อนและจะสิ้นสุดลงที่รอยต่อพี-เอ็น ด้วยวิธีการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้สร้าง ไดอะแฟรมของทรานซิสเตอร์ความดัน ซึ่งมีความราบเรียบสม่ำเสมอและหนาเท่ากับชั้นของซิลิกอนชนิดเอ็นหรือพีที่เหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 1.26 ชั้นเอ็นหรือพีซึ่งเป็นไดอะแฟรมนี้อาจสร้างขึ้นด้วยวิธีการแพร่สารเจือหรืออิมิทาซี (epitaxy) ผลการทดลองพบว่าอัตราการกัดของสารละลาย PED ตรงรอยต่อพี-เอ็น จะลดลงเป็นอัตราส่วน 3000:1



รูปที่ 1.25 แสดงการจัดชุดทดลองกัดซิลิกอนด้วยเทคนิคการกัดด้วยไฟฟ้าในสารละลาย PED ด้วยเทคนิคแบบหยุดการกัดที่รอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 1.26 แสดงส่วนไดอะแฟรมบางของทรานซิสเตอร์ความดัน ซึ่งได้จากการกัดด้วยเทคนิคแบบหยุดการกัดที่รอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การออกแบบ การสร้าง และการเก็บบรรจุ

กระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันประกอบด้วยลำดับขั้นตอนดังนี้

1. การออกแบบและการผลิตกระจกมาสก์ต้นแบบ
2. กระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก
3. กระบวนการแอสเซมบลีและการเก็บบรรจุ

การออกแบบต้นแบบจะต้องพิจารณาจากโครงสร้างและทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์ความดัน โดยเริ่มต้นจากการกำหนดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ แล้วนำมาออกแบบโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการกำหนดขนาดชิพฐานรอง การกำหนดขนาดและการวางตัวของไดอะแฟรม รูปลี่เหลี่ยมจตุรัส การเลือกค่าความต้านทาน รูปร่าง ขนาด ตำแหน่งและการวางตัวของตัวต้านทานบนไดอะแฟรม และการกำหนดขนาดและตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า (aluminum pad) ลวดลายต้นแบบที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการผลิตเป็นกระจกมาสก์ (photographic masks) โดยการถ่ายย้อมส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก กระบวนการสร้างจะเริ่มต้นจากการเลือกชนิดความหนาและนิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกฐานรองซิลิกอน หลังจากนั้นแผ่นผลึกจะผ่านกระบวนการต่างๆ ที่เป็นลำดับที่แน่นอนเช่น กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ กระบวนการกัดฐานรองเมื่อสร้าง ไดอะแฟรม กระบวนการแพร่สารเจือ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการเวตลึไลเซชัน เป็นต้น มาถึงขั้นตอนนี้จะได้ชิพทรานซิสเตอร์ชิ้นเล็กๆ อยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอนจำนวนมากมาย และมีการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นบนแผ่นผลึกก่อนที่จะนำไปตัดแยก เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้ว แผ่นผลึกจะถูกนำไปตัดแยกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเรียกว่าชิพหรือตาย (chip or die) แล้วนำไปทำการเก็บบรรจุเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น

2.1 การออกแบบไดอะแฟรม

โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดันประกอบด้วยไดอะแฟรมบางรูปลี่เหลี่ยมจตุรัสเป็นส่วนสำคัญ ไดอะแฟรมเป็นส่วนของฐานรองซิลิกอนซึ่งเกิดจากการกัดฐานรองซิลิกอนระนาบ (100) ในสารละลายซึ่งมีคุณสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โดยมีผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ต้นแบบของไดอะแฟรมเป็นรูปลี่เหลี่ยมจตุรัสได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) หลุมที่เกิด

เอกรินทร์ อดิสรณ์กุล, วิศวกรอาวุโส, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการก๊อตจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยจะต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนานหรือตั้งฉากกับทิศทาง $[110]$ ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปก๊อตเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (1.36) จากภาพตัดขวางในรูปที่ 2.1 เมื่อกำหนดให้

W_0 คือขนาดของต้นแบบ

W_b คือขนาดของไดอะแฟรมยาวด้านละ 680 ไมครอน

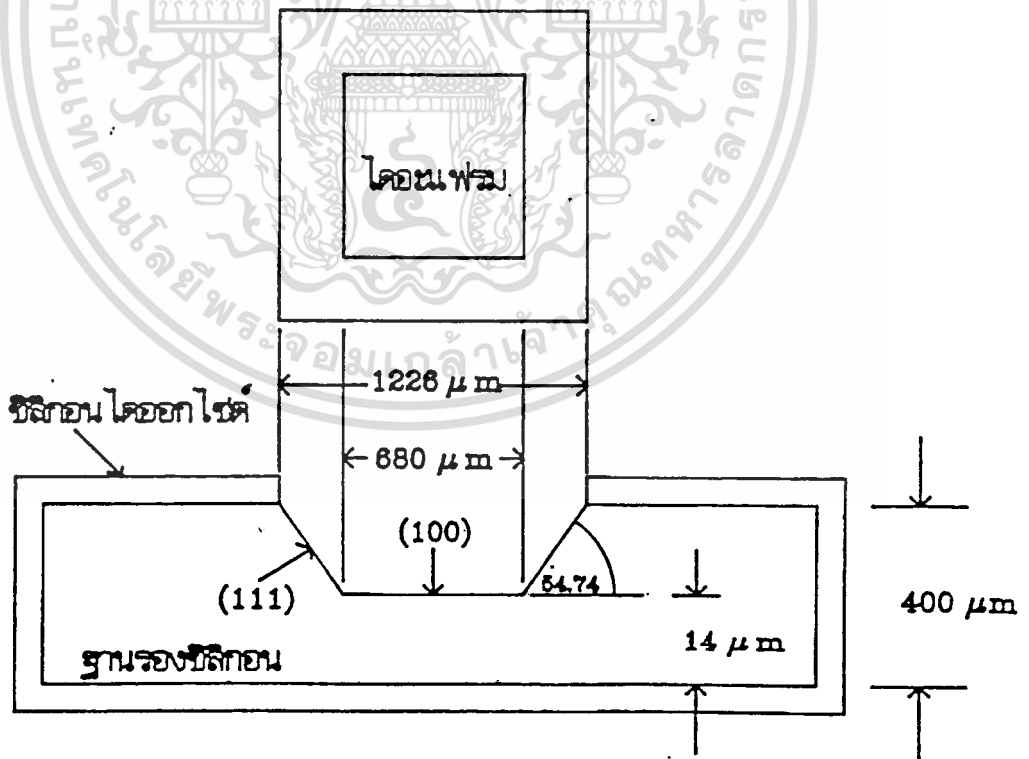
D คือความหนาของแผ่นฐานรอง = 400 ไมครอน

d คือความหนาของไดอะแฟรม = 14 ไมครอน

แทนค่า W_b D และ d ลงในสมการที่ (1.41) จะได้

$$\begin{aligned} W_0 &= 680 + 1.4(400 - 14) \\ &= 1226 \text{ ไมครอน} \end{aligned}$$

ดังนั้นขนาดต้นแบบของไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความยาวด้านละ 1226 ไมครอน



รูปที่ 2.1 แสดงภาพรายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ความลับและใช้ในราชการ (100) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

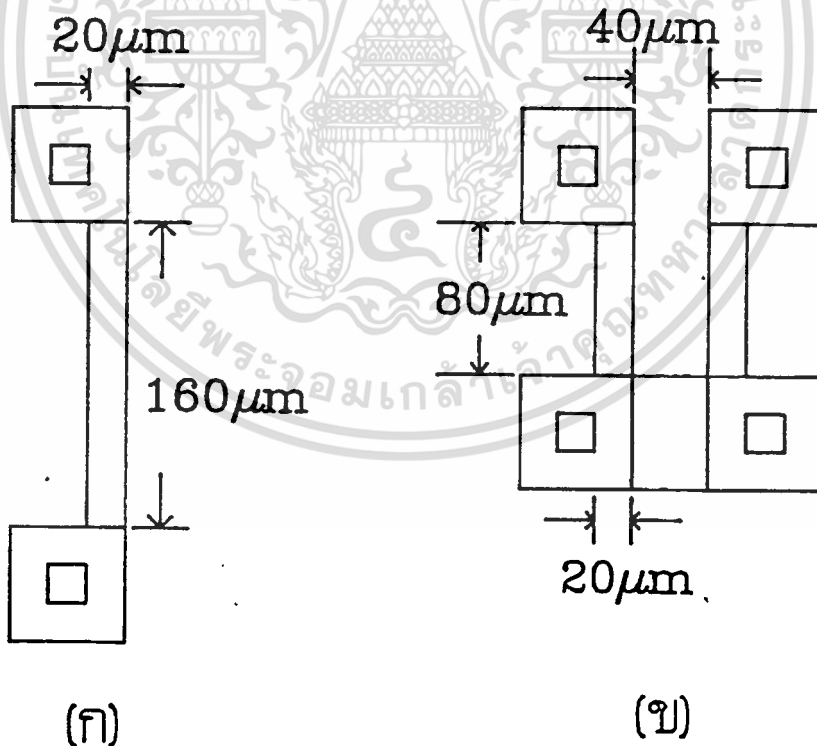
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การออกแบบตัวต้านทาน

ตัวต้านทานชนิดฟิล์มสวางซ์ขึ้นจากกระบวนการแพร่สารเจือโบรอน ค่าความต้านทานของตัวต้านทานจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการ

$$R = R_s l / w \quad \text{โอห์ม} \quad (2.1)$$

โดยที่ R คือค่าความต้านทาน R_s คือค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ซึ่งหาได้จากการวัด l เป็นความยาวและ w เป็นความกว้างของตัวต้านทานตามลำดับ ในการออกแบบได้กำหนดให้ $R_s = 100 \text{ ohm/square}$ $l = 160 \text{ ไมครอน}$ และ $w = 20 \text{ ไมครอน}$ เมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการที่ (2.1) จะได้ค่าความต้านทาน $R = 800 \text{ โอห์ม}$ รูปร่างของตัวต้านทานแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ตัวต้านทานในแนวสัมผัสและตัวต้านทานในแนวรัศมี ลักษณะรูปร่างของตัวต้านทานทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



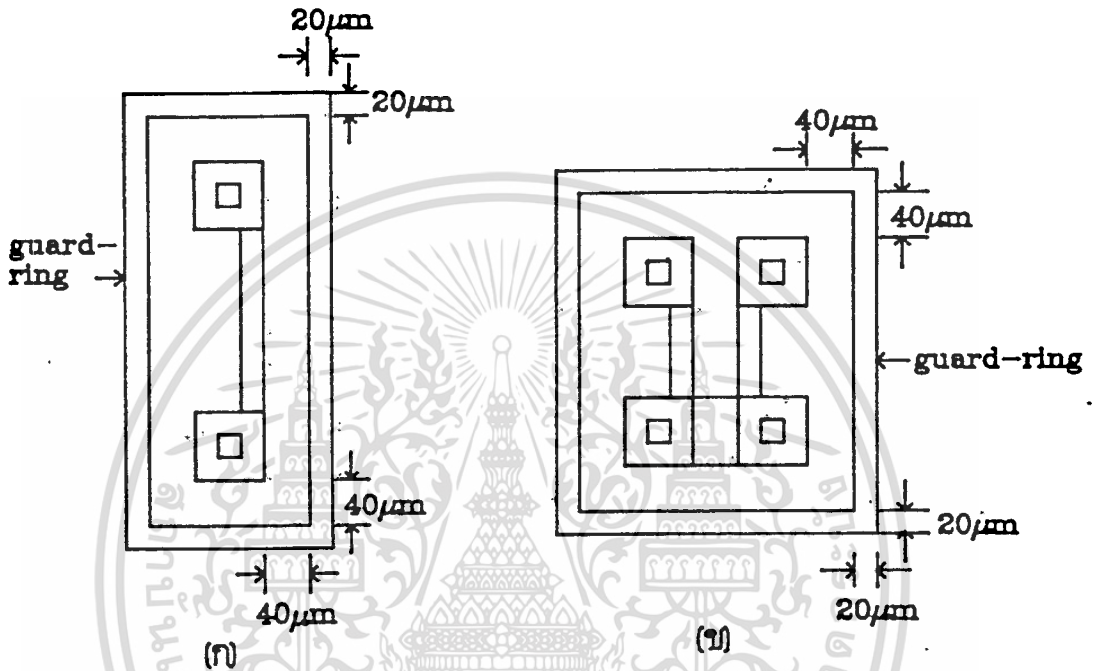
รูปที่ 2.2 แสดงรูปร่างของตัวต้านทานบนไดอะแฟรม

(ก) ตัวต้านทานในแนวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ข) ตัวต้านทานในแนวรัศมี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การออกแบบการวัด

ทรานสดิวเซอร์ความดันซึ่งใช้โครงสร้างการวัดเพื่อลดผลของอุณหภูมิจะมีส่วนของการวัดล้อมรอบตัวต้านทานแต่ละตัวไว้ ชั้นการวัดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับตัวต้านทาน การสร้างการวัดเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกับการแพร่สารเจือและชั้นลิกเพื่อสร้างตัวต้านทาน โครงสร้างของการวัดแสดงในรูปที่ 2.3

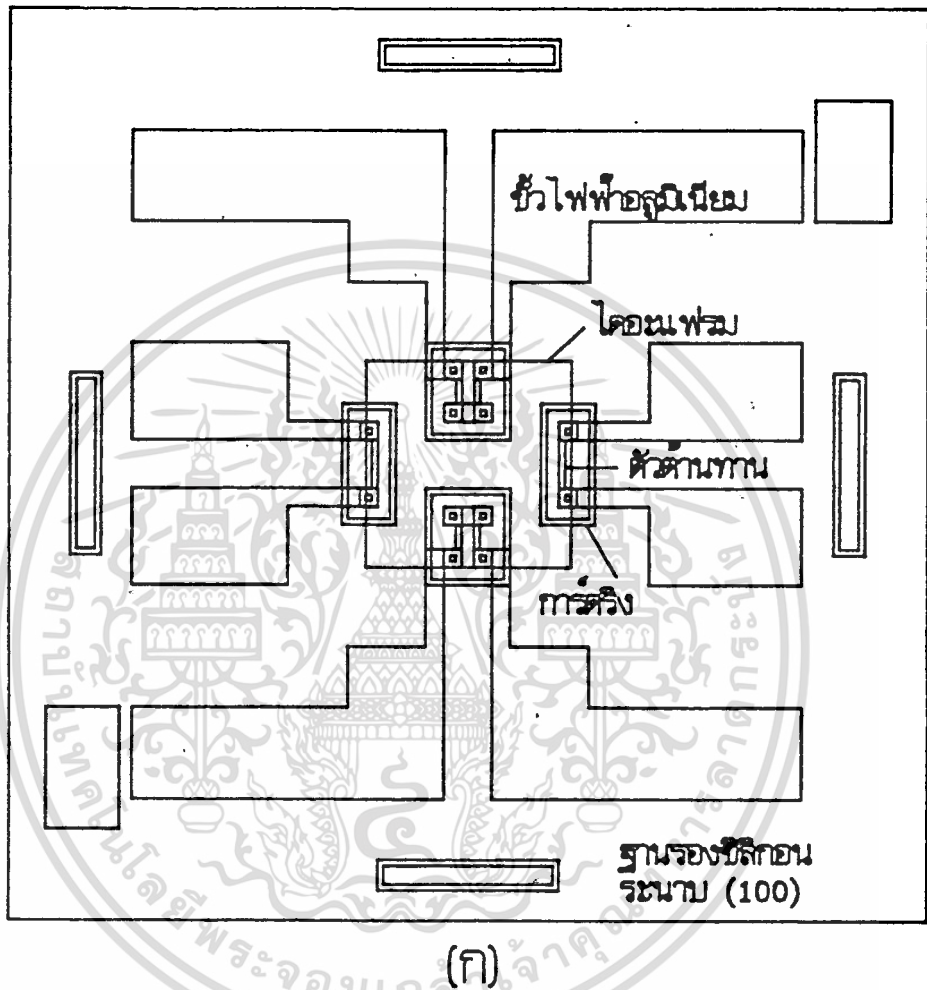


รูปที่ 2.3 แสดงรายละเอียดของการวัด

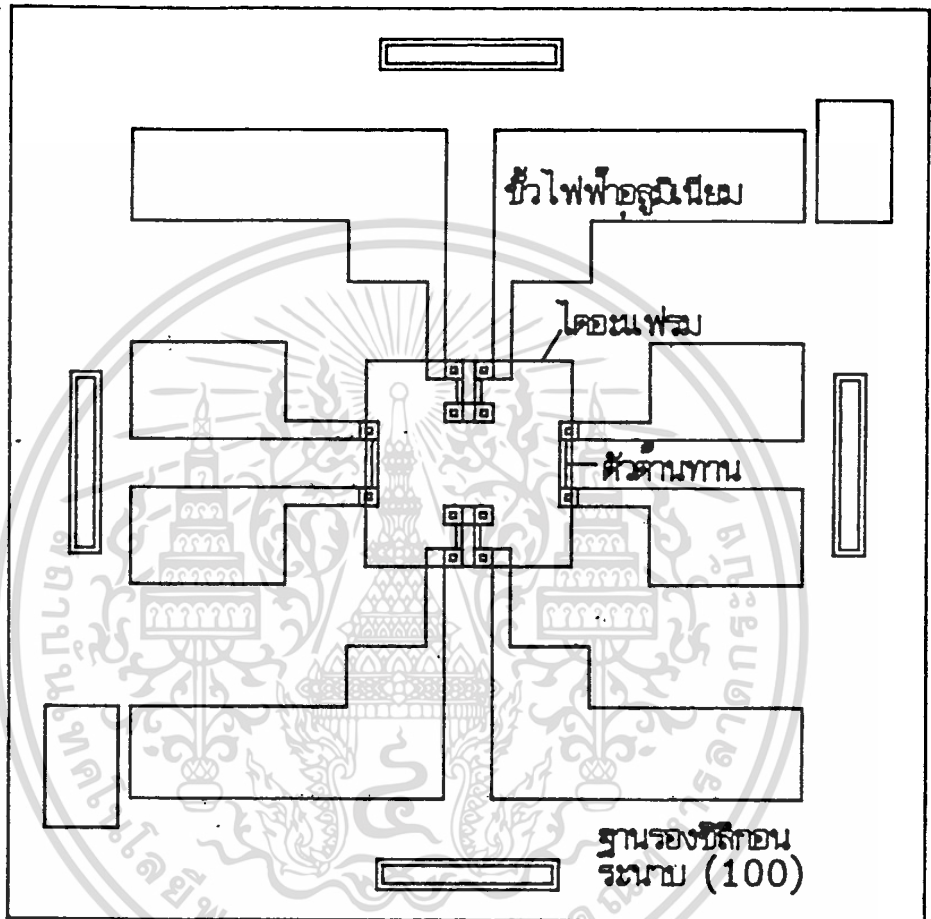
2.4 ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียกใช้วัสดุที่

ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียกใช้วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิคอนร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3*3 ตร.มม. หน้า 400 ไมครอน โดอะแพรมเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความยาวด้านละ 680 ไมครอน หน้า 14 ไมครอน ขอบโดอะแพรมวางตัวขนานกับทิศทาง [110] ตัวต้านทานมีจำนวน 4 ตัว วางตัวในทิศทาง [110] ทั้งหมด ประกอบด้วยตัวต้านทานในแนวสัมผัส 2 ตัวและตัวต้านทานในแนวรัศมี 2 ตัว ตัวต้านทานแต่ละตัวมีความกว้าง 20 ไมครอน ความยาว 160 ไมครอน วางห่างจากขอบโดอะแพรม 20 ไมครอน ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันที่ได้ออกแบบสร้างแบ่งเป็น 2 แบบคือ ต้นแบบที่ตัวต้านทานมีการวัดล้อมรอบโดยมีความกว้างของการวัดเท่ากับ 20 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) และต้นแบบที่ไม่มีมีการวัดล้อมรอบตัวต้านทานดัง

เอกแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) สำหรับการใช้นานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 (ก) แสดงต้นแบบที่สมบูรณ์ของทรานส์ดิวเซอร์ความดันแบบเปียก โซริซิสทีปแบบ มีการ์ดริง



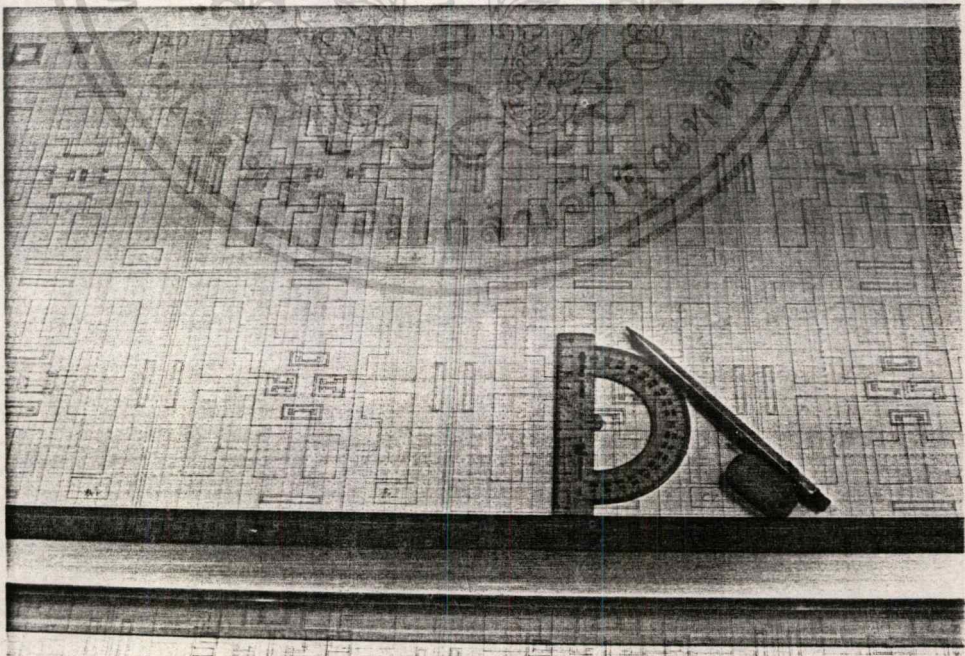
(๑)

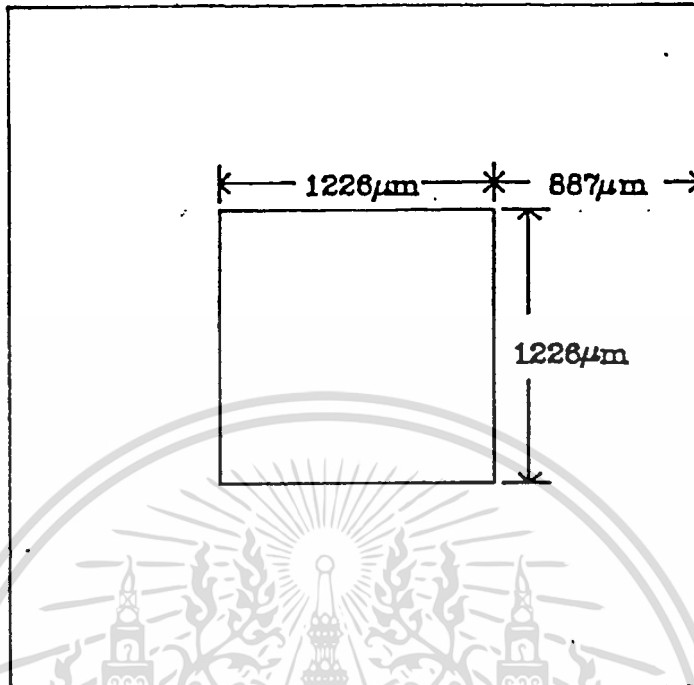
รูปที่ 2.4 (๑) แสดงต้นแบบที่สมบูรณ์ของทรานสลิเวออร์ความดันแบบเปียก โซลิดสเตทแบบ
ไม่มีการ์ดริง

2.5 การผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ

หลังจากที่ได้ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแล้ว ต้นแบบจะถูกนำมาวาดลงในกระดาษกราฟขนาด 1*1 ตร.มม. ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เพื่อใช้เป็นแบบในการตัดแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาร์ซีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดต้นแบบจะใช้เครื่องตัดเรียกว่า ไมโครพล๊อตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด ถึง 0.1 มม. ในกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันจะใช้กระจกต้นแบบทั้งหมด 5 แผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก-จ) สำหรับกระบวนการต่างๆ ดังนี้

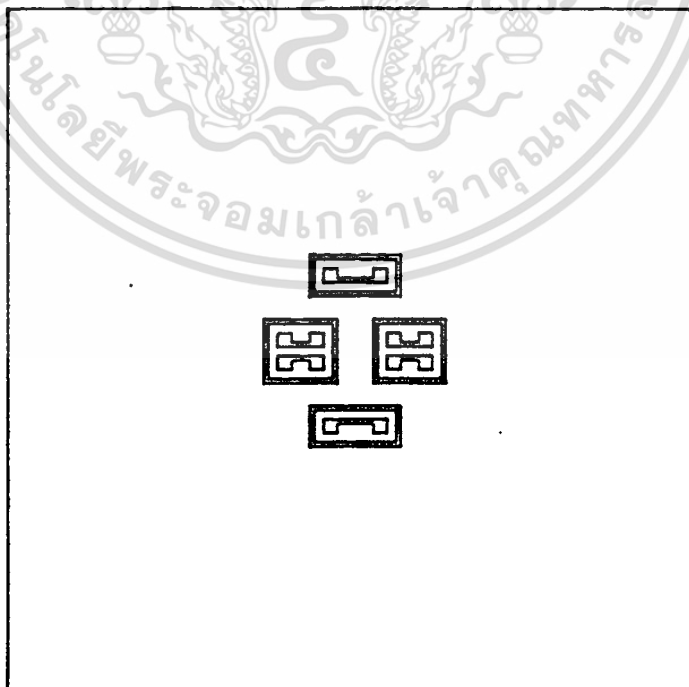
- กระจกต้นแบบมาส์กที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม
- กระจกต้นแบบมาส์กที่ 2 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างตัวความต้านทานชนิดพี
- กระจกต้นแบบมาส์กที่ 3 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างรอยลัมผัส p^+
- กระจกต้นแบบมาส์กที่ 4 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างรอยลัมผัสขั้วลุมิเนียม
- กระจกต้นแบบมาส์กที่ 5 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายลุมิเนียม

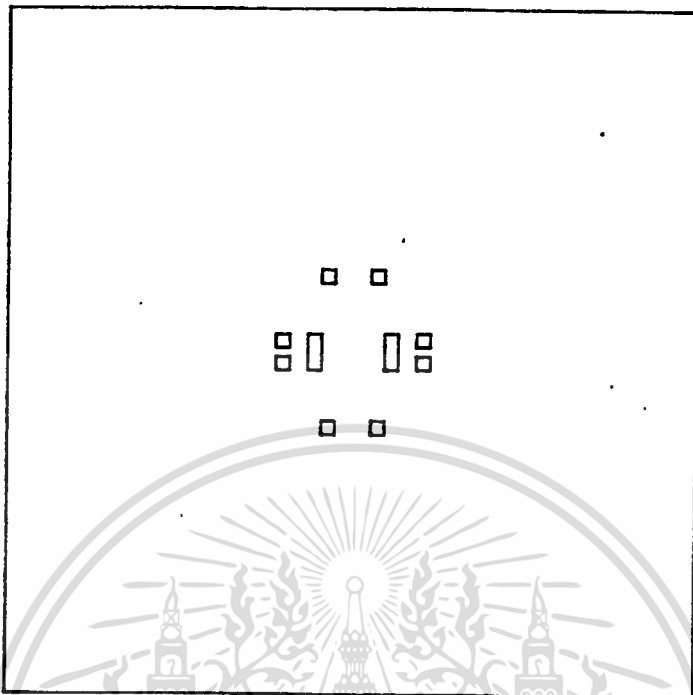




รูปที่ 2.6 (ก) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 1

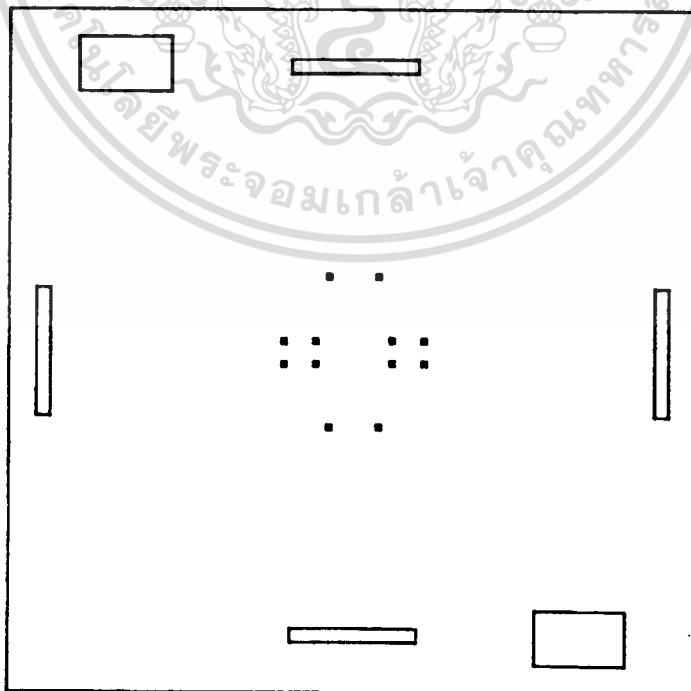
ใช้สำหรับกระบวนการสร้าง ไดอะแฟรม



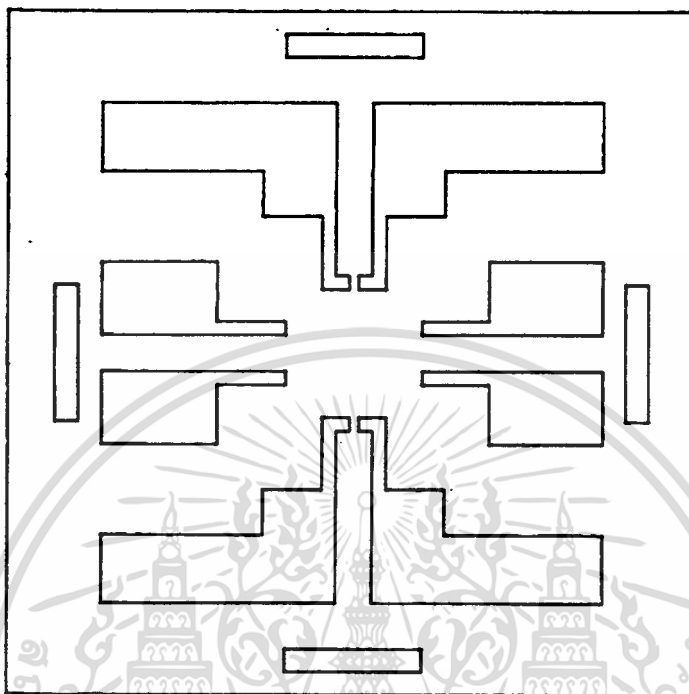


รูปที่ 2.6 (ค) แสดงต้นแบบมาลิกที่ 3

ใช้สำหรับกระบวนการสร้างรอยสัมผัส p⁺

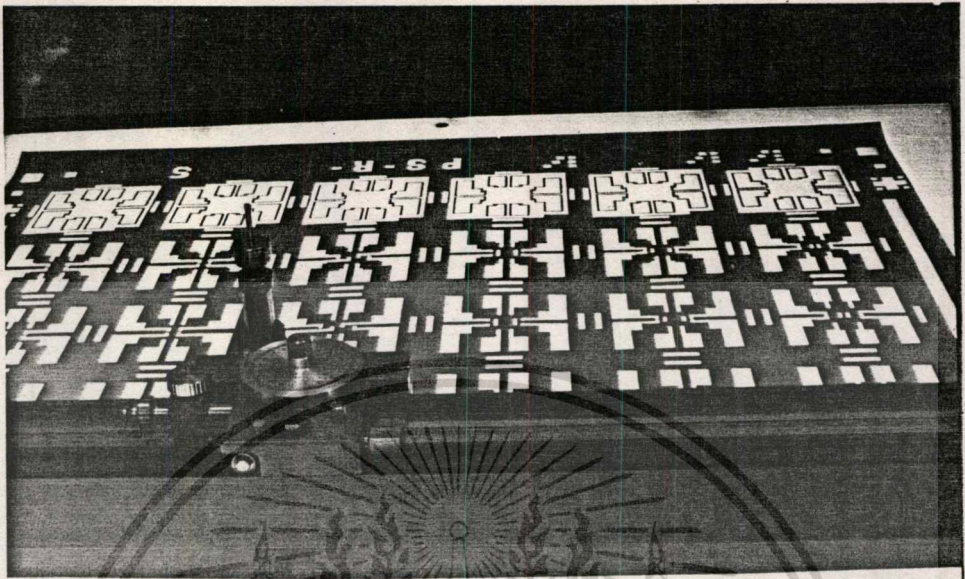


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.6 (ง) แสดงต้นแบบมาลิกที่ 4 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกใช้สำหรับกระบวนการสร้างรอยสัมผัสด้วยลูมิเนียเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

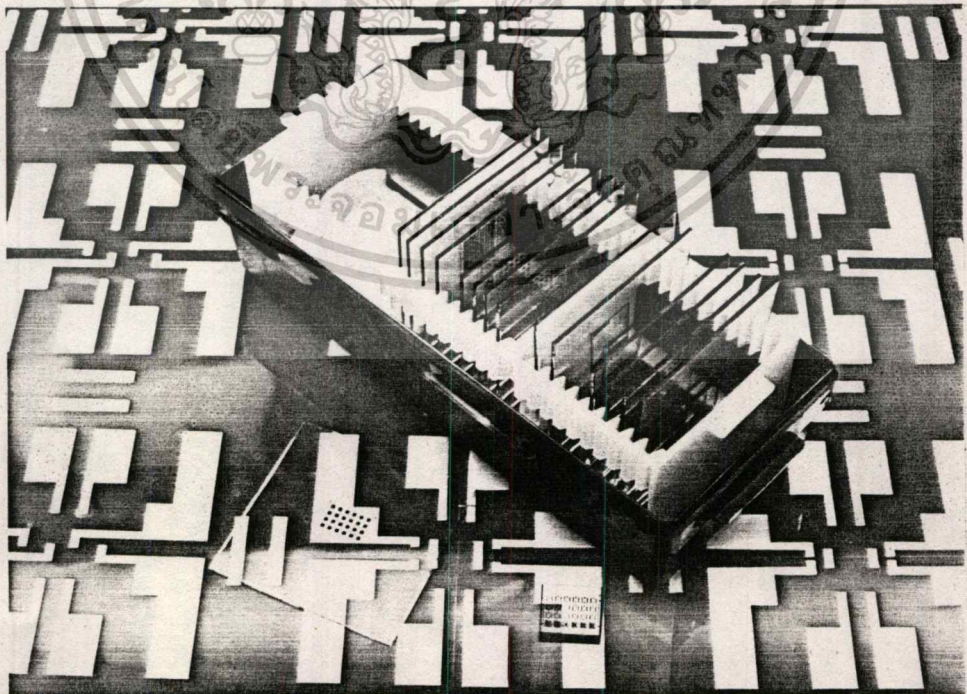


รูปที่ 2.6 (จ) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 5
ใช้สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายอลูมิเนียม

เมื่อตัดลวดลาย และทำการลอกลวดลาย จนกระทั่ง ได้ต้นแบบบนแผ่นไมลาร์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เรียบร้อยแล้ว ต้นแบบจะถูกนำมาย่อส่วนลง 50 เท่า ด้วยกล้องถ่ายย่อส่วนซึ่งเรียกว่า step-and-repeat camera ซึ่งจะได้ลวดลายบนแผ่นฟิล์มกระจกเรียบขนาด 3*3 ตารางนิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เพื่อใช้เป็นโฟโตมาสก์พร้อมที่จะนำไปใช้ในการถ่ายต้นแบบวงจรในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



รูปที่ 2.7 แสดงภาพถ่ายของต้นแบบที่ได้จากการตัดลวดลายบนแผ่นไมลามาร์ซีท์

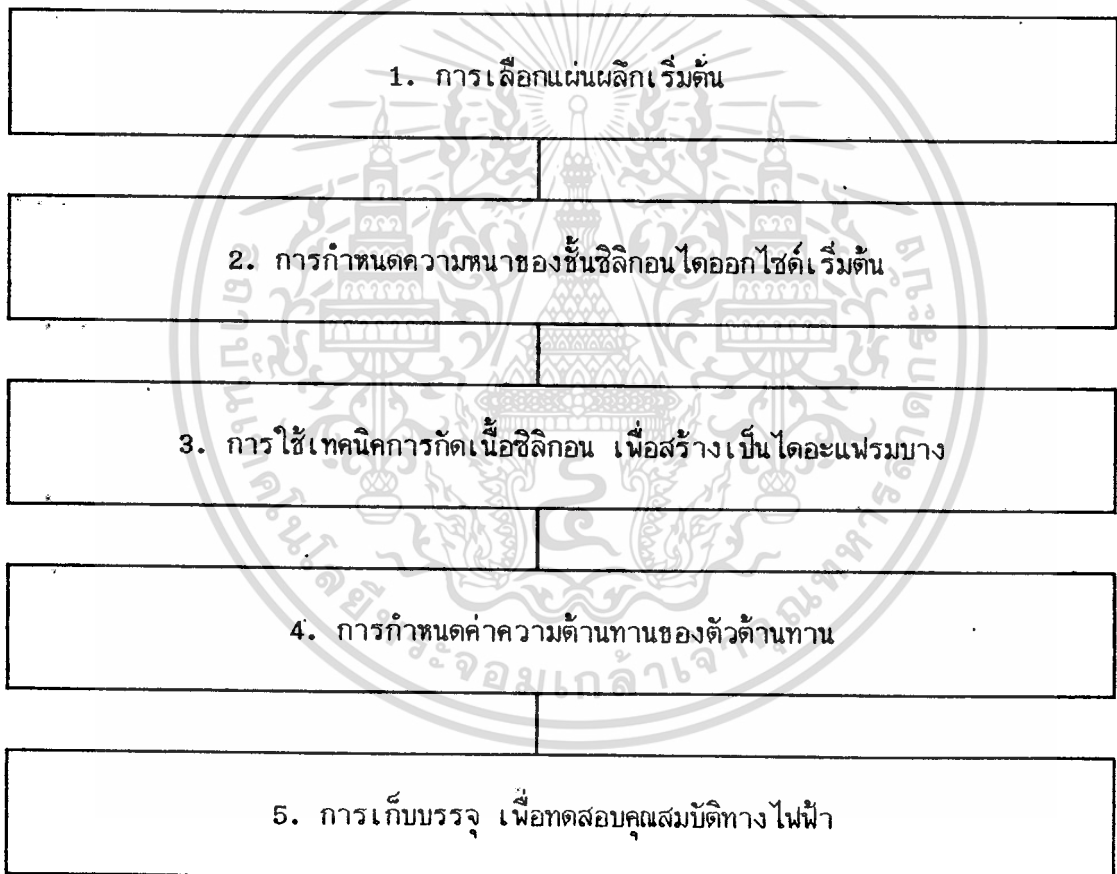


รูปที่ 2.8 แสดงภาพถ่ายของกระจกต้นแบบซึ่งใช้เป็นไฟโตมาส์คในกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรเชิงพาณิชย์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การสร้างแบบแผนผลึก

2.6.1 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง

การสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนตัวเดียว แต่เนื่องจากโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์มีไดอะแฟรมบางเป็นส่วนประกอบ จึงทำให้เกิดความยุ่งยากในการสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ ดังนั้นจะต้องกำหนดเทคนิคต่างๆ ให้เหมาะสมกับกระบวนการสร้างซึ่งสามารถกำหนดได้ดังนี้



จากข้อกำหนดเหล่านี้ ได้มีการศึกษาและเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อหากระบวนการสร้างในห้องปฏิบัติการที่เหมาะสม และสามารถสรุปเป็นขั้นตอนกระบวนการสร้างที่เป็นมาตรฐาน โดยมีลำดับขั้นตอนแบ่งเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น
2. กระบวนการทำความสะอาดผิวหน้าและการเตรียมผิวแผ่นผลึก
3. กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เริ่มต้น (First Oxidation)
4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี I
5. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็น I
6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II
7. กระบวนการทำขั้วไฟฟ้า
8. กระบวนการสร้าง ไดอะแฟรมบางด้วยเทคนิคการกัดด้วยไฟฟ้า
9. กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ II
10. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี III
11. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดพี I
12. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี IV
13. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดพี II
14. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี V
15. กระบวนการเคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียมด้วยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ
16. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี VI
17. กระบวนการซินเตอร์ริง (aluminum sintering)

2.6.2 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดัน

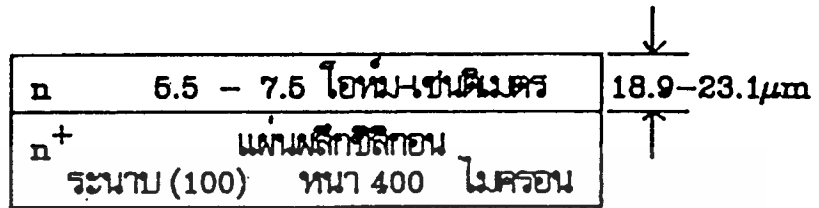
กระบวนการสร้างซึ่ง เริ่มต้นจากการกำหนดแผ่นผลึกซิลิกอน ไปจนกระทั่งสิ้นสุด เป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์ สามารถแสดงได้ด้วยภาพตัดขวางในรูปที่ 2.9 โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น

- ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดผลึกรูปเดี่ยวแบบอิมิทาเซียล (epitaxial) ที่มีผิวหน้าขัดมัน เป็นกระจกเงา
- ชนิด n/n^+ ระบาย (100) หน้า 400 ไมครอน
- สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิมิทาเซียล = 5.5 - 7.5 โอห์ม-เซนติเมตร
- สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นฐานรอง = 0.018 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นความลับของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

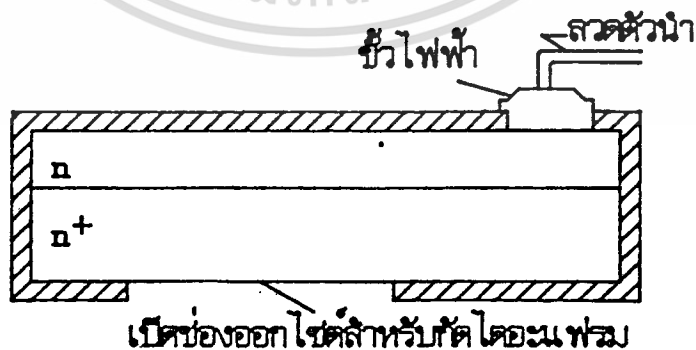
รูปที่ 2.9 ภาพตัดขวางแสดงขั้นตอนในการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบไดอะแฟรมบางด้วยเนื้อสารซิลิกอน



[1]. เตรียมแผ่นผลึกและทำความสะอาดผิวหน้า

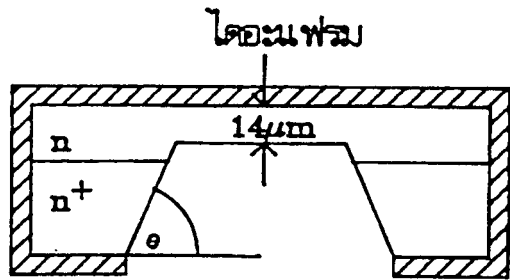


[2]. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นบนแผ่นซิลิกอนได้ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 7000 อังสตรอม ซึ่งออกไซด์ชั้นนี้จะทำหน้าที่เป็นหน้ากักป้องกันการกัดของสารละลายในกระบวนการกัดไดอะแฟรม



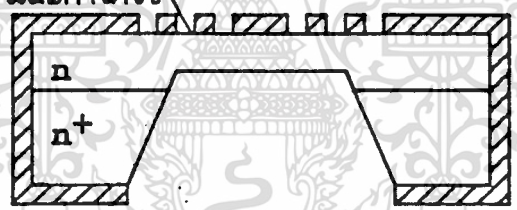
[3]. เปิดหน้ากักออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึกให้เป็นช่องสำหรับการกัดไดอะแฟรมและด้านหน้าสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้า โดยใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีและใช้น้ำยาบัฟเฟอร์

(buffer) กัดออกไซด์ในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



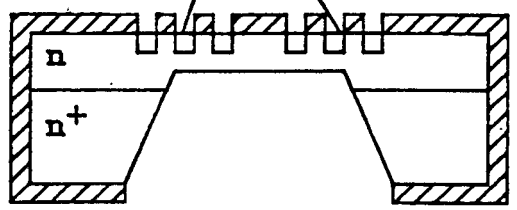
[4]. ทำการกัดซิลิกอนด้วยเทคนิคแอนไอโซทรอปิกในสารละลาย PED ได้มุม $\theta = 54.74$ องศา สารละลายจะกัดเนื้อซิลิกอนด้วยอัตรา 1.43 ไมครอนต่อนาทีที่อุณหภูมิ 100 เซลเซียส โดยใช้เวลาในการกัดทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง 30 นาที ได้ความหนาของ ไดอะแพรมประมาณ 14 ไมครอน

เปิดช่องออกไซด์สำหรับสร้างตัวต้านทาน และการรีดิง



[5]. เปิดหน้ากากออกไซด์ด้านหน้าด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับการแพร่สาร เจือชนิดพี

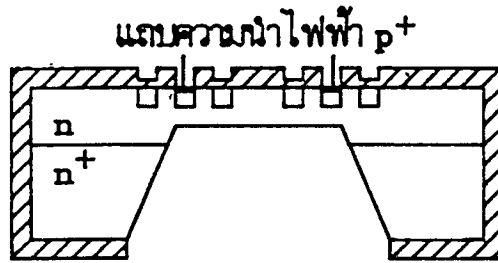
แพร่สารเจือชนิดพี



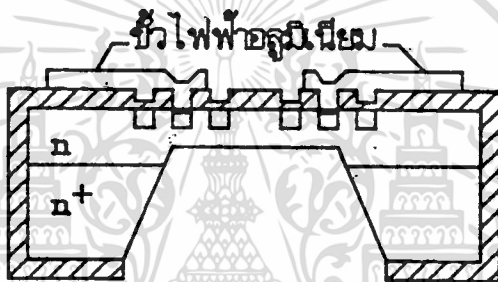
[6]. ทำการแพร่สารเจือด้วยแหล่งจ่ายสารเจือชนิดของแข็ง โบรอนไนไตรด์ (BN) ที่อุณหภูมิ 970 เซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำการขับสารเจือให้เข้าไปลึก 1 ไมครอนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 1100 วัตต์ เซลเซียส ได้ค่าความต้านทานแผ่นประมาณ 100 ohm/square

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[7]. เปิดช่องออกไซด์แล้วแพร่สารเจือโบรอนจำนวนมากเข้าที่ส่วนนี้ให้ได้ p^+ เพื่อให้เป็นแถบตัวนำไฟฟ้าที่ดีและใช้เป็นจุดที่จะต่อขั้วไฟฟ้าออกภายนอก



[8]. เคลือบโลหะอลูมิเนียมที่จุดต่อขั้วไฟฟ้าบริเวณ p^+ และจากนั้นตัดแยกชิปได้ขนาด 3*3 ตร.มม. นำมาติดบนกระป๋องโลหะแบบ TO-5 ที่มีท่อสำหรับให้ความดันเพื่อใช้ในการทดสอบ

2. กระบวนการทำความสะอาดผิวหน้าและการเตรียมผิวแผ่นผลึก

เป็นการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอนเพื่อชำระล้าง ไขมันและสิ่งแปลกปลอมที่ติดค้างอยู่บนผิวผลึก ซึ่งมีวิธีการดังนี้คือ

- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI water)
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) 5 นาที 2 ครั้ง แล้วเป่าแห้ง
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ส่วนหนึ่งการใช้เอกสารนี้โดยไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชำระล้างไตรคัลอโรเอททีลีน ซึ่งอาจหลงเหลือที่ผิวแผ่นผลึกออก ประมาณ 3 นาที 2 ครั้ง
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้ง

3. กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เริ่มต้น (First Oxidation)

ในกระบวนการนี้ต้องการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ให้ได้ความหนา 7000 อังสตรอม เพื่อใช้เป็นหน้าากปกป้องกันการกัดของสารละลายในกระบวนการกัดไดอะแฟรม โดยมีขั้นตอนดังนี้

การทำความสะดวกแก่แผ่นผลึกก่อนกระบวนการออกซิเดชัน

- กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่มีความเข้มข้น 5% นาน 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้ง

กระบวนการออกซิเดชัน

- ปรับอุณหภูมิในเตาแพร่ให้คงที่ที่ 1125 เซลเซียส
- ทำออกซิเดชันแบบแห้ง 1 ชั่วโมง ปล่องก๊าซออกซิเจนแห้งในอัตรา 1200 ซีซี/นาที
- ทำออกซิเดชันแบบชื้น 2 ชั่วโมง ปล่องก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ 900 ซีซี/นาที
- ทำออกซิเดชันแบบแห้ง 1 ชั่วโมง ปล่องก๊าซออกซิเจนแห้งในอัตรา 1200 ซีซี/นาที

4. กระบวนการไฟโตลิโทกราฟี I

เป็นกระบวนการเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหน้าเพื่อแพร่สารเจือชนิดเอ็นสร้างเป็นแถบความนำไฟฟ้า n^+ สำหรับใช้ในกระบวนการกัดซิลิกอน มีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นผลึกในเตาอบความร้อนอุณหภูมิ 100 เซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ-1350J ลงบนแผ่นผลึกด้านหน้ายกเว้นบริเวณที่ขอบด้านบน โดยให้เหลือพื้นที่ประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร
- อบแห้งในเตาอบอุณหภูมิ 100 เซลเซียส 20 นาที เอาออกมาเคลือบน้ำยาไวแสงด้านหลังเพื่อป้องกันการกัดออกไซด์ด้วย AZ-1350J จากนั้นอบต่ออีก 10 นาที
- จุ่มแผ่นผลึกลงในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer) ซึ่งเป็นส่วนผสมของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) 6 ส่วนกับกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 1 ส่วน มีอัตราการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ 1000 อังสตรอมต่อนาที จนกระทั่งชั้นออกไซด์ถูกกัดออกจนหมด

เอกสารนี้ปลี่ยนน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้าง AZ-1350J โดยจุ่มลงในอะซิโตนแล้วเขย่าด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้ง

5. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็น I

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็นด้วยแหล่งจ่ายสารเจือฟอสฟอรัสของแข็ง PH-1000 เพื่อสร้างเป็นแถบความนำไฟฟ้า n^+ ซึ่งในกระบวนการแพร่สารจะประกอบด้วยขั้นตอนการแพร่สารเจือลงบนผิวหน้า (pre-deposition) และขั้นตอนการขับลึกสารเจือ (drive-in) ดังมีลำดับขั้นตอนดังนี้

กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (phosphorus pre-deposition)

- ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยการจุ่มลงในกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 5 % นาน 10 วินาที
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง
- ปรับอุณหภูมิของเตาแพร่ให้คงที่ที่ 970 เซลเซียส
- ทำการแพร่สารเจือด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ PH-1000 (SiP_2O_7) เป็นเวลา 30 นาที โดยปล่อยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 600 ซีซี/นาที
- นำแผ่นผลึกออกจากเตาแพร่สาร จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 5 % นาน 10 วินาที เพื่อลอกชั้นบางๆของฟอสโฟซิลิเกต (phosphosilicate) ออก
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง

กระบวนการขับลึกฟอสฟอรัส (phosphorus drive-in)

เป็นกระบวนการขับอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสให้แพร่ซึมลึกลงไป ตามขั้นตอนดังนี้

- ปรับอุณหภูมิของเตาแพร่ให้คงที่ที่ 1100 เซลเซียส
- ทำออกซิเดชันแบบชั้น 15 นาที ปล่อยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 900 ซีซี/นาที

6. กระบวนการไฟโตลิโทกราฟี II

เป็นกระบวนการเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออก สำหรับกัดเนื้อซิลิกอนให้เป็นไดอะแพรมบาง โดยใช้ยาไวแสงชนิดลบ ในขั้นตอนนี้ใช้กระจกต้นแบบที่ I และ II ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นผลึกในเตาอบความร้อน อุณหภูมิ 100 เซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เนอร์ (Spinner) ที่ 5000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นผลึกในเตาอบ อุณหภูมิ 100 เซลเซียส ประมาณ 30 นาที
 - นำแผ่นผลึกไปทำการปรับแนว (mask alignment) โดยปรับตำแหน่งกระจกต้นแบบ I และ II ให้ตรงกันด้วยอุปกรณ์ถ่ายซ้อนแบบ (mask aligner) และฉายแสงประมาณ 10 วินาที
 - ทำการล้าง (Development) Waycoat โดยจุ่มลงในไซลีน (Xylene) I,II อย่างละ 1 นาที และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isoprophyl Alcohol) I,II,III อย่างละ 1/2 นาที
 - ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้ง
 - อบแผ่นผลึกในเตาอบ อุณหภูมิ 100 เซลเซียส นานประมาณ 30 นาที
 - จุ่มลงในบัฟเฟอร์จนกระทั่งชั้นออกไซด์ถูกกัดจนหมด
 - ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้ง
 - นำแผ่นผลึกไปต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) I,II อย่างละ 5 นาที เพื่อลอก Waycoat
 - ล้างน้ำบริสุทธิ์ 10 นาที 2-3 ครั้ง
 - ต้มในน้ำ น้ำบริสุทธิ์ 10 นาที 1-2 ครั้ง
 - ล้างน้ำบริสุทธิ์ 10 นาที 2-3 ครั้งแล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. กระบวนการทำขั้วไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับใช้ในกระบวนการกัดเนื้อซิลิกอนด้วยเทคนิคการกัดด้วยไฟฟ้า ชั้นออกไซด์ด้านหน้าซึ่งเป็นแถบความนำไฟฟ้าจะถูกเปิดออกเพื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสกับขั้วไฟฟ้า จากนั้นทำการเคลือบอลูมิเนียมทับรอยสัมผัสด้วยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ แล้วนำไปชุบด้วยนิเกิลและบัดกรีลวดตัวนำติดกับแผ่นผลึกตรงรอยสัมผัส สุดท้ายนำไปชุบทองเพื่อป้องกันการกัดของน้ำยาที่บริเวณขั้วไฟฟ้า รายละเอียดขั้นตอนการสร้างมีดังต่อไปนี้

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า

เป็นกระบวนการเปิดช่องของออกไซด์บริเวณแถบความนำไฟฟ้าเพื่อสร้างรอยสัมผัสกับขั้วไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4

กระบวนการเคลือบอลูมิเนียมด้วยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation)

- ทำความสะอาดผิวของแผ่นผลึกด้วยการจุ่มแผ่นผลึกลงในกรดไฮโดรฟลูออริก 5% 10 วินาที
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง
- วางแผ่นผลึกลงในครอบแก้ว (chamber) ของเครื่องเคลือบโลหะแบบสุญญากาศ ที่ตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ชั้นอลูมิเนียมที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ
- ปิดวาล์วของครอบแก้ว ทำการดูดอากาศออกให้ความดันภายในลดต่ำลงมาเหลือประมาณ 10^{-3} Torr โดยใช้ปั๊มโรตารี (Rotary Pump)
- เปิดวาล์วของปั๊มดีฟิวชัน (Diffusion Pump) เพื่อทำให้ความดันภายในครอบแก้วลดลงเหลือราว $1-2 \times 10^{-6}$ Torr
- เริ่มทำสารที่จะเคลือบให้เป็นไอ โดยมีกำลัง เพื่อมิให้สารที่เจือปนอยู่ไปเคลือบแผ่นผลึก
- ทำการเคลือบอลูมิเนียมลงบนแผ่นผลึกให้หนาตามต้องการ

กระบวนการขึ้นเตอรัง

เป็นกระบวนการที่จะช่วยให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสไอโซมิกที่สมบูรณ์และมีความต้านทานต่ำที่สุด

- ปรับอุณหภูมิภายในเตาแพร่สารให้คงที่ที่ 500 เซลเซียส
- ปลดปล่อยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 2000 ซีซี/นาที เป็นเวลานาน 15 นาที

กระบวนการชุบด้วยนิกเกิล (Nickel Plating)

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการชุบอลูมิเนียมด้วยนิกเกิลแบบไร้ไฟฟ้าซึ่งมีส่วนผสมของน้ำยาชุบดังนี้ คือ

nickel sulfate	4	กรัม
sodium acetate	1.4	กรัม
sodium citrate	2.4	กรัม
sodium hypophosphite	1.5	กรัม
ammonium chloride	0.5	กรัม
น้ำบริสุทธิ์	100	ซีซี

- ต้มส่วนผสมของน้ำยาชุบที่อุณหภูมิ 80 เซลเซียส
- ทำการชุบโดยจุ่มแผ่นผลึกลงในน้ำยาชุบนาน 4 นาที
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง

กระบวนการชุบด้วยทอง (Au Plating)

ส่วนผสมของน้ำยาชุบทอง

potassium gold cyanide	0.5	กรัม
ammonium chloride	1.5	กรัม
sodium citrate	5.0	กรัม
sodium hypophosphite	1.0	กรัม
น้ำบริสุทธิ์	100	ซีซี

- ต้มส่วนผสมของน้ำยาชุบที่อุณหภูมิ 90 เซลเซียส
- ทำการชุบโดยจุ่มแผ่นผลึกลงในน้ำยาชุบนาน 6 นาที
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้ง

8. กระบวนการสร้างไดอะแฟรมด้วยเทคนิคการกัดเนื้อซิลิกอนด้วยไฟฟ้า

ขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างไดอะแฟรมด้วยเทคนิคการกัดด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ได้ไดอะแฟรมที่มีความหนาและความราบเรียบสม่ำเสมอ

ขั้นตอนกระบวนการกัดมีดังต่อไปนี้

- เตรียมน้ำยากัดซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ

ethylenediamine	75	มิลลิลิตร
pyrocatechol	12	กรัม
น้ำบริสุทธิ์	24	มิลลิลิตร

- ต้มส่วนผสมของน้ำยากัดที่อุณหภูมิ 100 เซลเซียส ด้วยแผ่นร้อน (hot plate) ซึ่งมีแท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) หมกกวนน้ำยาด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที
- ป้อนศักดาตกคร่อมอาโนดและคาโทด 0.6 โวลต์ น้ำยากัดจะกัดเนื้อซิลิกอนด้วยอัตราการกัดประมาณ 1.43 ไมครอนต่อนาที
- เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการกัดแล้ว ล้างในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 10 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ตัดขั้วไฟฟ้าออกจากแผ่นผลึกด้วยเข็มเพชร
- ทำความสะอาดแผ่นผลึกอีกครั้งด้วยขบวนการตามหัวข้อที่ 2
- กัดชั้นออกไซด์โดยจุ่มลงในบัฟเฟอร์ นาน 2 นาที
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง

9. กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ II

เป็นกระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกอีกครั้งหนึ่ง โดยกำหนดให้มีความหนาชั้นออกไซด์ประมาณ 5000 อังสตรอม เพื่อใช้เป็นฉนวนป้องกันการแพร่ของสารเจือ ซึ่งมีกระบวนการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3

- ทำกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ทำกระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ทำกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

10. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี III

เป็นกระบวนการเปิดช่องออกไซด์เพื่อนำสารเจือชนิดที่สร้างเป็นตัวต้านทาน ขึ้นตอนนี้ใช้กระจกต้นแบบที่ II โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 6

11. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดที่ I

เป็นกระบวนการสร้างตัวต้านทานชนิดที่ ด้วยเทคนิคการแพร่สารเจือด้วยแหล่งจ่ายสารเจือโบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็ง BN (M26) ลำดับขั้นตอนมีดังนี้

กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน (boron-deposition)

- กัดแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง
- ปรับอุณหภูมิเตาแพร่ให้คงที่ที่ 970 เซลเซียส
- ทำ Activate 30 นาที ปลดปล่อยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 600 ซีซี/นาที
- ทำ Stabilized 20 นาที ปลดปล่อยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 600 ซีซี/นาที
- ทำการแพร่สารเจือโบรอนนาน 30 นาที โดยปลดปล่อยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 600 ซีซี/นาที
- นำแผ่นออกจากเตาแพร่สาร จุ่มแผ่นผลึกใน กรดไฮโดรฟลูออริก 5% 10 วินาที เพื่อลอกชั้นของโบโรซิลิเกต (borosilicate) ออก
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้ง

กระบวนการขับเคลื่อนสารเจือโบรอน (boron drive-in)

เอกสารนี้เป็นเอกสารขั้วอะตอมสารเจือ โบรอน ให้แพร่ซึมลึกลง ไปประมาณ 1 ไมครอน ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปรับอุณหภูมิของเตาแพร่ให้คงที่ที่ 1100 เซลเซียส
- ทำออกซิเดชันแบบแห้ง 30 นาที ปล่องอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 ซีซี/นาที
- ทำออกซิเดชันแบบชื้น 20 นาที ปล่องอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 900 ซีซี/นาที
- ทำออกซิเดชันแบบแห้ง 10 นาที ปล่องอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 ซีซี/นาที

12. กระบวนการไฟโตไลโทกราฟี IV

เป็นการเปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือชนิดนี้ เพื่อสร้างเป็นแถบความนำไฟฟ้า โดยใช้กระจกต้นแบบที่ III ลำดับขั้นตอนเป็นเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 6

13. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดที่ II

เป็นกระบวนการแพร่อะตอมสารเจือชนิดนี้ด้วยแหล่งจ่ายสารเจือโบรอนแบบแข็ง BN(M26) โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 11 ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิ 1030 เซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที และกระบวนการขับลึกเป็นเวลา 20 นาที

14. กระบวนการไฟโตไลโทกราฟี V

เป็นกระบวนการเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างเป็นรอยลัมผัสไอทึมระหว่างตัวต้านทานกับอลูมิเนียม ขั้นตอนนี้ใช้กระจกต้นแบบที่ IV โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 6

15. กระบวนการเคลื่อนชั้น โลหะอลูมิเนียมด้วยเทคนิคการเคลื่อน โลหะในสูญญากาศ

เป็นการเคลื่อนโลหะอลูมิเนียมบนแผ่นผลึกบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์ ด้วยเครื่องเคลื่อนโลหะในสูญญากาศ ทน 1 ไมครอน โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 7

16. กระบวนการไฟโตไลโทกราฟี VI

เป็นกระบวนการสร้างลวดลายอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าและเชื่อมต่อระหว่างตัวต้านทาน โดยใช้ยาไวแสงชนิดบวก AZ-1350J ขั้นตอนนี้ใช้กระจกต้นแบบที่ V โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

กระบวนการไฟโตไลโทกราฟี

- อบแผ่นผลึกในเตาอบความร้อนอุณหภูมิ 100 เซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง
- ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ-1350J ลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่องสปินเนอร์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ในโครงการวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบแผ่นผลึกในเตาอบ อุณหภูมิ 100 เซลเซียส ประมาณ 30 นาที
- นำแผ่นผลึกไปทำการปรับแนว และฉายแสง(expose) ประมาณ 10 วินาที
- ล้าง AZ-1350J โดยจุ่มลงในน้ำยาล้าง AZ (AZ Developer) I,II อย่างละ 1 นาที
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง
- อบแห้งแผ่นผลึกในเตาอบอุณหภูมิ 100 เซลเซียส นาน 30 นาที

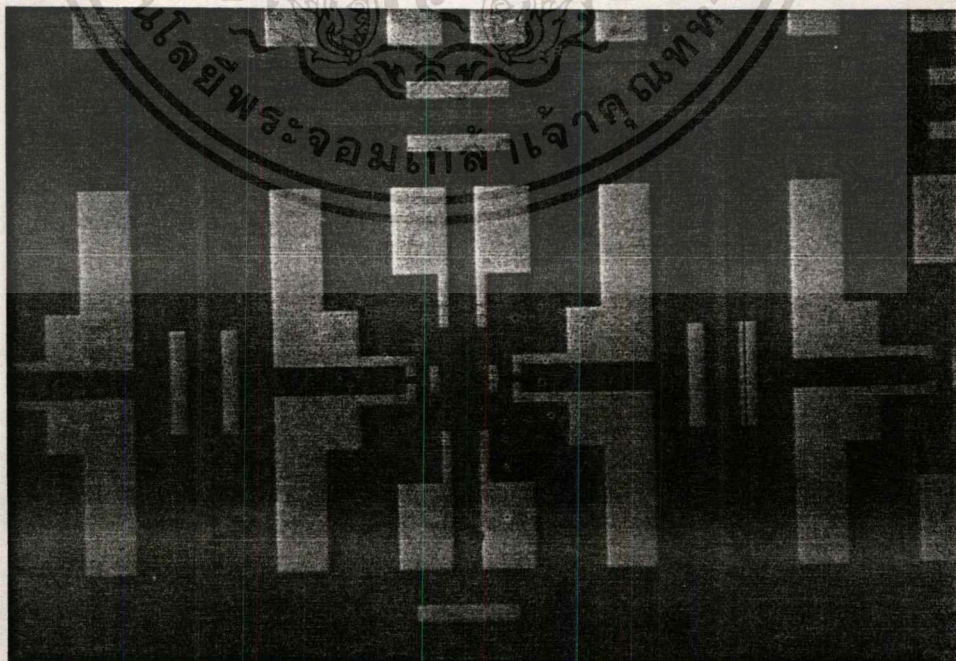
การกัดละลายโลหะอลูมิเนียม

สารละลายเคมีที่ใช้กัดโลหะอลูมิเนียมเป็นส่วนผสมของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นส่วนประกอบหลัก มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- จุ่มแผ่นผลึกลงในสารละลายที่มีอุณหภูมิประมาณ 50 เซลเซียส
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง
- ล้าง AZ-1350J โดยจุ่มลงในอะซิโตนแล้วเช็ดด้วยเครื่องสันความถี่สูง
- ล้างน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง

17. กระบวนการขึ้นเตอร้ง

เป็นการสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกระหว่างตัวต้านทานกับลายอลูมิเนียมซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 7



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความต้านเรียบร้อยแล้ว

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 กระบวนการแอสเซมบลีและเก็บบรรจุ

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึกแล้ว ก่อนที่จะนำแผ่นผลึกไปเข้ากระบวนการแอสเซมบลี (Assembly Processing) และการเก็บบรรจุ (Packaging) จะมีการตรวจสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ความดันในเบื้องต้น ด้วยการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานซึ่งประกอบเป็นทรานซิสเตอร์ความดันหนึ่งตัวบนแผ่นผลึกทั้งหมด ด้วยเครื่องมือซึ่งประกอบด้วยส่วนของ เซ็ม โพรบสำหรับแตะที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างของตัวต้านทาน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับดิจิตอลมัลติมิเตอร์ เพื่อวัดตรวจสอบดูว่าค่าความต้านทานของตัวต้านทานมีค่าใกล้เคียงตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ ชิปหรือตายส่วนที่เสีย [หมายถึงตายที่มีค่าความต้านทานของตัวต้านทานผิดไปจากที่ออกแบบไว้มาก หรือตัวต้านทานเปิดวงจร (open circuit)] จะถูกทำเครื่องหมายไว้ หลังจากนั้นแผ่นผลึกจะถูกนำมาเข้ากระบวนการต่างๆ ตามลำดับดังนี้

- การตัดแยกตาย (die separation)

เป็นขั้นตอนการนำแผ่นผลึกผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติแล้ว มาตัดแยกเป็นชิ้นเล็กๆ เรียกว่าชิปหรือตาย (chip or die) เพื่อทำการเก็บบรรจุในขั้นสุดท้าย วิธีการตัดแยกตายจะใช้เครื่องตัด (sawing machine) ซึ่งใช้ใบเลื่อยเพชรที่มีลักษณะกลมกลมหมุนด้วยความเร็วสูงตัดแผ่นผลึกออกเป็นร่องก่อน แล้วจึงนำไปหักแบ่งออกเป็นชิ้น

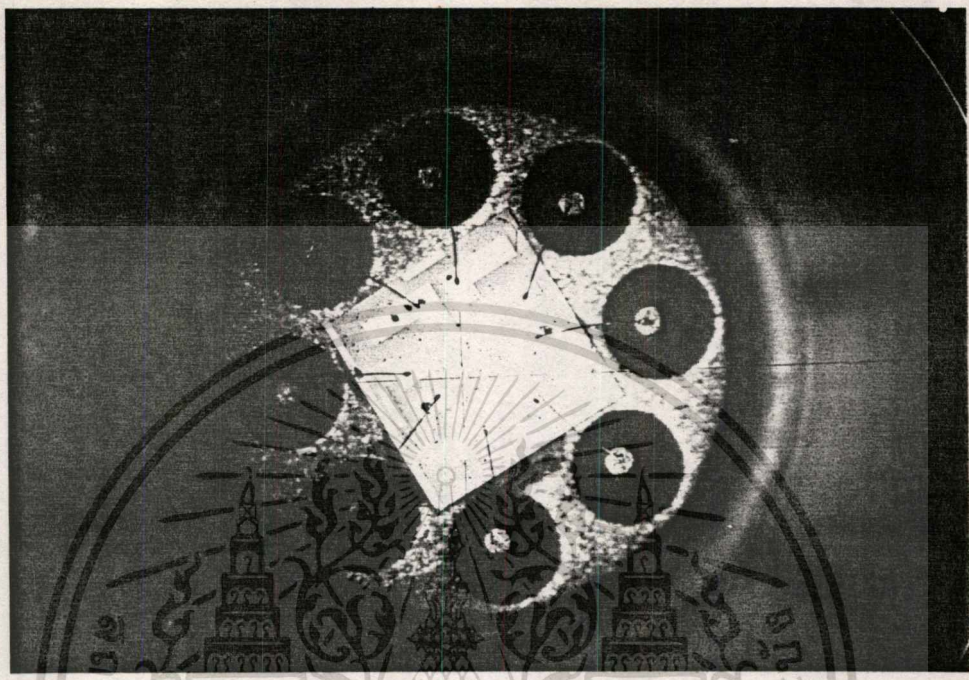
- การติดตายบนฐานรอง (die-attach or die bonding)

เป็นขั้นตอนการนำตายที่ผ่านการคัดเลือกมาติดบนฐานรองกระป๋อง TO-5 ด้วยตัวเชื่อมซึ่งเป็นโลหะผสมอินเดียม มีจุดหลอมเหลวประมาณ 150 เซลเซียส หลังจากนั้นทำการหยอดด้วยอิพอกซีเชื่อมระหว่างตายกับฐานรองทับลงไปอีกชั้นหนึ่ง

- การต่อสายลวดความนำ (wire bonding)

เป็นขั้นตอนการต่อสายเส้นลวดอลูมิเนียมจากขั้วไฟฟ้าบนตายไปยังขาโลหะของฐานรอง ด้วยวิธีการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic bonding)

ผ่านจากกระบวนการแอสเซมบลีแล้ว ชิปซึ่งถูกติดตั้งบนฐานรองกระป๋องโลหะแบบ TO-5 พร้อมด้วยการต่อสายลวดตัวนำ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11 หลังจากนั้นจึงนำไปทำการเก็บบรรจุเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปทดสอบลักษณะสมบัติต่างๆ ต่อไป

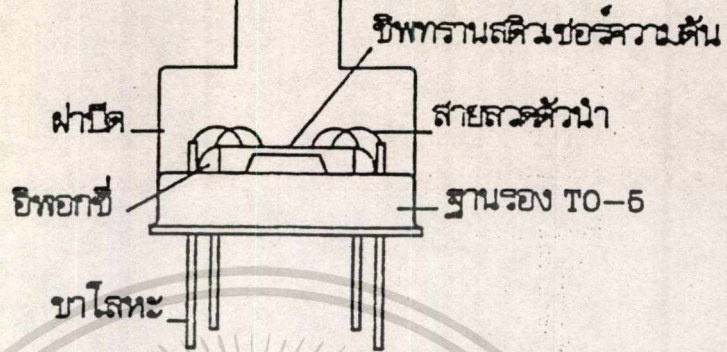


รูปที่ 2.11 แสดงภาพถ่ายชินทรานสดิวเซอร์ความดันซึ่งติดอยู่บนฐานรองกระป๋อง โลหะแบบ TO-5 พร้อมด้วยสายลวดตัวนำจากขั้วไฟฟ้าบนชิปไปยังขาของฐานรอง

- การเก็บบรรจุ (packaging)

เป็นขั้นตอนการปิดฝาฐานรองกระป๋องแบบ TO-5 ด้วยฝาปิดซึ่งมีท่อทองแดงยาวประมาณ 1.5 เซนติเมตร บัดกรีติดไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านบนของฝาสำหรับให้ความดันเข้า-ออกเพื่อความสะดวกในการทดสอบลักษณะสมบัติ ดังแสดงด้วยภาพตัดขวางในรูปที่ 2.12 ในการเก็บบรรจุได้ทำการผนึก (seal) บริเวณรอบๆ ระหว่างฝาปิดกับฐานรองด้วยตัวเชื่อมซึ่งเป็นอีพอกซีเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศ เช่นเดียวกับการติดตายลงบนฐานรองหลังจากเชื่อมด้วยโลหะผสมอินเดียมแล้วต้องหยอดด้วยอีพอกซีที่บดลงไปด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวข้างต้น ตัวทรานสดิวเซอร์ความดันที่ได้ผ่านกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึกจนถึงกระบวนการเก็บบรรจุจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปทดสอบ มีลักษณะแสดงด้วยภาพถ่ายในรูปที่ 2.13

ท่อสำหรับให้ความดันเข้า-ออก



รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางแสดงการเก็บบรรจุทรานซิสเตอร์ความดันด้วยตัวถังแบบ TO-5 (can case)



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายแสดงตัวทรานซิสเตอร์ความดันซึ่งเก็บบรรจุในตัวถังแบบ TO-5 การค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ขายหรือผู้ซื้อได้ใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

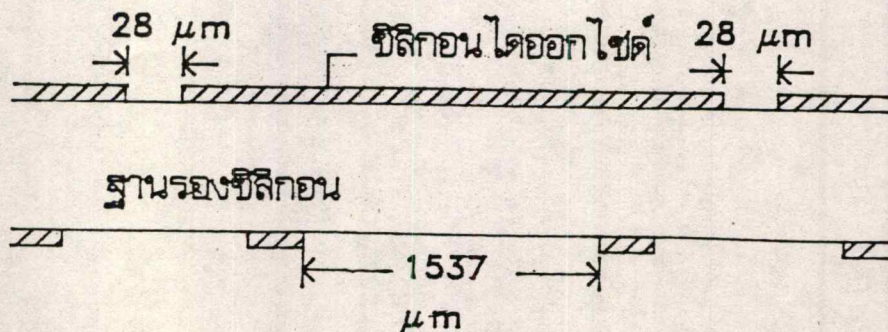
บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

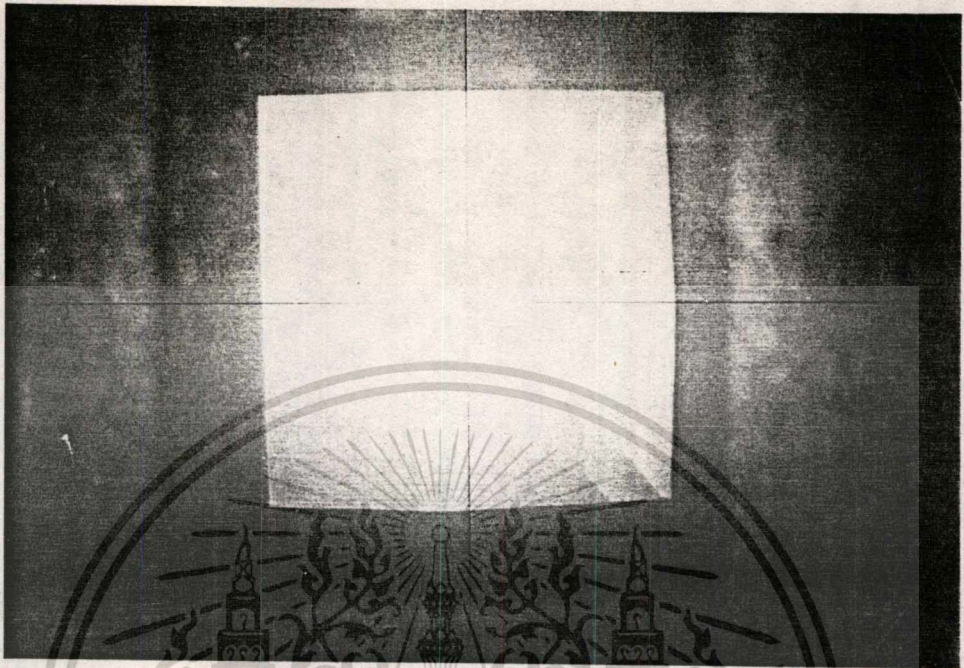
3.1 การทดลองและผลการทดลองกัฏฐานร่องซิลิกอนเพื่อสร้างเป็น ไดอะแพรม

3.1.1 การกัฏด้วยเทคนิค v-groove

สำหรับการทดลองด้วยเทคนิค v-groove ใช้แผ่นผลึกฐานร่องเริ่มต้นเป็นแผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยวชนิดพี ระบาย (100) หนา 400 ไมครอน มีกัฏความต้านทาน 40 โอห์ม-เซนติเมตร แผ่นผลึกจะถูกนำมาสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ปกคลุมผิวทั้งหมด ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 1125 เซลเซียส ได้ความหนาของชั้นออกไซด์ประมาณ 7000 อังสตรอม เพื่อใช้เป็นฉนวนป้องกันการกัฏของสารละลาย หลังจากนั้นนำแผ่นผลึกมาเข้ากระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อเปิดช่องออกไซด์ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ในการทดลองได้กำหนดความหนาของไดอะแพรมรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส $d = 20$ ไมครอน และขนาดความยาว 1 ด้านละ 1 มิลลิเมตร จากสมการที่ 1.41 จะคำนวณหาขนาดของช่องออกไซด์ด้านบนได้ 28 ไมครอน และขนาดของช่องออกไซด์ด้านล่างซึ่งเป็นส่วนของไดอะแพรมได้ 1537 ไมครอน ดังแสดงด้วยภาพตัดขวางในรูปที่ 3.1 ส่วนผสมของสารละลายประกอบด้วย เอทิลีนไดอามีน (E) 75 มิลลิลิตร ไพรอคาทีโคล (P) 12 กรัม และน้ำบริสุทธิ์ (DI) 24 มิลลิลิตร ทำการต้มสารละลายให้ได้อุณหภูมิคงที่ที่ 100 เซลเซียส จากนั้นจุ่มแผ่นผลึกลงในสารละลาย สารละลายจะเริ่มต้นทำปฏิกิริยากับเนื้อซิลิกอนจนกระทั่งเมื่อร่องตัววัดด้านบนบรรจบกับร่องตัววัดด้านล่างของแผ่นผลึก ซิงทรานสดิวเซอร์ก็จะแยกออกจากกัน จึงเป็นการสิ้นสุดกระบวนการกัฏ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง 25 นาที จากผลการทดลองนำมาคำนวณอัตราการกัฏของสารละลายในระบาย (100) ได้ประมาณ 1.43 ไมครอนต่อนาที ผิวของไดอะแพรมที่ได้จากการกัฏด้วยเทคนิค v-groove แสดงด้วยภาพถ่ายในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงการเปิดช่องออกไซด์สำหรับกัฏไดอะแพรมด้วยเทคนิค v-groove



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายแสดงผิว ไดอะแฟรมที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค v-groove

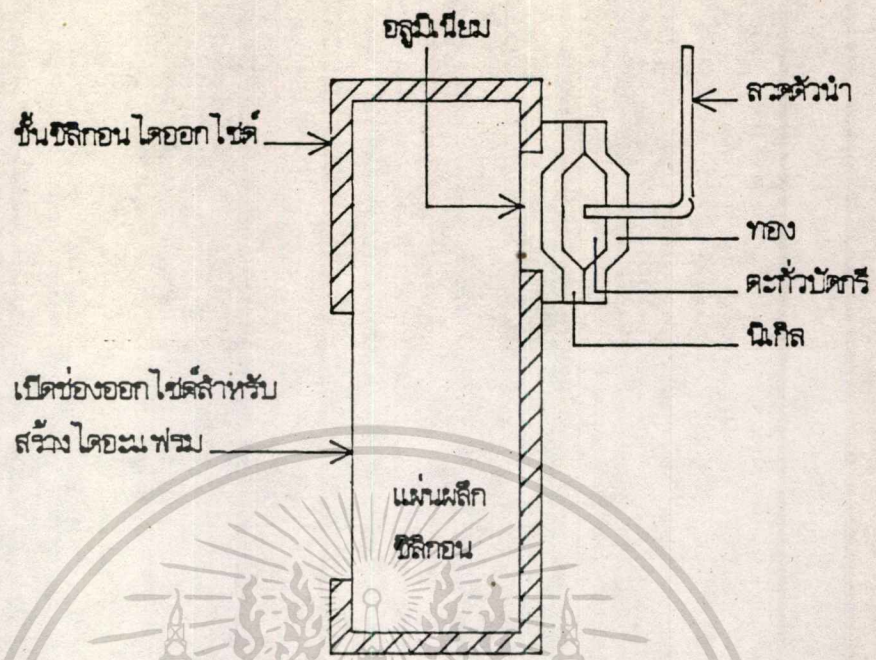
3.1.2 การกัดด้วยไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นมอนิเตอร์ (light monitoring)

สำหรับกระบวนการกัดด้วยไฟฟ้าโดยใช้แสงเป็นมอนิเตอร์ควบคุม จะทดลองกับแผ่นผลึกฐานรอง 2 ชนิดได้แก่ แบบแรกเป็นแผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยวอีพิแทกเซียลชนิด n/p ระบาย (100) หน้า 400 ไมครอน ชั้นอีพิมิพิกัดความต้านทาน 1-5 โอห์ม-เซนติเมตร หน้า 5-15 ไมครอน แบบที่สองเป็นแผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยวอีพิแทกเซียล ชนิด n/n^+ ระบาย (100) หน้า 400 ไมครอน ชั้นอีพิมิพิกัดความต้านทาน 5.5 - 6.5 โอห์ม-เซนติเมตร หน้า 18.3-23.1 ไมครอน พิกัดความต้านทานของชั้นฐานรอง 0.018 โอห์ม-เซนติเมตร นำแผ่นผลึกทั้งสองแบบมาสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ปกคลุมผิวทั้งหมด ด้วยกระบวนการออกซิเดชันตามหัวข้อที่ 3.1.1 จากนั้นทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อเปิดช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึกให้มีขนาดความยาว 1537 ไมครอน เพื่อกัดเป็นไดอะแฟรม ส่วนด้านหน้าจะเปิดเป็นช่องสำหรับสร้างเป็นขั้วไฟฟ้า ดังแสดงด้วยภาพตัดขวางในรูปที่ 3.3 ซึ่งวิธีการและกระบวนการสร้างได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 หลังจากผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกที่ผ่านการสร้างขั้วไฟฟ้าพร้อมที่จะเข้าสู่

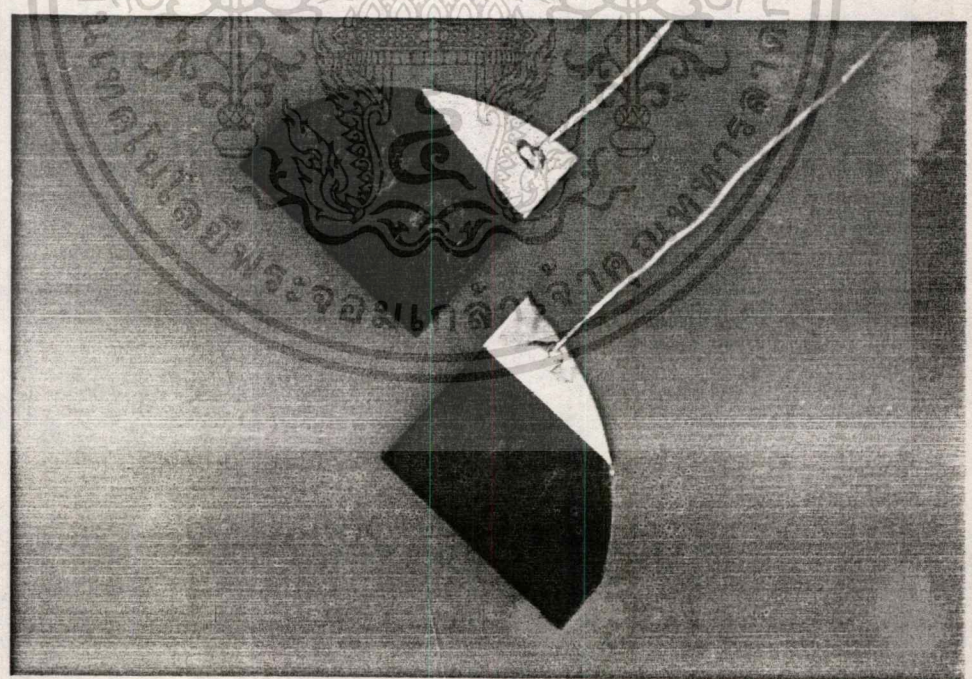
กระบวนการกัดตั้งแสดงในรูปที่ 3.4 สารละลายที่ใช้มีส่วนผสมเช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



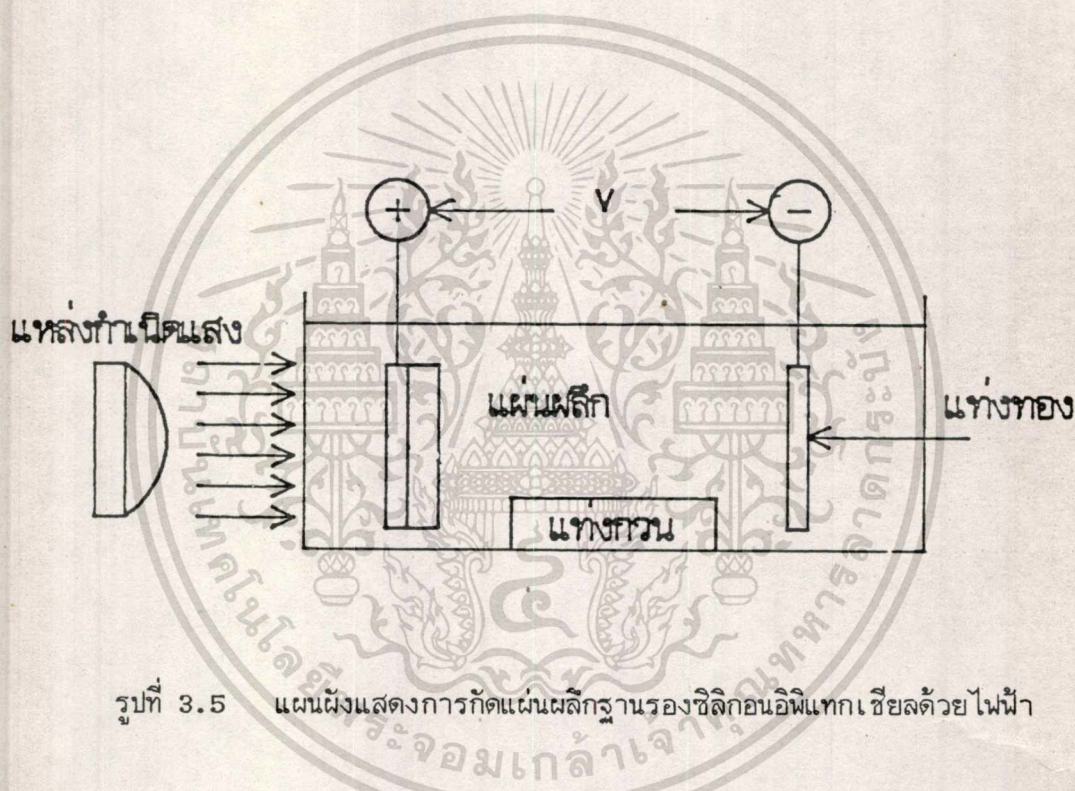
รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดของแผ่นผลึกที่จะนำไปกัดด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายแสดงแผ่นผลึกด้านหน้าซึ่งผ่านขั้นตอนการเปิดช่องออกไซด์ด้านหลัง และสร้างขั้วไฟฟ้าด้านหน้า พร้อมทั้งจะนำเข้าสู่กระบวนการกัด จากภาพถ่ายจะเห็นว่าส่วนของขั้วไฟฟ้าจะถูกชดด้วยทองปิดทับทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการจัดชุดอุปกรณ์จะแสดงด้วยแผนผังในรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง จัดไว้ในตำแหน่งให้แสงส่องเข้าทางด้านหน้าของแผ่นผลึก แหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว และ แท่งกวนสำหรับกวนสารละลาย ซึ่งแท่งกวนจะหมุนด้วยความเร็วประมาณ 300 รอบต่อนาที การทดลองเริ่มต้นด้วยการจุ่มแผ่นผลึกลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ที่ 100 เซลเซียส ทำการ บ้อนศักดาไฟฟ้าค่าบวกให้กับขั้วไฟฟ้าที่แผ่นผลึก และต่อกราวด์ (ground) เข้าที่แท่งทอง โดยให้ มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง +0.6 โวลต์ ดังแสดงด้วยภาพถ่ายในรูปที่ 3.6



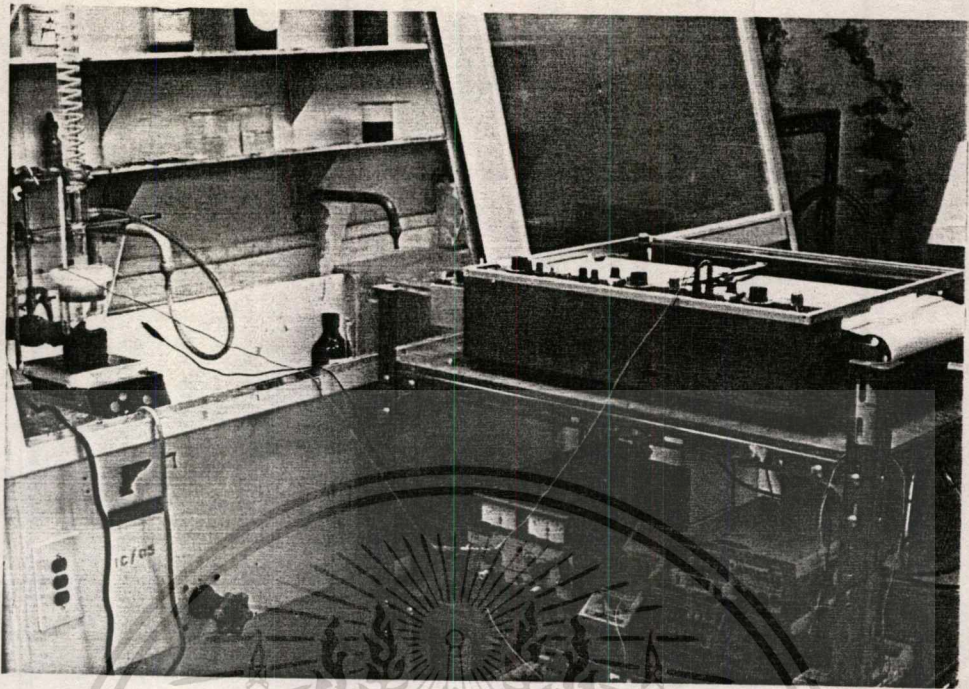
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการกักแผ่นผลึกฐานรองซิลิกอนอินิเทกเซียลด้วยไฟฟ้า

เมื่อเริ่มกระบวนการกัก สารละลายจะทำปฏิกิริยากับเนื้อซิลิกอนที่บริเวณผิวของแผ่นผลึกซึ่ง ได้เปิดเป็นช่องไว้ ซึ่งสิ่งเกิดได้จากฟองอากาศที่เกิดขึ้นที่บริเวณนั้น และฟองอากาศเหล่านี้จะ ยังคงเกิดขึ้นตรงเท่าที่สารละลายยังทำปฏิกิริยากับเนื้อซิลิกอน จากผลการทดลอง เมื่อเวลาผ่านไป ประมาณ 4 ชั่วโมง 30 นาที จะสังเกตเห็นแสงส่องทะลุผ่านแผ่นไดอะแฟรม จึงเป็นอันสิ้นสุด กระบวนการกัก แผ่นผลึกที่ได้ผ่านกระบวนการกักเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.7 เมื่อตรวจดูผิว หน้าของแผ่นไดอะแฟรมที่ได้จากการกักแผ่นผลึกซิลิกอนอินิเทกเซียลชนิด n/p ด้วยเครื่องตรวจ ดูต้นแบบและผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (profile projector) ดังแสดงด้วยภาพถ่าย ในรูปที่ 3.8 จะเห็นว่า ขอบของไดอะแฟรมมีความเรียบคมชัด แต่พื้นผิวหน้าของแผ่นไดอะแฟรม ขรุขระมาก โดยปรากฏเป็นเกรน (grain) ขนาดใหญ่ แต่ละเกรนมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งมี

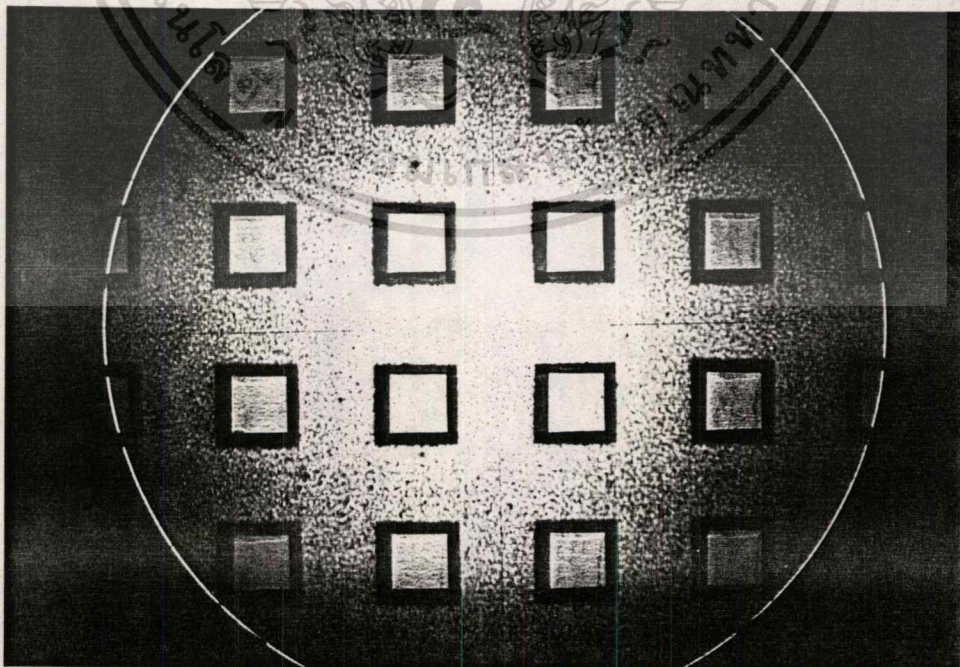
ความหมายว่าแผ่นไดอะแฟรมมีความสม่ำเสมอ (uniform)

ส่วนผลการทดลองกัดไดอะแฟรมที่ได้จากการกัดแผ่นผลึกซิลิกอนอินทิเทกเซียลชนิด n/n^+ แสดงด้วยภาพถ่ายในรูปที่ 3.9 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าขอบไดอะแฟรมมีความเรียบคมชัดและพื้นผิวหน้าของ ไดอะแฟรมมีความราบเรียบดีมาก เมื่อนำแผ่น ไดอะแฟรมไปตรวจสอบความหนาด้วย เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (scanning electron microscope, SEM) ซึ่ง แสดงด้วยภาพถ่ายด้านตัดขวางของไดอะแฟรมในรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าแผ่น ไดอะแฟรมมีความ หนาสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น เมื่อทำการวัดความหนาของไดอะแฟรมจากภาพถ่ายด้วยเครื่องสแกน นิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปดังแสดงด้วยภาพตัดขวางในรูปที่ 3.11 สามารถวัดความหนาของ ไดอะแฟรมได้ 14 ไมครอน เมื่อทราบความหนาของไดอะแฟรมจะสามารถคำนวณอัตราการกัด ของสารละลาย PED ในระนาบ (100) ที่อุณหภูมิ 100 เซลเซียส ได้ค่าประมาณ 1.43 ไมครอนต่อนาที

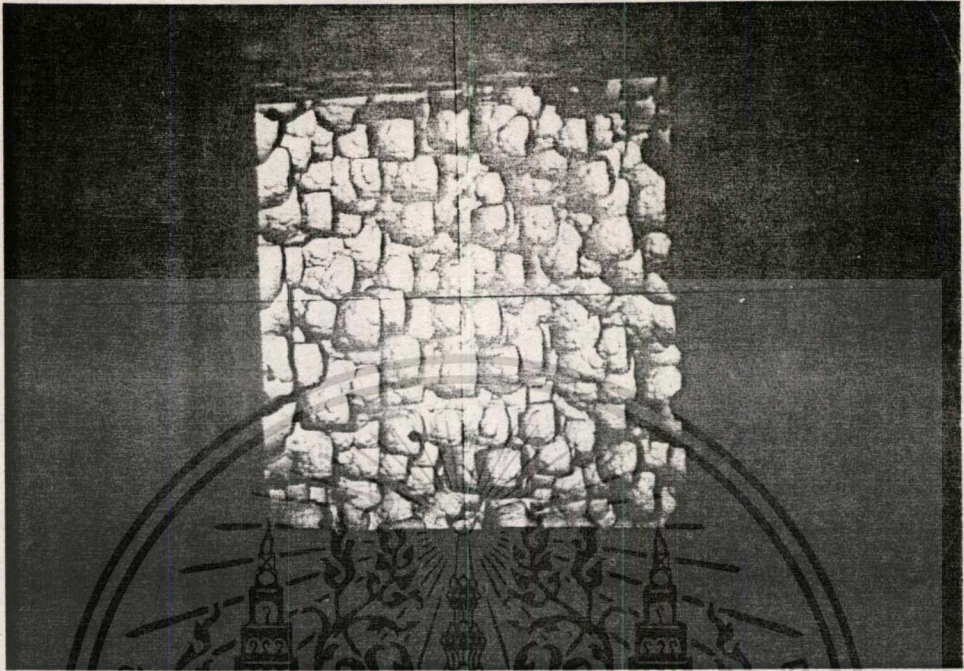
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการกัดแผ่นผลึกฐานรองทั้งสามชนิด จะพบว่า ขอบ ของ ไดอะแฟรมที่ได้จากแผ่นทั้งสามมีความเรียบคมชัดทั้งหมด แต่เมื่อเปรียบเทียบความสม่ำเสมอ (uniform) ของแผ่น ไดอะแฟรมที่ได้จากการกัดเนื้อสารซิลิกอนด้วยเทคนิค v-groove และ การกัดซิลิกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้แผ่นผลึกอินทิเทกเซียลชนิด n/p และชนิด n/n^+ ตามลำดับ พบว่า การกัดด้วยไฟฟ้า จะทำให้ได้แผ่น ไดอะแฟรมที่มีความหนาสม่ำเสมอดีกว่าการใช้เทคนิค v-groove ซึ่งจากการตรวจสอบความหนาของแผ่น ไดอะแฟรมที่ได้จากการกัดด้วยเทคนิค v-groove ด้วยเครื่องมือวัดความหนาของชิ้นสาร (linear gage) พบว่า พื้นผิวไดอะแฟรมมี ความเอียง โดยมีความแตกต่างระหว่างจุดที่บางที่สุด และจุดที่หนาที่สุดของแผ่น ไดอะแฟรม ประมาณ 30 ไมครอน และเมื่อเปรียบเทียบความเรียบของพื้นผิวไดอะแฟรมที่ได้จากแผ่นผลึก ชนิด n/p และชนิด n/n^+ จากการกัดด้วยไฟฟ้าในรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะสามารถสรุปได้ว่า การใช้เทคนิคการกัดเนื้อสารซิลิกอนด้วยไฟฟ้าบนแผ่นผลึกซิลิกอนอินทิเทกเซียลชนิด n/n^+ จะให้ผล ที่ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้ เทคนิคนี้จึงถูกนำมาใช้สำหรับสร้างเป็นแผ่นไดอะแฟรมของทรานซิสเตอร์ ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ ในกระบวนการสร้างมาตรฐานซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 2



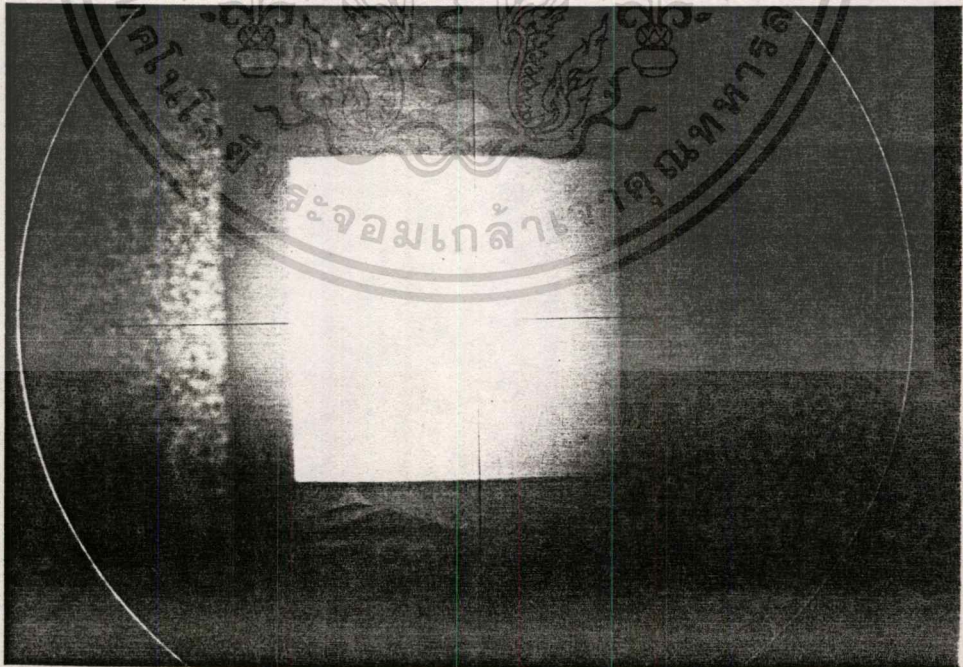
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายแสดงการทดลองกัตซ์ลิกอนด้วยไฟฟ้า เนื่องจากสารละลาย PED ทำปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย ดังนั้นในขณะที่ทำการทดลองจะต้องควบคุมไม่ให้สารละลายสัมผัสกับอากาศและควบคุมให้ความชื้นของสารละลายคงที่ ด้วยการใช้ condensing tube ช่วยในการกลั่นตัวของสารละลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.7 ที่แสดงภาพถ่ายโดอะแฟรมที่ได้เมื่อกระบวนการกัตซ์ลิกอนเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว อย่างไรก็ตามถ้าหากต้องการข้อมูลเพิ่มเติมหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

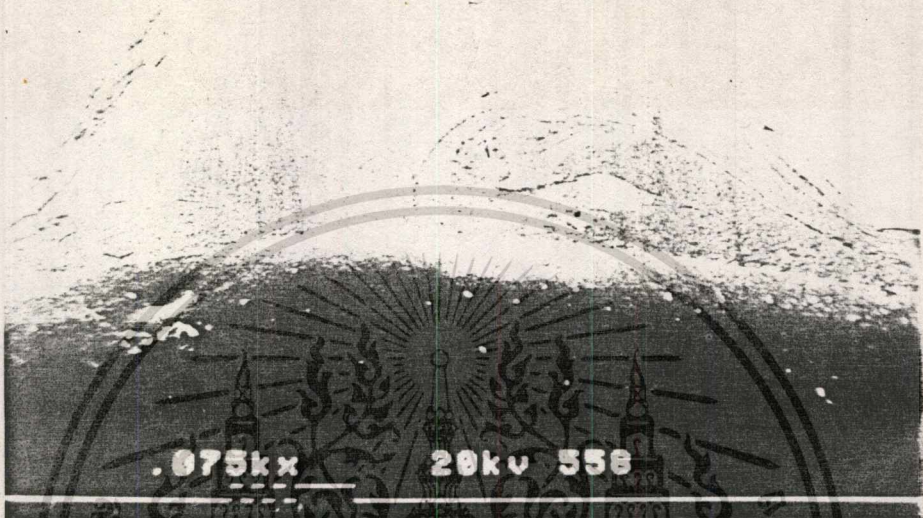


รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายแสดงพื้นผิวของแผ่น โตะอะแพรมที่ได้จากการก่ตแผ่นผลึกซิลิกอนอิพิแทกเซียมชนิด n/p ด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายแสดงพื้นผิวของแผ่น โตะอะแพรมที่ได้จากการก่ตแผ่นผลึกซิลิกอนอิพิแทกเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสาร ชนิด n/p⁺ ด้วยไฟฟ้าานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายด้านตัดขวางของแผ่น ไตอะแพรม แสดงให้เห็นแผ่น ไตอะแพรมทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิกอนอินิแทกเซียลชนิด n/n^+ จะเห็นแผ่น ไตอะแพรมมีความสม่ำเสมอ

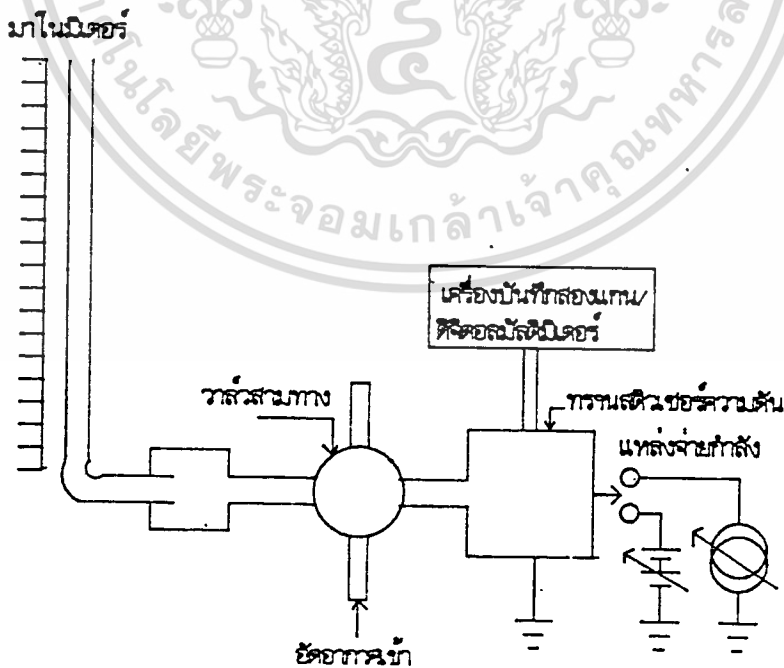


รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายแสดงด้านตัดขวางของแผ่น ไตอะแพรมจากเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สโคป วัตถุประสงค์ของแผ่น ไตอะแพรมได้ 14 ไมครอน นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าความไวต่อความดัน (pressure sensitivity)

ค่าความไวต่อความดัน หรือที่เรียกว่า " ความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน " เป็นลักษณะสมบัติพื้นฐานของทรานสดิวเซอร์ความดัน ที่แสดงคุณสมบัติการตอบสนองต่อความดัน โดยทั่วไป ในการนำทรานสดิวเซอร์ความดันไปประยุกต์ใช้งาน คุณสมบัติทางด้านความไวมักจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรก การวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันเป็นการทดสอบเพื่อดูว่าทรานสดิวเซอร์ความดันที่สร้างขึ้น สามารถใช้งานได้หรือไม่ โดยทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o ของบริดจ์กับความดันทางฟิลิกส์ที่กระทำกับทรานสดิวเซอร์ ผลการทดลองถูกแสดงด้วยกราฟการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของบริดจ์ที่แปรกับการเปลี่ยนแปลงความดันที่ป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์ความดัน ชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดทดสอบแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งประกอบด้วย เครื่องวัดความดันโลหิตแบบปรอท (manometer) สำหรับใช้แสดงค่าความดันสเกลของความดันแสดงในหน่วยของ มม.ปรอท โดยมีค่าในช่วง 0 - 300 มม.ปรอท แหล่งจ่ายกำลังให้กับบริดจ์ใช้ทั้งแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว และแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว ซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ การแสดงผลจะแสดงด้วยเครื่องบันทึกสองแกน (X-Y recorder) และดิจิตอลมัลติมิเตอร์



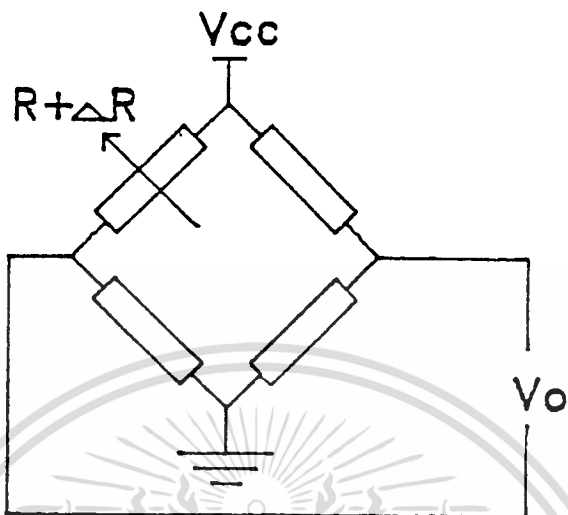
3.2.1 ผลการทดลองวัดค่าความไวของตัวต้านทานในแนวสัมผัส R_s และตัวต้านทานในแนวรัศมี R_r

การวัดค่าความไวของตัวต้านทานตัวเดียวๆ เป็นการทดสอบเพื่อสังเกตปริมาณการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวต้านทานทุกตัวบนไดอะแฟรม และเพื่อตรวจสอบว่าค่าความต้านทานของตัวต้านทานจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร (ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นหรือค่าความต้านทานลดลง) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบหรือไม่ วงจรสำหรับทดสอบแสดงในรูปที่ 3.13 แหล่งจ่ายกำลังเป็นแบบแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว ซึ่งกำหนดไว้ 5 โวลต์ ความดันที่ใช้ทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 300 มม.ปรอท เริ่มต้นการทดสอบด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับบริดจ์ และป้อนความดันให้กับทรานสดิวเซอร์จะได้ผลการทดลองแสดงด้วยกราฟซึ่งบันทึกจากเครื่องบันทึกสองแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ก) และรูปที่ 3.14 (ข) ตามลำดับ รูปที่ 3.14 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของบริดจ์เมื่อทดสอบกับตัวต้านทาน R_1 และ R_3 ซึ่งเป็นตัวต้านทานในแนวรัศมี และรูปที่ 3.14 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของบริดจ์เมื่อทดสอบกับตัวต้านทาน R_2 และ R_4 ซึ่งเป็นตัวต้านทานในแนวสัมผัส เส้นกราฟผลการทดลองในรูปทั้งสอง แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท V_o ของตัวต้านทานแต่ละตัวเป็นเชิงเส้นกับการเปลี่ยนแปลงของความดันที่กระทำกับตัวต้านทาน โดยไม่ปรากฏฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ของสัญญาณ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง ΔR ของตัวต้านทานแต่ละตัวที่ค่าความดันใดๆ จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ [21]

$$\Delta R = 4R V_o/V_{cc} \tag{3.1}$$

แทนค่า V_o ที่วัดได้จากตัวต้านทานแต่ละตัวที่ความดัน 300 มม.ปรอท ค่า $V_{cc} = 5 V$ และค่าความต้านทาน R ของตัวต้านทานแต่ละตัวลงในสมการที่ (3.1) จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งปรากฏว่าค่าความต้านทานของตัวต้านทาน R_2 และ R_4 ซึ่งเป็นตัวต้านทานในแนวสัมผัสมีค่าลดลง ส่วนค่าความต้านทานของตัวต้านทาน R_1 และ R_3 ซึ่งเป็นตัวต้านทานในแนวรัศมีมีค่าเพิ่มขึ้น นำผลการคำนวณจากตารางที่ 3.1 มาเขียนเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสี่ตัวกับค่าความดันในช่วง 0-300 มม.ปรอท จะได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.15 ผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดสามารถนำมาสรุปได้ว่า เมื่อป้อนความดันให้กับทรานสดิวเซอร์ ความดัน ค่าความต้านทานของตัวต้านทานในแนวสัมผัส R_s มีค่าการเปลี่ยนแปลง ΔR ลดลง ส่วนค่าความต้านทานของตัวต้านทานในแนวรัศมี R_r มีค่าการเปลี่ยนแปลง ΔR เพิ่มขึ้น ดังจะเห็น

ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสองแบบเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้



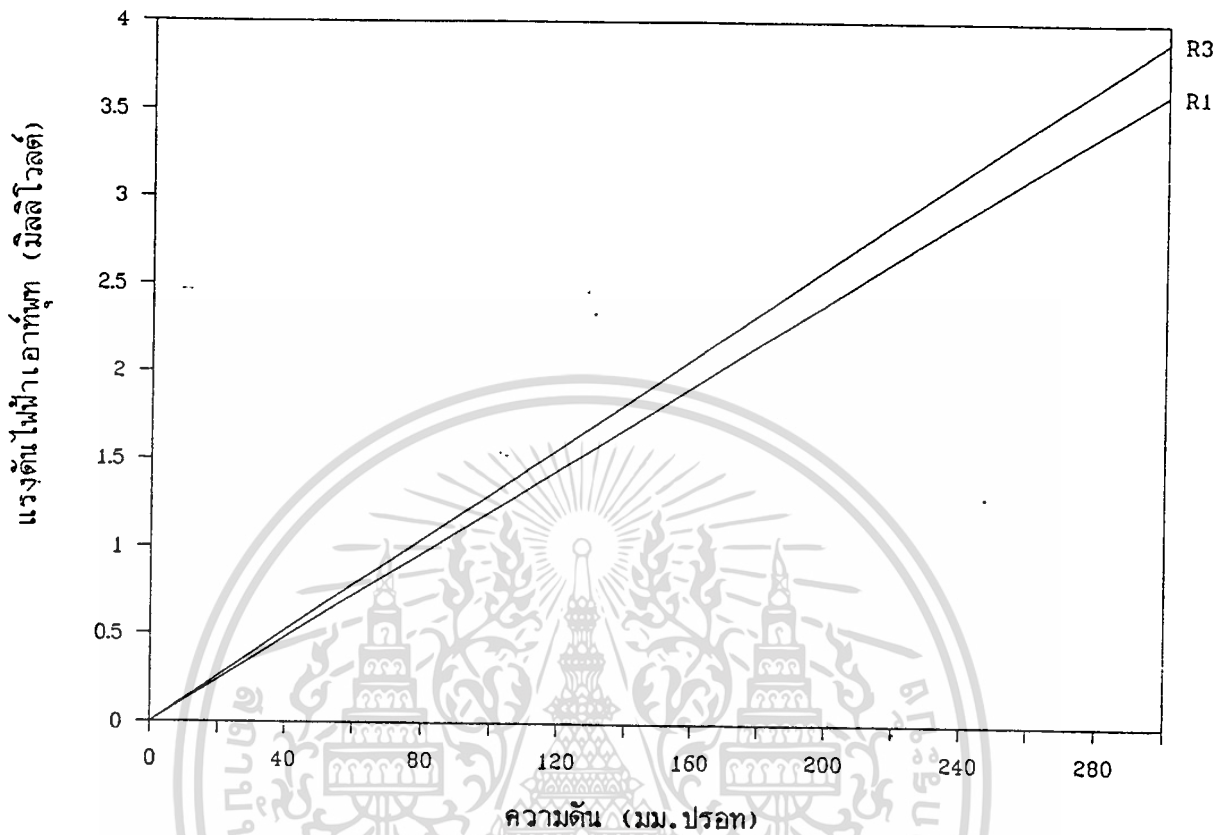
รูปที่ 3.13 แสดงวงจรควอเตอร์บริดจ์ (quarter bridge) สำหรับใช้ทดสอบวัดค่าความไวของตัวต้านทานบนโต๊ะแพรมของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟ

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดลองวัดค่าความไวของตัวต้านทาน R1 R2 R3 และ R4

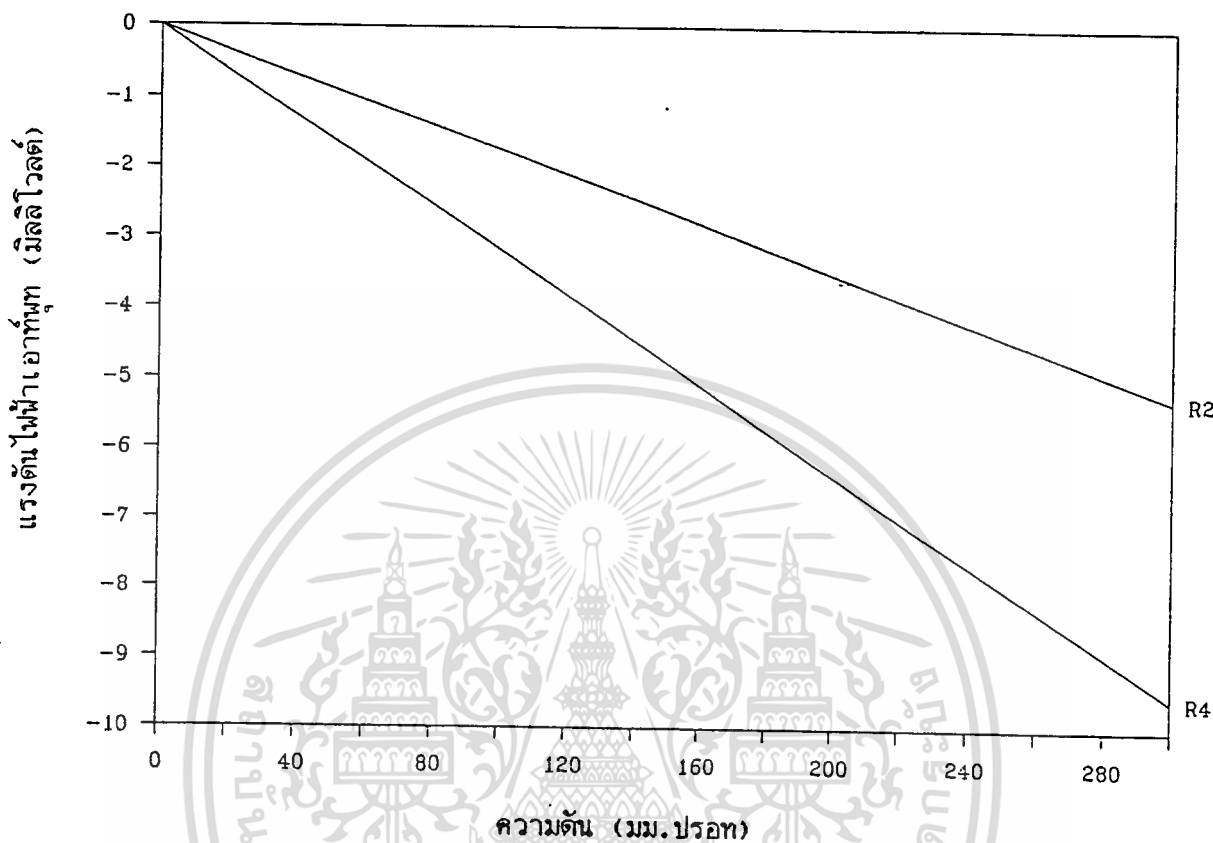
$p = 300 \text{ mm.Hg}, V_{cc} = 5 \text{ V}$			
ตัวต้านทาน	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	V_o (mV)	ΔR (ohm)
R1	916	+ 3.6	+ 2.64
R2	832	- 5.3	- 3.53
R3	886	+ 3.9	+ 2.76
R4	749	- 9.6	- 5.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังบริษัทหรือองค์กรการค้า

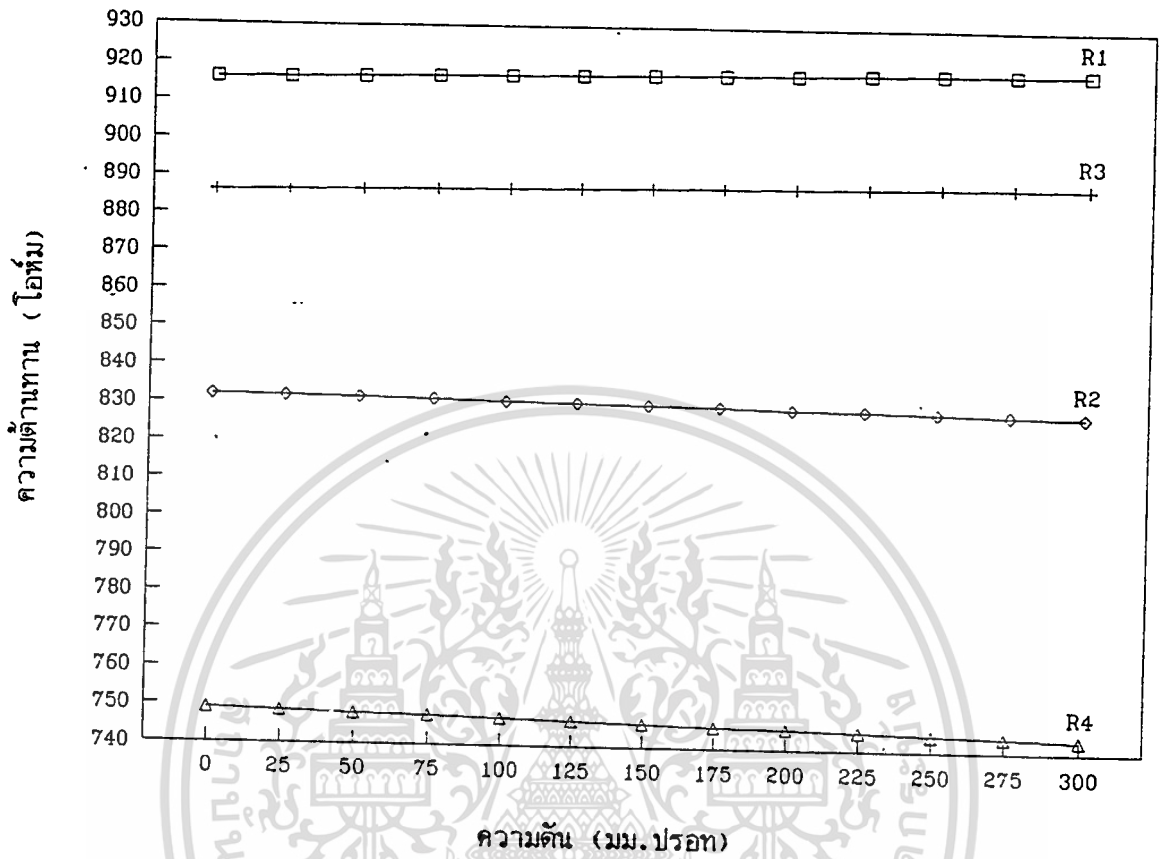
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 (ก) แสดงกราฟผลการทดลองวัดความไวของตัวต้านทานในแนวรัศมี R1 และ R3 ซึ่งวางตัวอยู่บน ไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดัน



รูปที่ 3.14 (ข) แสดงกราฟผลการทดลองวัดความไวของตัวต้านทานในแนวสัมผัส R2 และ R4 ซึ่งวางตัวอยู่บนโต๊ะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดัน



รูปที่ 3.15 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสี่ตัว ซึ่งวางตัวอยู่บน
โต๊ะแฟรมของทรานส์มิชชันเซอร์ความดัน

3.2.2 ผลการทดลองวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน

โดยทั่วไป ตัวต้านทานซึ่งวางอยู่บนไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดันจะเชื่อมต่อกันภายในเป็นวงจรบริดจ์ในขั้นตอนกระบวนการสร้าง บริดจ์ตัวต้านทานภายในอาจจัดเป็นวงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์ (half bridge) หรือ ฟูลบริดจ์ (full bridge) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักใช้วงจรแบบฟูลบริดจ์ เนื่องจากให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่แปรกับความดันได้สูงกว่า หรืออีกนัยหนึ่งคือให้ความไวสูงกว่า ที่ค่าความดันเท่ากัน ความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันมีค่าเป็นหน่วยของแรงดันไฟฟ้า (V) ต่อหน่วยความดัน (P) และหน่วยกำลัง (A, V) สำหรับการทดสอบได้กระทำในช่วงความดัน 0-300 มม.ปรอท และทดสอบกับแหล่งจ่ายกำลังทั้งแบบแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัวและแบบกระแสคงตัว ดังนั้น ค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันจึงมีหน่วยเป็น $V/A \cdot \text{mmHg}$ หรือ $V/V \cdot \text{mmHg}$ ในการทดสอบได้เลือกใช้วงจรแบบฟูลบริดจ์ โดยใช้ชุดอุปกรณ์การทดสอบและวิธีการทดสอบเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 3.2.1 การทดสอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัวแรงดันไฟฟ้ากระทำที่ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ที่ $0.5 \text{ V} - 5 \text{ V}$ ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งแสดงว่าเส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของบริดจ์เปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับความดันที่กระทำกับทรานสดิวเซอร์ความดัน โดยไม่ปรากฏฮิสเทอเรซิสของสัญญาณ ส่วนการทดสอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว กระทำที่ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ที่ $0.5 \text{ mA} - 5 \text{ mA}$ ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งได้ผลว่าเส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับความดัน โดยไม่ปรากฏฮิสเทอเรซิสเช่นเดียวกับการทดสอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว จากกราฟผลการทดลองในรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 ได้ข้อสังเกตว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของแรงดันไฟฟ้าไบอัสและกระแสไฟฟ้าไบอัส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของบริดจ์เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับวงจร จากผลการทดลองที่ได้นั้นแสดงให้เห็นว่า ทรานสดิวเซอร์ความดันที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้งานได้ โดยสามารถให้การตอบสนองต่อความดันภายนอก นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ได้กับแหล่งจ่ายกำลังทั้งแบบแรงดันคงตัวและกระแสคงตัว โดยให้ค่าความไว $17.82 \mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$ เมื่อไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว และ $14.75 \mu\text{V}/\text{mA} \cdot \text{mmHg}$ เมื่อไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว

ตารางที่ 3.2 (ก) แสดงผลการทดลองวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน เมื่อไบอัสด้วย แหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว ที่ค่าความดัน 300 มม.ปรอท

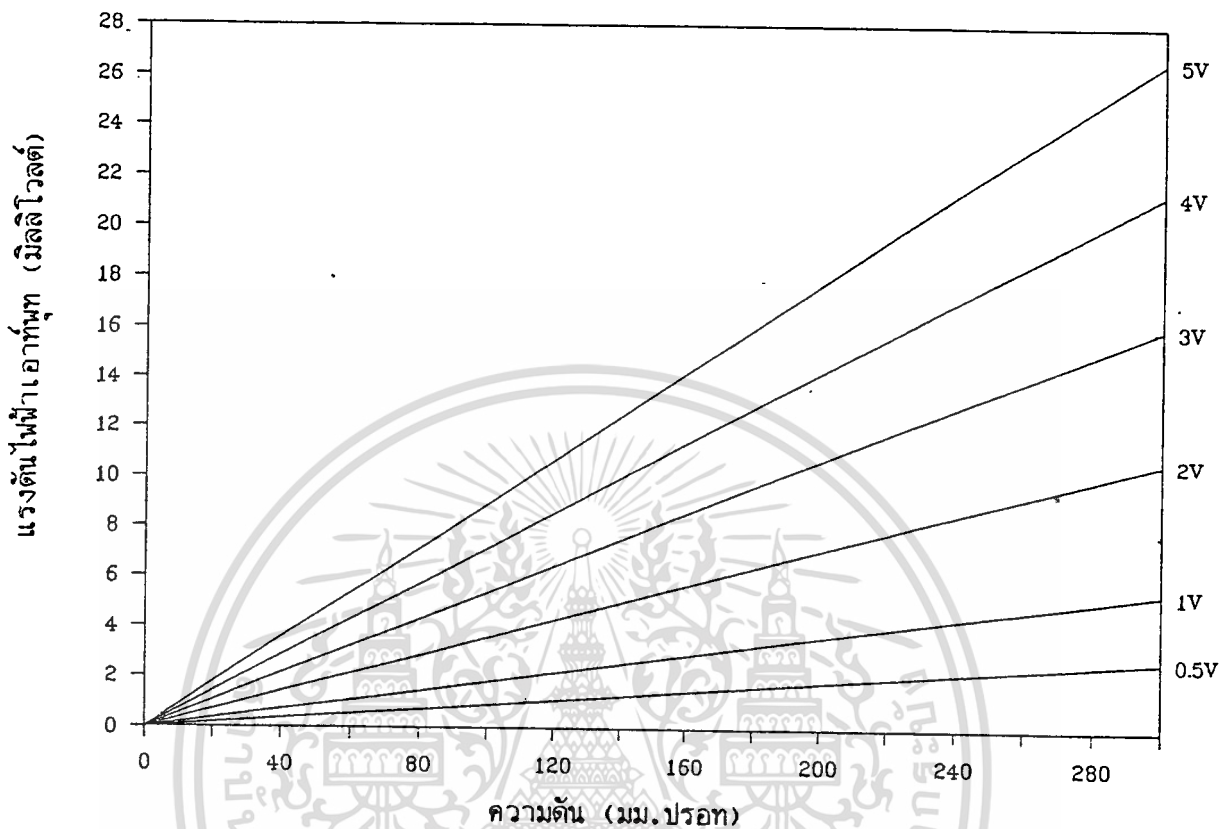
ปริมาณแรงดัน (V)	แรงดันเอาท์พุท (mV)	ความไว ($\mu\text{V}/\text{V}\cdot\text{mmHg}$)
0.5	2.7	18.0
1.0	5.4	18.0
2.0	10.6	17.7
3.0	16.0	17.8
4.0	21.3	17.8
5.0	26.6	17.7

ความไวเฉลี่ย 17.82 $\mu\text{V}/\text{V}\cdot\text{mmHg}$.

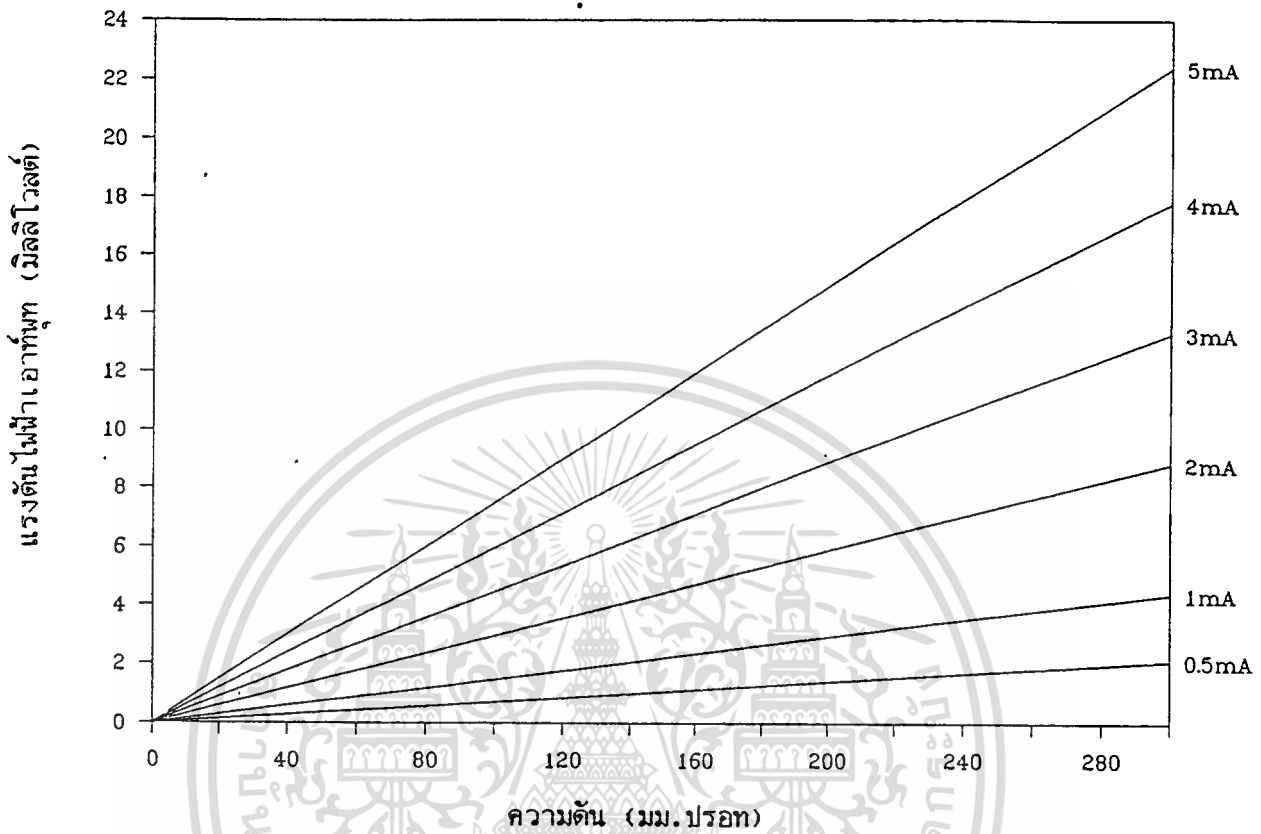
ตารางที่ 3.2 (ข) แสดงผลการทดลองวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน เมื่อไบอัสด้วย แหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว ที่ค่าความดัน 300 มม.ปรอท

ปริมาณกระแส (V)	แรงดันเอาต์พุต (mV)	ความไว ($\mu\text{V}/\text{mA} \cdot \text{mmHg}$)
0.5	2.2	14.7
1.0	4.4	14.7
2.0	8.8	14.7
3.0	13.3	14.8
4.0	17.8	14.8
5.0	22.2	14.8

ความไวเฉลี่ย $14.75 \mu\text{V}/\text{mA} \cdot \text{mmHg}$.



รูปที่ 3.16 แสดงกราฟผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์กับความดันกับความดันที่กระทำจากภายนอก เมื่อใช้วงจรแบบฟูลบริดจ์ และ ไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว



รูปที่ 3.17 แสดงกราฟผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของทรานส์ฟอเมอร์ความดันกับความดันที่กระทำจากภายนอก เมื่อใช้วงจรแบบฟูลบริดจ์ และ ไป้อัสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว

3.3 การทดลองและศึกษาผลทางด้านอุณหภูมิ

3.3.1 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าความไวต่ออุณหภูมิของแรงดันออฟเซต

(Temperature sensitivity of the offset, TSO)

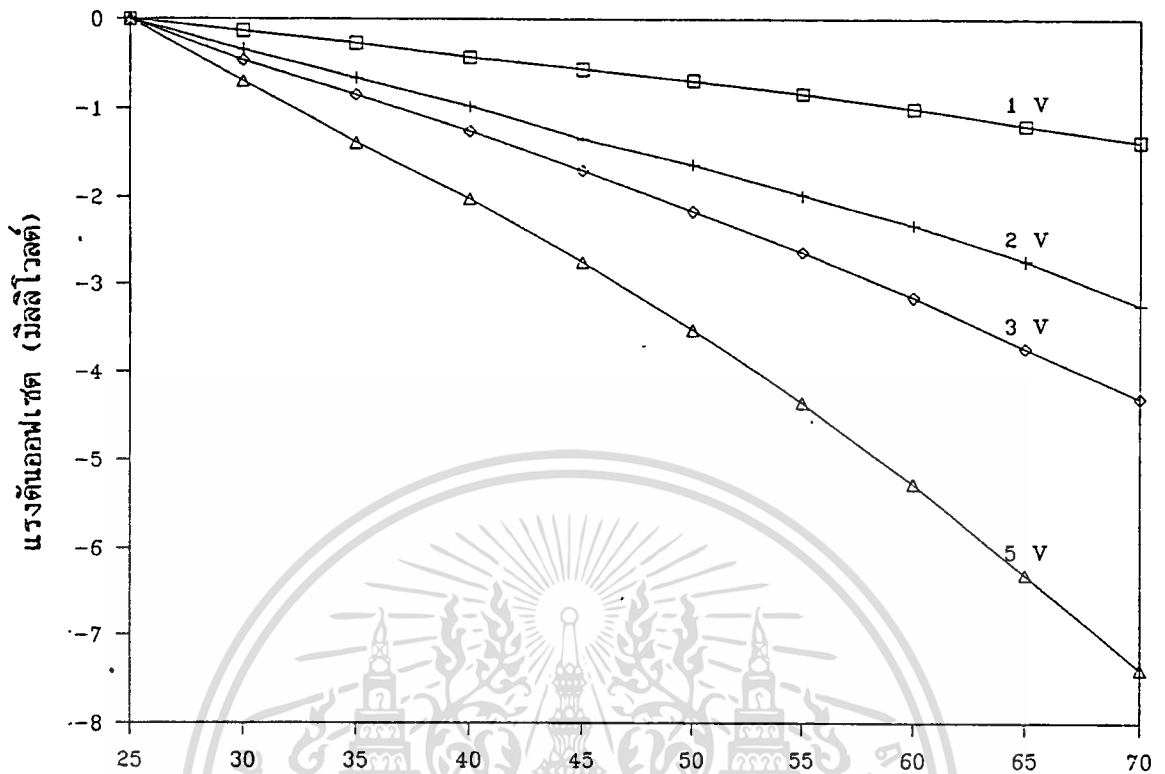
การทดลองวัดค่าความไวต่ออุณหภูมิของแรงดันออฟเซต เป็นการทดลองเพื่อสังเกตว่าเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลง จะมีผลอย่างไรกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทของบริดจ์ ในสภาวะซึ่งไม่มีความดันกระทำกับทรานสดิวเซอร์ความดัน ($p = 0$) (ซึ่งก็คือแรงดันออฟเซตนั่นเอง) ในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันออฟเซตระหว่างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบมีการ์ทริง และไม่มีการ์ทริง ในช่วงอุณหภูมิ 23 – 70 เซลเซียส โดยนำตัวทรานสดิวเซอร์นำไปเข้าเตาอบซึ่งสามารถปรับค่าอุณหภูมิได้ สำหรับการแสดงผล ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทถูกแสดงด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ แหล่งจ่ายกำลังจะใช้ทั้งแบบแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว และแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว เริ่มต้นทำการทดลองที่อุณหภูมิ 23 °C ทำการปรับให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทเริ่มต้นเป็นศูนย์ จากนั้นปรับอุณหภูมิของเตาอบให้เพิ่มขึ้นแล้วบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำข้อมูลการทดลองทั้งหมดมาเขียนกราฟ จะได้เส้นกราฟผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งเป็นค่าแรงดันออฟเซตที่เอาต์พุทของบริดจ์ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไม่มีการ์ทริง เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่ค่าความดันเป็นศูนย์ เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัวค่าต่างๆ ตั้งแต่ 1-5 V เส้นกราฟแสดงว่าแรงดันออฟเซตของบริดจ์ตัวด้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และการเพิ่มปริมาณของแรงดัน ไบแอสมีผลทำให้แรงดันออฟเซตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณของแรงดัน ไบแอสที่ป้อนให้กับบริดจ์ รูปที่ 3.19 เป็นผลการทดลองวัดค่าแรงดันออฟเซตที่เอาต์พุทของบริดจ์ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไม่มีการ์ทริง เมื่อใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบแหล่งจ่ายกระแสคงตัวค่าต่างๆ ตั้งแต่ 1-5 mA ขั้นตอนการทดลองเป็นเช่นเดียวกับการทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว ผลการทดลองแสดงว่าค่าแรงดันออฟเซตเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและยังมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณของกระแสไบแอสอีกด้วย ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว ส่วนการทดลองกับทรานสดิวเซอร์ความดันแบบมีการ์ทริง ใช้เงื่อนไขการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองกับทรานสดิวเซอร์แบบไม่มีการ์ทริง ผลการทดลองเมื่อใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัวแสดงในรูปที่ 3.20 ส่วนผลการทดลองเมื่อใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัวแสดงในรูปที่ 3.21 ผลการทดลองรูปที่ 3.20 และ 3.21 แสดงให้เห็นว่าแรงดันออฟเซตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเพิ่มเป็นสัดส่วนกับปริมาณของแหล่งจ่ายกำลังที่ป้อนให้กับบริดจ์ด้วย เมื่อคำนวณค่าความไวต่ออุณหภูมิของแรงดัน

ออฟเซต TSO จากกราฟผลการทดลอง จะได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่ง เป็นค่า

แรงดันออฟเซตที่ได้จากทรานสดิวเซอร์แบบมีการ์ดริง เปรียบเทียบกับทรานสดิวเซอร์แบบไม่มี
การ์ดริง เมื่อจ่ายด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว และแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว ซึ่ง
จะสามารถถอดสรุปข้อมูลเบื้องต้นได้ว่า ค่าความไวต่ออุณหภูมิของแรงดันออฟเซตของทรานสดิวเซอร์
ความดันแบบมีการ์ดริงมีค่าน้อยกว่าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไม่มีการ์ดริง

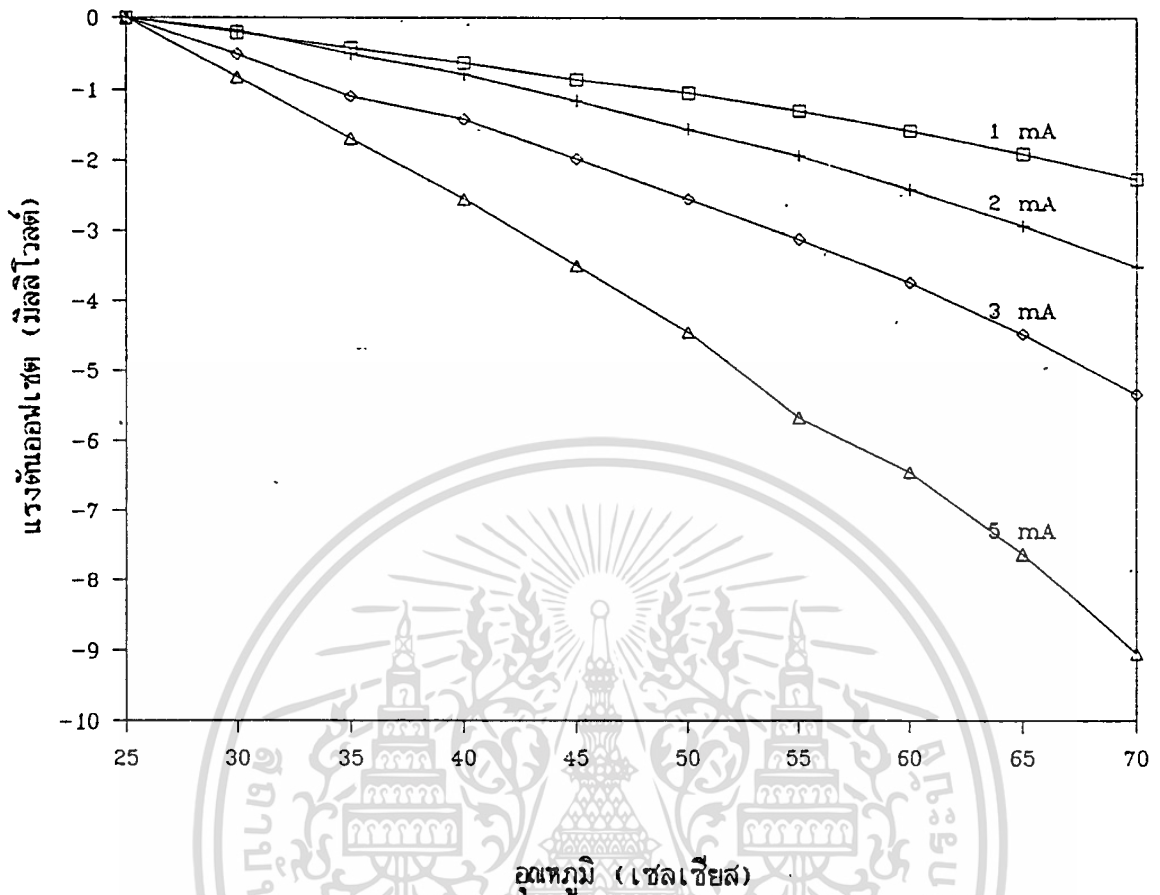
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความไวต่ออุณหภูมิของแรงดันออฟเซตของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบมี
การ์ดริงและไม่มีการ์ดริง เมื่อไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัวและแหล่งจ่ายกำลัง
แบบกระแสคงตัว

ชนิดของ ทรานสดิวเซอร์ ความดัน	ค่าความไวต่ออุณหภูมิของแรงดันออฟเซต	
	แหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว ($\mu\text{V}/\text{V} \cdot ^\circ\text{C}$)	แหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว ($\mu\text{V}/\text{mA} \cdot ^\circ\text{C}$)
มีการ์ดริง	-17.5	-20.2
ไม่มีการ์ดริง	-32.0	-42.2

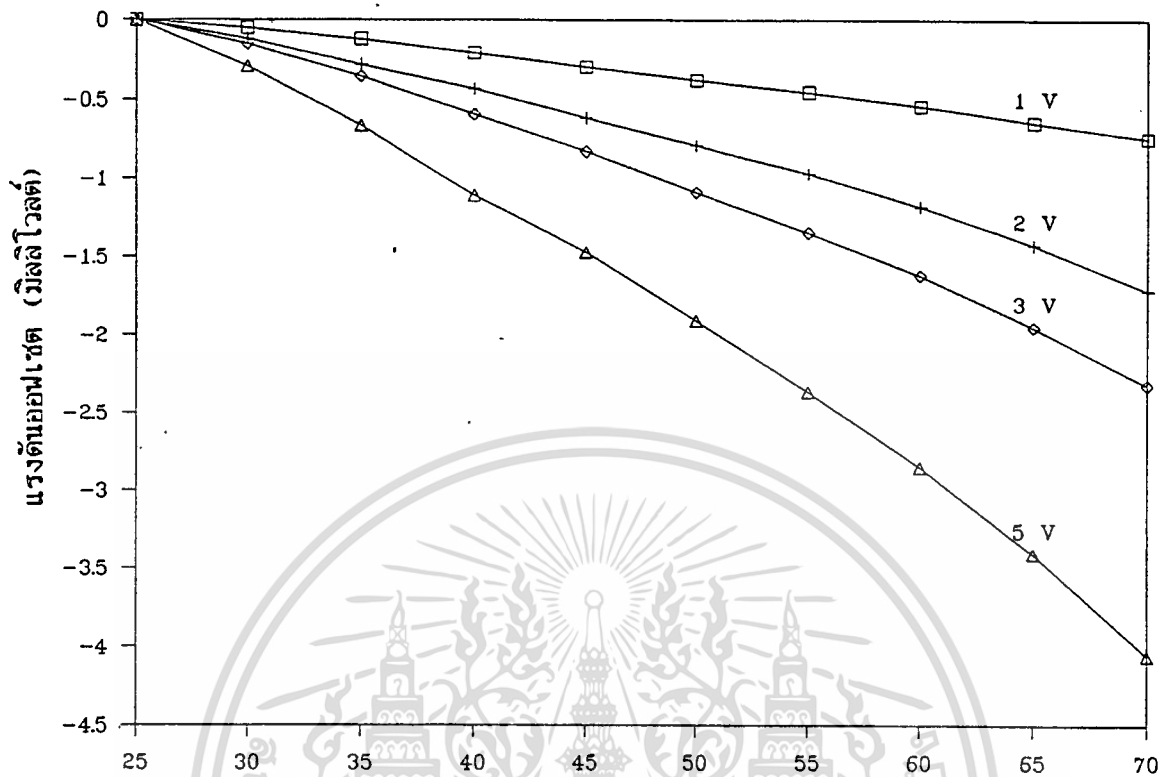


อุณหภูมิ (เซลเซียส)

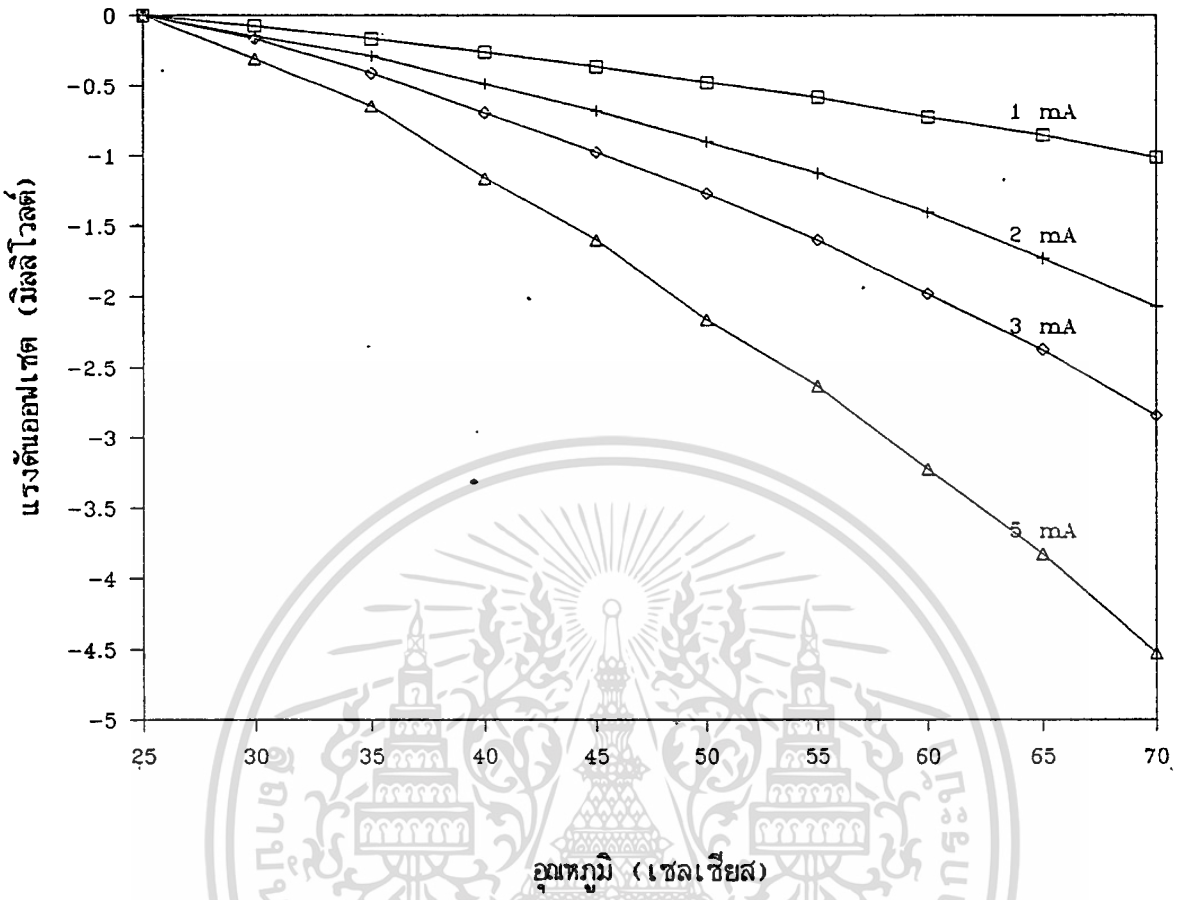
รูปที่ 3.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ความถี่แบบไม่มีคาร์ดริงล้อมรอบตัวต้านทาน เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว



รูปที่ 3.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออปเซตกับอุณหภูมิจของทรานซิสเตอร์ความถี่แบบไม่มีคาร์ตริงลุ่มรอบตัวต้านทาน เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว



รูปที่ 3.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแอมป์เซตกับลูปทงุมิของทรานส์ฟอรม์เซอร์ความดันแบบมีเกิร์ตริงล้อมรอบตัวค้ำทาน เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว

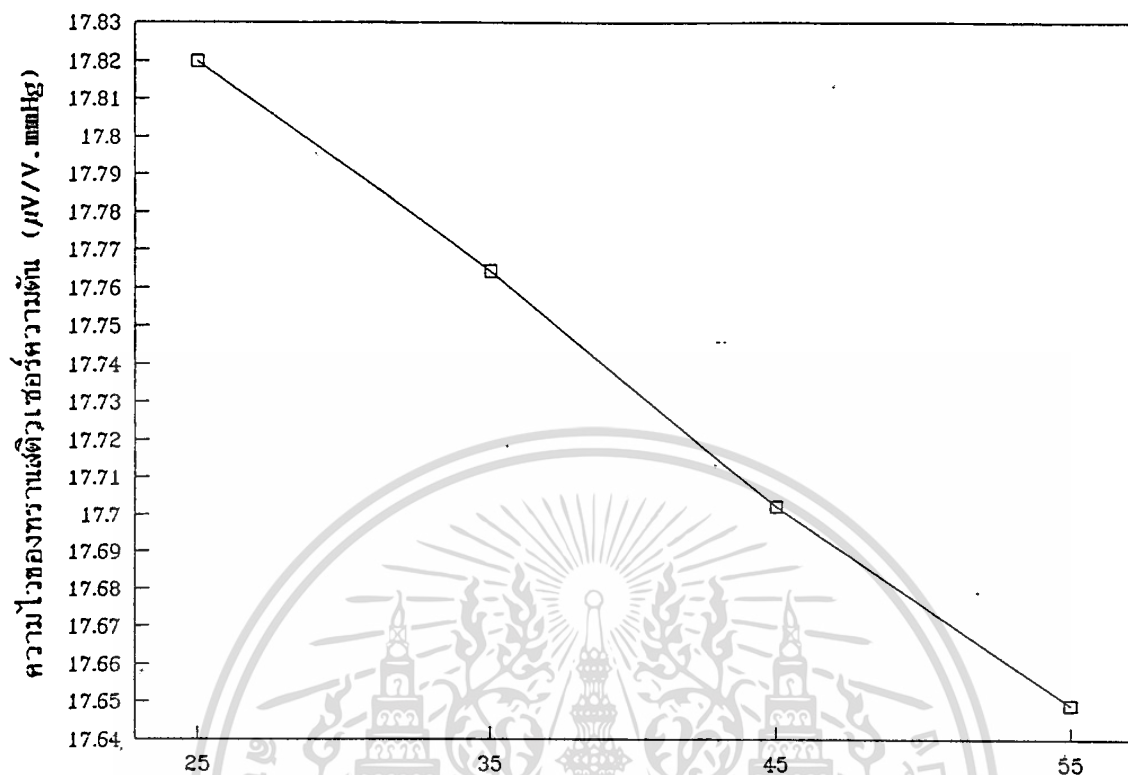


รูปที่ 3.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออปเซตกับอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ความดันแบบมีการตรึงล้อมรอบตัวต้านทาน เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว

3.3.2 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความไว (Temperature Coefficient of the Sensitivity, TCS)

การวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความไว เป็นการทดลองเพื่อสังเกตผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันกับอุณหภูมิในช่วง 25 - 55 เซลเซียส สำหรับการทดลองตัวทรานสดิวเซอร์ถูกนำไปเข้าเตาอบซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งได้ ขั้นตอนการทดลองเป็นเช่นเดียวกับการทดลองวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน โดยเริ่มทำการวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ที่อุณหภูมิเริ่มต้นคือ 25 เซลเซียส จากนั้นทำการปรับอุณหภูมิของเตาอบให้สูงขึ้น แล้วทำการวัดค่าความไวที่อุณหภูมิ 35 เซลเซียส 45 เซลเซียส และ 55 เซลเซียส ตามลำดับ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่ได้จากบริดจ์ถูกบันทึกลงบนเครื่องบันทึกสองแกน แพล่งจ่ายกำลังที่ใช้ทดสอบเป็นแบบแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.22 ข้อมูลที่ได้จากกราฟผลการทดลองได้แสดงว่า ค่าความไวของบริดจ์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อคำนวณจากกราฟจะได้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความไวเฉลี่ย $-0.0057 \mu\text{V/V} \cdot \text{mmHg} \cdot ^\circ\text{C}$

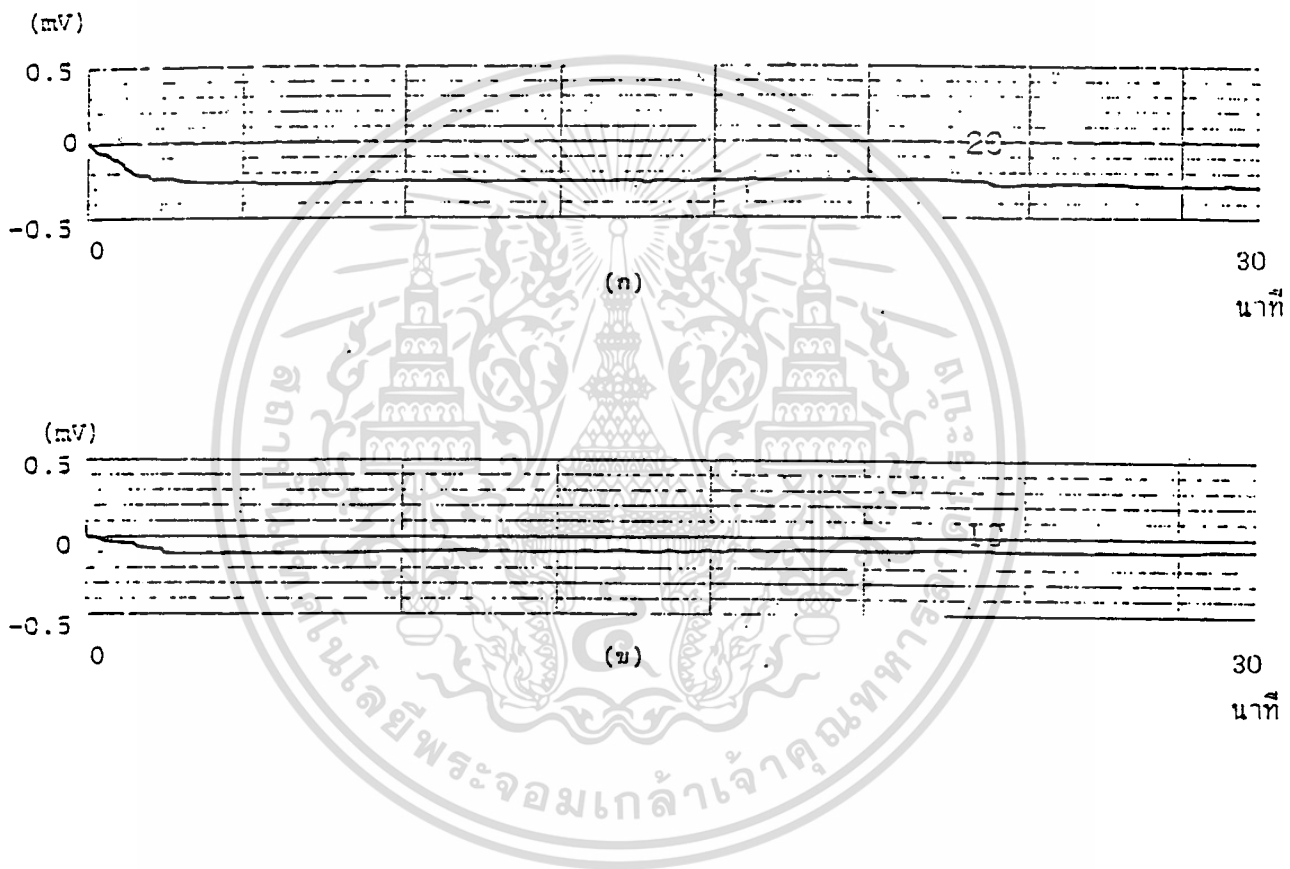
การที่ค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า ค่าความไวต่อความดัน S ของทรานสดิวเซอร์ความดันมีค่าขึ้นกับสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีป π_{44} เนื่องจากสัมประสิทธิ์ π_{44} มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 1.15 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีป π_{44} นั้นมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับอุณหภูมิของทรานสดิวเซอร์ความดันซึ่งประกอบด้วยบริดจ์ตัวต้านทานชนิดพีเป็นไปตามคุณสมบัติของ π_{44} ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ ซึ่งความสัมพันธ์นี้ได้แสดงไว้ในสมการที่ 1.38



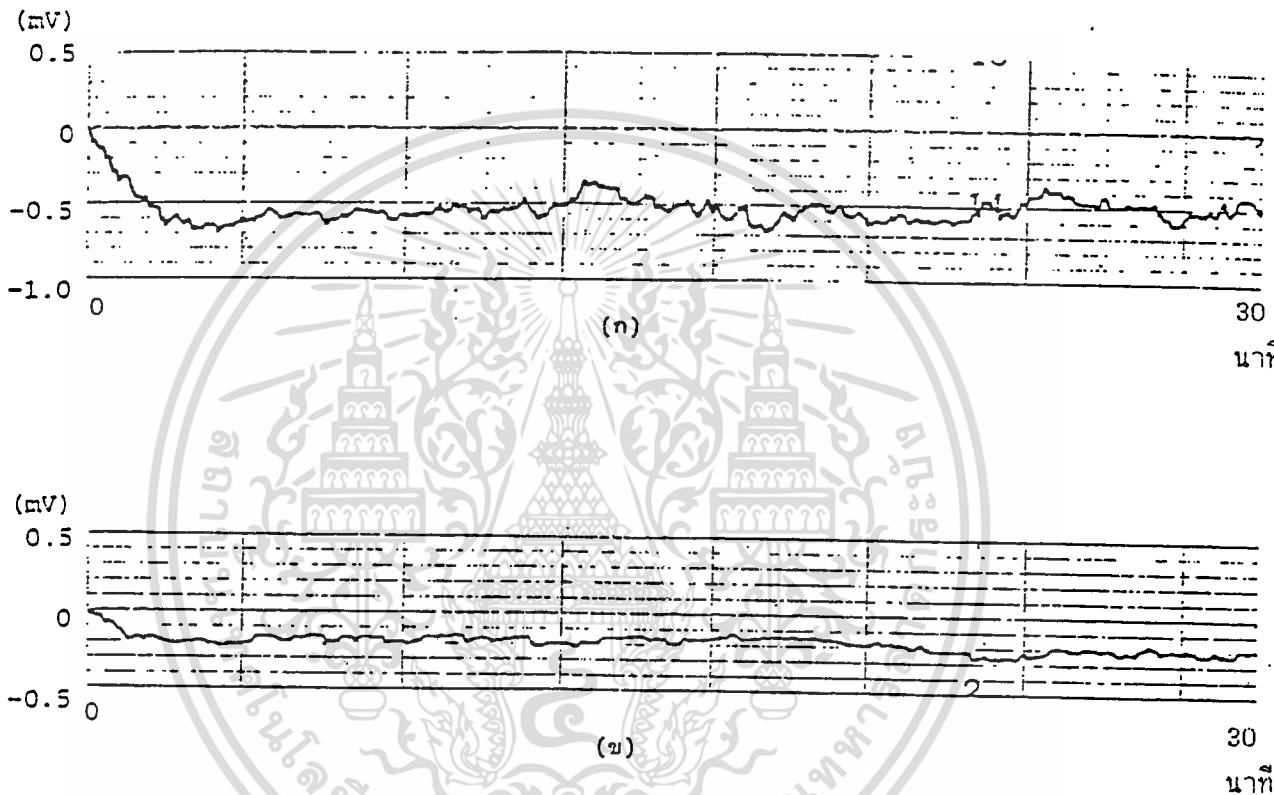
รูปที่ 3.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับอุณหภูมิของทรานสดิวเซอร์ความดัน ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 55 เซลเซียส

3.3.3 เสถียรภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท

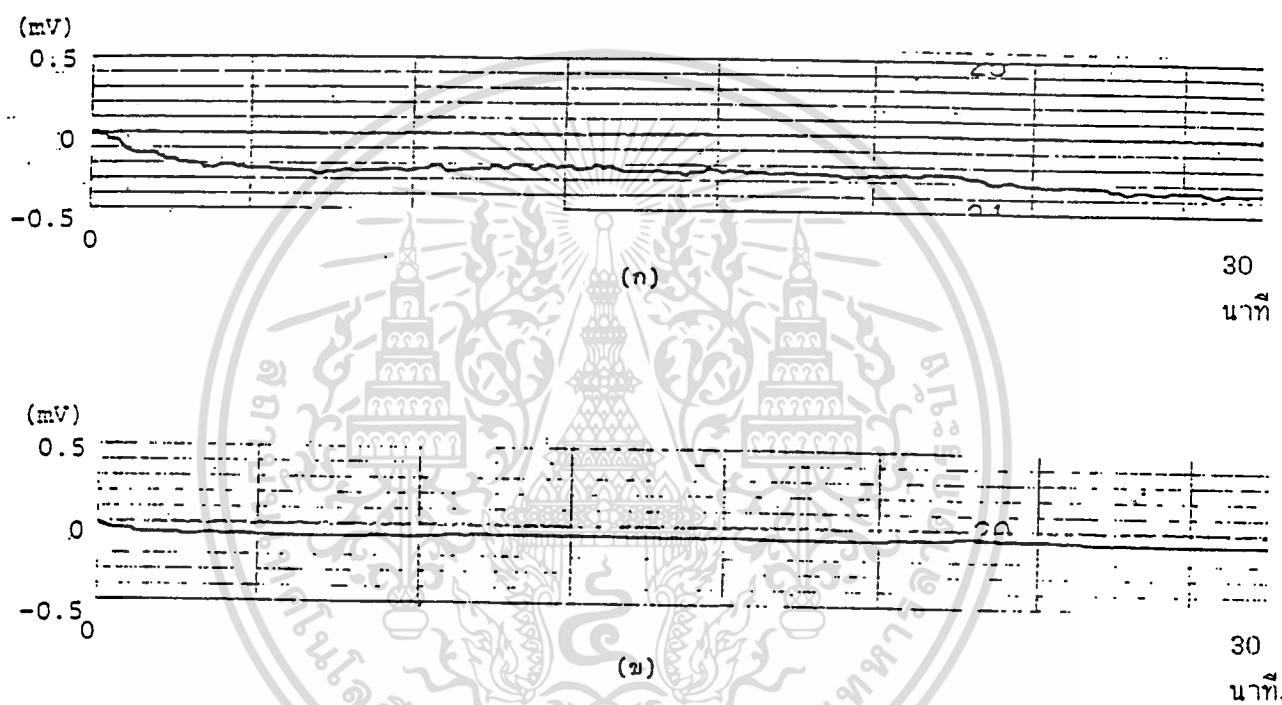
การวัดเสถียรภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของบริดจ์ตัวต้านทาน เป็นการทดลอง เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทในสภาวะที่ความดันมีค่าเป็นศูนย์ ที่อุณหภูมิ และแรงดันไบแอสค่าต่างๆ ผลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณถูกบันทึกลงบนเครื่องบันทึกสองแกน โดยเริ่มต้นจับสัญญาณตั้งแต่เมื่อเริ่มจ่ายแรงดันไบแอส จากแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัวให้กับ บริดจ์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.23 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นลักษณะการขยับเลื่อนของสัญญาณที่อุณหภูมิ 46 เซลเซียส ที่แรงดันไบแอส 8 โวลต์ โดยรูปที่ 3.23 (ก) เป็นสัญญาณที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันแบบมีการ์ดริง ส่วนรูปที่ 3.23 (ข) เป็นสัญญาณที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไม่มีการ์ดริง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็น 70 เซลเซียส ปริมาณการขยับเลื่อนของสัญญาณจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันการกระเพื่อมของสัญญาณก็มากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.24 (ก) ซึ่งแสดงสัญญาณที่ได้จากทรานสดิวเซอร์แบบมีการ์ดริง และรูปที่ 3.24 (ข) เป็นสัญญาณที่ได้จากทรานสดิวเซอร์แบบไม่มีการ์ดริง นอกจากนี้การขยับเลื่อนของสัญญาณยังขึ้นกับปริมาณของแหล่งจ่ายกำลังอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.25 (ก) และ (ข) ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 70 เซลเซียส ที่แรงดันไบแอส 5 โวลต์ ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อลดขนาดแรงดันลง การขยับเลื่อนของสัญญาณจะลดลงด้วย โดยในรูปที่ 3.25 (ก) เป็นสัญญาณที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันแบบมีการ์ดริง และรูปที่ 3.25 (ข) เป็นสัญญาณที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไม่มีการ์ดริง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท ที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันแบบมีการ์ดริงและแบบไม่มีการ์ดริงพบว่า ปริมาณการขยับเลื่อนของสัญญาณจากทรานสดิวเซอร์แบบมีการ์ดริงมีค่าลดลงและการกระเพื่อมของสัญญาณก็ลดลงด้วย ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างการ์ดริงช่วยลดกระแสรบกวนที่ไหลไปรบกวนระหว่างตัวต้านทานได้



รูปที่ 3.23 แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทของบริดจ์เปรียบเทียบระหว่างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไม่มีการดริฟต์ในรูป (ก) และแบบมีการดริฟต์ในรูป (ข) ที่ความดัน 0 มม.ปรอท อุณหภูมิ 46 เซลเซียส แรงดันไบแอส 8 โวลต์ ..



รูปที่ 3.24. แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาก์นุทของบริดจ์เปรียบเทียบระหว่างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไม่มีคาร์ดริงในรูป (ก) และแบบมีคาร์ดริงในรูป (ข) ที่ความดัน 0 มม.ปรอท อุณหภูมิ 70 เซลเซียส แรงดันไบแอส 8 โวลต์



รูปที่ 3.25 แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทของบริดจ์เปรียบเทียบระหว่างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไม่มีการดริฟต์ในรูป (ก) และแบบมีการดริฟต์ในรูป (ข) ที่ความดัน 0 มม.ปรอท อุณหภูมิ 70 เซลเซียส แรงดันไบแอส 5 โวลต์

บทที่ 4

สรุปและบทวิจารณ์

ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเป็ยโซริซิสที่ปนโดอะแพรมบาง ได้ถูกพัฒนาสร้างขึ้น ตัวทรานสดิวเซอร์ความดันที่สมบูรณ์มีโครงสร้างประกอบด้วย ซิพฐานรองซึ่งใช้แผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยวอินทิเทกเซียลชนิด n/n^+ ระบาย (100) มีขนาด 3 x 3 ตารางมิลลิเมตร พื้นที่ส่วนรับรู้ความไวเป็นแผ่นโดอะแพรมบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการกัดซิลิกอนในสารละลาย PED ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการควบคุมความหนาด้วยแสง ตัวด้านทานเป็นสารเจือชนิดพี ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการแพร่สารเจือโบรอนด้วยความร้อน ซิพทรานสดิวเซอร์ถูกเก็บบรรจุในตัวถังกระป๋องแบบ TO-5 โดยมีท่อสำหรับให้ความดันเข้า-ออก เพื่อความสะดวกในการนำไปทดสอบลักษณะสมบัติ ผลการทดสอบเบื้องต้นปรากฏว่า ทรานสดิวเซอร์ความดันมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นต่อความดันในช่วงทดสอบคือ 0-300 มม.ปรอท โดยให้ค่าความไวเฉลี่ย $17.82 \mu V/V \cdot \text{mmHg}$ เมื่อต่อตัวด้านทานเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์และทดสอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว ส่วนผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อมพบว่า การใช้โครงสร้างการรัดริงทำให้ทรานสดิวเซอร์ความดันมีการเปลี่ยนแปลงค่าความไวตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความไวเฉลี่ย $-0.0057 \mu V/V \cdot \text{mmHg} \cdot ^\circ C$

ผลที่ได้จากการทำวิจัยทำให้ได้ทราบข้อมูลทางเทคนิค อุปสรรค และปัญหาบางประการ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาลักษณะสมบัติของทรานสดิวเซอร์ความดัน ดังจะสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

เนื่องจากทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเป็ยโซริซิสที่มีโครงสร้างส่วนสำคัญ คือ โดอะแพรมคุณภาพของ โดอะแพรมจะมีผลต่อลักษณะสมบัติพื้นฐานทางด้านความไวมาก โดอะแพรมที่ดีจะต้องมีผิวที่ราบเรียบไม่ขรุขระ ไม่มีความลาดเอียง และมีความหนาสม่ำเสมอ ทั้งนี้เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวด้านทานเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังได้แสดงไว้ในบทที่ 1 แล้วว่าค่าความไวต่อความดันของทรานสดิวเซอร์ความดันมีค่าขึ้นกับความหนาของโดอะแพรม เพื่อที่จะเพิ่มค่าความไวของทรานสดิวเซอร์จะต้องลดความหนาของโดอะแพรมลง เพื่อให้โดอะแพรมสามารถยุบตัวได้ง่ายเมื่อมีความดันค่าต่ำๆ มากระทำ จากการศึกษา ทดลอง และพัฒนาเทคนิคการกัดเนื้อสารซิลิกอนดัง ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 จะเห็นว่า การใช้เทคนิคร่องตัวรีนั้น ถึงแม้ว่าจะประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมแผ่นที่ไม่ยุ่งยากเนื่องจากไม่ต้องผ่านขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้า และให้ผิวโดอะแพรมที่ค่อนข้างเรียบ แต่แผ่นโดอะแพรมที่ได้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ เทคนิคนี้จึงไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการกัดโดอะแพรม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โดอะแพรมที่ต้องการความบาง

ของทรานสดิวเซอร์มีค่าลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันออฟเซตของบริดจ์ต่ออุณหภูมิในหัวข้อที่ 1.7 ซึ่งได้แสดงว่าเป็นผลจากการที่ค่าความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละตัวไม่เท่ากัน เมื่อนำตัวต้านทานเหล่านี้มาต่อเป็นวงจรบริดจ์ จะทำให้เกิดค่าแรงดันออฟเซตที่เอาท์พุทของบริดจ์ โดยที่ค่าแรงดันออฟเซตนี้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย และจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.1 ก็ได้แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันออฟเซตนี้ตามอุณหภูมิแวดล้อม เนื่องจากตัวต้านทานเหล่านี้เป็นตัวต้านทานที่เกิดจากการแพร่สารเจือ ค่าความต้านทานของตัวต้านทานจะขึ้นกับค่าความหนาแน่นประจุพาหะ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงค่าของความคล่องตัวของพาหะก็จะเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นค่าความต้านทานก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม ถ้าสามารถสร้างตัวต้านทานให้มีค่าความต้านทานเท่ากันซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานทุกตัวเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเท่ากัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของบริดจ์จะมีค่าเป็นศูนย์คงที่ที่ค่าอุณหภูมิทุกค่า ซึ่งหมายความว่าจะไม่ปรากฏแรงดันออฟเซตเลย แต่ในทางปฏิบัติ วิทยาการที่ใช้ในการสร้างตัวต้านทานเป็นเทคนิคการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ด้วยเทคนิคนี้จะสามารถสร้างตัวต้านทานได้โดยมีค่าความต้านทานผิดพลาดอยู่ในช่วงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ด้วยข้อจำกัดนี้ จึงส่งผลให้ปรากฏค่าแรงดันออฟเซตที่เอาท์พุทของบริดจ์ตัวต้านทานเสมอ ผลที่ตามมาคือ เกิดการขยับเลื่อนของแรงดันออฟเซตตามอุณหภูมิแวดล้อม จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองยังพบว่า กระแสรั่วที่เกิดจากประจุและแตรปที่ฝังตัวอยู่ในชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์และที่รอยต่อของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์และซิลิกอนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการขยับเลื่อนของแรงดันออฟเซตด้วย ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.1 ดังจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้โครงสร้างของการ์ดริงช่วยลดผลของกระแสรั่วจะทำให้การขยับเลื่อนของแรงดันออฟเซตลดน้อยลง ผลพวงอีกประการหนึ่งที่ได้จากการเพิ่มโครงสร้างการ์ดริงคือ เสถียรภาพของสัญญาณดีขึ้นดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3.3

กล่าวโดยสรุปได้ว่า การพัฒนาหรือปรับปรุงลักษณะสมบัติของทรานสดิวเซอร์ความดันจำเป็นต้องอาศัยความก้าวหน้าทางวิทยาการของอุปกรณ์และเทคนิคการสร้างที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม สำหรับทรานสดิวเซอร์ความดันซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบสร้าง ได้ถูกนำไปทดลองประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดในระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต ซึ่งได้นำเสนอผลการทดลองไว้ในภาคผนวก (ง) จึงเป็นสิ่งซึ่งแสดงว่า ทฤษฎีการออกแบบ และลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง การทดลอง และการวิเคราะห์ซึ่งได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถนำไปใช้สำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนา เป็นผลผลิตในทางอุตสาหกรรมได้

กิตติกรรมประกาศ

การที่ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จเป็นฉบับสมบูรณ์นั้น ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ผู้ซึ่ง ได้ให้แนวความคิด คำแนะนำ ข้อปฏิบัติ ตลอดจนวิธีการแก้ปัญหา ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณ อาจารย์สมชัย วงษ์เมตตา ผู้มีส่วนริเริ่มงานวิจัย และ การตระเตรียมวัสดุและเอกสารสำหรับการวิจัย ขอขอบคุณ ผศ. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ผู้ให้ความช่วยเหลือในการค้นคว้าและจัดหาข้อมูลประกอบการวิจัย ขอขอบคุณ รศ. ดร. สมเกียรติ ศุภเดช ผู้ได้ให้คำปรึกษา วางแนวทาง และชี้แนะให้งานวิจัยบรรลุเป้าหมาย ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย วรชีวิน จากบริษัทอินเนติกส์ ประเทศไทย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการถ่ายภาพด้านตัดขวางของแผ่นไดอะแฟรม และขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกสิ่งทุกอย่าง

สุดท้าย ขอกราบขอบคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้ให้การสนับสนุนทางด้านการเรียนมาโดยตลอด

ธัญญะ ศักดิ์โสภิษฐ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Warren P. Mason, Physical acoustics principles and methods, volume I-part B. Bell Telephone Laboratories, Incorporated, Murray Hill, New Jersey: Academic Press, 1964.
- [2] A.L.Window and G.S.Holister, Strain gauge technology. London: Applied Science Publishers Ltd., 1982.
- [3] C.S.Smith, "Piezoresistance effect in germanium and silicon," Phys.Rev., vol.94, pp. 42-49, 1954.
- [4] ชาญชัย ศักดิ์โสภณัฐ, สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, สมชัย วงษ์เมตตา และ สมเกียรติ ศุภเดช, " การออกแบบและสร้างตัวรับรูแรงดันชนิดสารกึ่งตัวนำ," วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 9, หน้า 1-22-1 - 1-22-19, ธันวาคม 2529.
- [5] สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, ชาญชัย ศักดิ์โสภณัฐ และ สมเกียรติ ศุภเดช, " การวิเคราะห์โครงสร้างและผลกระทบของอุณหภูมิของตัวรับรูแรงดันชนิดสารกึ่งตัวนำ, " วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 10; หน้า 1-160 - 1-170, พฤศจิกายน 2530.
- [6] สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, ชาญชัย ศักดิ์โสภณัฐ และ สมเกียรติ ศุภเดช, "ทรานสดิวเซอร์ความดันที่มีผลของการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิต่ำ," วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 11, หน้า 5-25-1 - 5-25-12, ธันวาคม 2531.
- [7] John Allison, Electronic engineering semiconductors and devices. Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1990.
- [8] ไพรัช รัชชพงษ์ และ สมเกียรติ ศุภเดช , อิเลคทรอนิคส์สารกึ่งตัวนำ. คณะวิศวกรรมศาสตร์: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- [9] S. Middelhoek and S.A. Audet., Silicon sensors. London : Academic Press, 1989.
- [10] Samuan, K.D.Wise, and J.B.Angell," An IC piezoresistive pressure sensor for biomedical instrumentation," IEEE Trans.Bio-Med.Eng., vol.BME-20, pp. 101-109, Mar 1973.

- [11] W.G.Pfann and R.N.Thurston, " Semiconducting stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistance effects," J.Appl.Phys., vol.32, no.10, October 1963.
- [12] O.N.Tufte, P.W.Chapman, and Donald Long, "Silicon diffused-element piezoresistive diaphragm," J.Appl.Phys., vol.33, no.11, Nov.1962.
- [13] Sea-Chung Kim and Kensall D.Wise, " Temperature sensitivity in silicon piezoresistive pressure transducers," IEEE Trans.Electron Devices, vol.ED-30, no.7, July 1983.
- [14] Samuel K.Clark and Kensall D.Wise, " Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors," IEEE Trans.Electron Devices, vol.ED-26, no.12, December 1979.
- [15] O.N.Tufte and E.L.Stelzer, " Piezoresistive properties of diffused layers," J.Appl.Phys., vol.34, no.2, Feb. 1963.
- [16] S.M.Sze, Semiconductor Devices Physics and Technology. Singapore: John Wiley & Sons, 1985.
- [17] Charles Kittel, Introduction to solid state physics. New Delhi: Wiley Eastern Private Limited, 1974.
- [18] Ernest Bassous , " Fabrication of novel three - dimensional microstructures by the anisotropic etching of (100) and (111) silicon, " IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED - 25, No. 10, October 1978.
- [19] Kenneth E.Bean, " Anisotropic etching of silicon, " IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-25, No.10, October 1978.
- [20] T.N.Jackson, M.A.Tischler, and K.D.Wise, " An electrochemical P-N junction etch-stop for the formation of silicon microstructure, " IEEE Electron Devices Letters, vol.EDL-2, No.2, February 1981.
- [21] C.C. Perry and H.R Lissner, The strain gage premier. McGraw Hill Book Company, 1962.
- [22] เทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์โซลิดสเตท. ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- [23] Peter E. Gise and Richard Blanchard, *Semiconductor and integrated circuit fabrication techniques*. Fairchild Corporation Virginia: Reston Publishing Company, Inc., 1979.
- [24] Helmut F. Wolf, *Semiconductors*. Signetics Corporation Sunnyvale, California: Wiley-Interscience, 1971.
- [25] ทัศนัย ศักดิ์โสภณ, สมศักดิ์ เขียวศิริกุล และ สมเกียรติ สุขเดช, " การพัฒนาทรานซิสเตอร์ความดันแบบเบี่ยงใช้วิธีสปีเพื่อประยุกต์ใช้งานทางด้านทางการแพทย์ , " วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 12, หน้า 573 - 581, พฤศจิกายน 2532.



สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1	แสดง โครงสร้างทั่วไปของชิพทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเป็ยโซโรซิลทิป (ก) ภาพด้านบน (top view) (ข) ภาพตัดขวาง (cross section)	1
รูปที่ 1.2	แสดงการก่อรูปของแถบพลังงานของธาตุของแข็งที่ตำแหน่งระยะห่าง ระหว่างอะตอมต่างๆ กัน	2
รูปที่ 1.3	แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอนในทิศทาง [100]	3
รูปที่ 1.4	แสดงผิวพลังงานคงที่เอลลิปซอยด์ (constant - energy ellipsoids) ในสเปซ k ในแถบความนำของซิลิกอน	4
รูปที่ 1.5	ภายใต้แรงอัดในทิศทาง [100] แวลลีย์ในทิศทาง [100] ถูกทำให้ ต่ำลง และในทิศทาง [010] และ [001] แวลลีย์ถูกยกขึ้น อิเล็ก ตรอนจะไหลจากแวลลีย์ [001] และ [010] ไปยังแวลลีย์ [100]	6
รูปที่ 1.6	แสดงตัวต้านทาน R ซึ่ง เป็นชั้นสารเจืออยู่ภายใต้ความเค้นขนาน σ_{\parallel} และความเค้นตั้งฉาก σ_{\perp}	7
รูปที่ 1.7	แสดงตัวต้านทานในแนวสัมผัส R_{\parallel} และตัวต้านทานในแนวรัศมี R_{\perp} บน ไดอะแฟรมสี่เหลี่ยมจัตุรัส อยู่ภายใต้ความเค้น σ_{\parallel} และความเค้น σ_{\perp}	8
รูปที่ 1.8	แสดงค่าสัมประสิทธิ์เป็ยโซโรซิลทิปขนาน π_{\parallel} และตั้งฉาก π_{\perp} สำหรับ ผลึกฐานรองซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) ที่อุณหภูมิห้อง	10
รูปที่ 1.9	แสดงการกระจายของความเค้นไดเมนชันเลสใน 1 ควอเทรนของ ไดอะแฟรมซึ่งมีขอบในตัว	12
รูปที่ 1.10	แสดงวงจรวีทส์โดนบริดจ์ของตัวต้านทาน	13
รูปที่ 1.11	แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานซึ่งต่อเป็นวงจร บริดจ์บน ไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดัน	14
รูปที่ 1.12	การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์เป็ยโซโรซิลทิป π_{44} กับความหนาแน่น อะตอมสารเจือ	16
รูปที่ 1.13	การแปรค่าสัมประสิทธิ์ π_{44} ในชั้นพีกับอุณหภูมิ ที่ความหนาแน่นอะ ตอมสารเจือค่าต่างๆ	16

รูปที่ 1.15	แสดงประเภทของอินเตอร์เฟซแทรปและออกไซด์ชาร์จ	18
รูปที่ 1.16	แสดงส่วนของการ์ดริง (ก) แสดงภาพด้านบน (top view) (ข) แสดงภาพตัดขวาง (cross section)	20
รูปที่ 1.17	แสดง โครงสร้างผลึกของผลึกซิลิกอน	21
รูปที่ 1.18	แสดงตำแหน่งและการวางตัวและทิศทางของระนาบ (100) (110) และ (111) ในผลึกซิลิกอน	22
รูปที่ 1.19	แสดงหลุมที่เกิดจากการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกบนผิวของแผ่นผลึก ซิลิกอนระนาบ (100) ที่แตกต่างกัน 3 แบบคือ (ก) ไม่เป็นรูปทรง (ข) รูปวงกลม และ (ค) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผังของหลุมที่เกิดจาก การกัด เป็นระนาบ (111) ที่ลู่อื่นเข้าหากันเป็นรูปตัววี	22
รูปที่ 1.20	แสดงเซตของระนาบ (111) ที่สมมูลกันจำนวน 4 ระนาบ บนแผ่น ผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ซึ่งตัดกันที่ผิวไปตามทิศทาง (110)	23
รูปที่ 1.21	แสดงภาพตัดขวางของหลุมรูปตัววี	24
รูปที่ 1.22	แสดงภาพตัดขวางของหลุมรูปตัวยู	24
รูปที่ 1.23	แสดงการใช้เทคนิค boron etch-stop ควบคุมความหนาของ ไดอะแพรม ในการกัดซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิก	25
รูปที่ 1.24	แสดงการใช้เทคนิค v-groove ควบคุมความหนาของไดอะแพรม ใน การกัดซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิก	26
รูปที่ 1.25	แสดงการจัดชุดทดลองกัดซิลิกอนด้วยเทคนิคการกัดด้วยไฟฟ้าใน สารละลาย PED ด้วยเทคนิคแบบหยุดการกัดที่รอยต่อพี-เอ็น	27
รูปที่ 1.26	แสดงส่วนของไดอะแพรมบางของทรานซิสเตอร์ความดัน ซึ่งได้จาก การกัดด้วยเทคนิคแบบหยุดการกัดที่รอยต่อพี-เอ็น	27
รูปที่ 2.1	แสดงภาพรายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแพรมของ ทรานซิสเตอร์ความดันบนฐานรองซิลิกอนระนาบ (100)	29
รูปที่ 2.2	แสดงรูปร่างของตัวต้านทานบน ไดอะแพรม (ก) ตัวต้านทานในแนวสัมผัส (ข) ตัวต้านทานในแนวรัศมี	30
รูปที่ 2.3	แสดงรายละเอียดของการ์ดริง	31
รูปที่ 2.4	(ก) แสดงต้นแบบที่สมบูรณ์ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ	

รูปที่ 2.4	(ข) แสดงต้นแบบที่สมบูรณ์ของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเบี่ยงไซริชสีที่แบบ ไม่มีคาร์ดริง	33
รูปที่ 2.5	แสดงต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบกระตาศภาพ	34
รูปที่ 2.6	(ก) แสดงต้นแบบมาส์กที่ 1	35
รูปที่ 2.6	(ข) แสดงต้นแบบมาส์กที่ 2	35
รูปที่ 2.6	(ค) แสดงต้นแบบมาส์กที่ 3	36
รูปที่ 2.6	(ง) แสดงต้นแบบมาส์กที่ 4	36
รูปที่ 2.6	(จ) แสดงต้นแบบมาส์กที่ 5	37
รูปที่ 2.7	แสดงภาพถ่ายของต้นแบบที่ได้จากการตัดลวดลายบนแผ่นไมลาร์ซีที	38
รูปที่ 2.8	แสดงภาพถ่ายของกระจกต้นแบบซึ่งใช้เป็น โฟโตมาส์ก ในกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก	38
รูปที่ 2.9	ภาพตัดขวางแสดงขั้นตอนในการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบไดอะแฟรมบางด้วยเนื้อสารซิลิกอน	41
รูปที่ 2.10	ภาพแสดงแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันเรียบร้อยแล้ว	51
รูปที่ 2.11	แสดงภาพถ่ายชิพทรานสดิวเซอร์ความดันซึ่งติดอยู่บนฐานรองกระป๋องโลหะแบบ TO-5 พร้อมด้วยสายลวดตัวนำจากขั้วไฟฟ้าบนชิปไปยังขาของฐานรอง	53
รูปที่ 2.12	ภาพตัดขวางแสดงการเก็บบรรจุทรานสดิวเซอร์ความดันด้วยตัวถังแบบ TO-5 (can case)	54
รูปที่ 2.13	ภาพถ่ายแสดงตัวทรานสดิวเซอร์ความดันซึ่งเก็บบรรจุในตัวถังแบบ TO-5	54
รูปที่ 3.1	แสดงการเปิดช่องออกไซด์สำหรับการกัดไดอะแฟรมด้วยเทคนิค v-groove	55
รูปที่ 3.2	ภาพถ่ายแสดงผิวไดอะแฟรมที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค v-groove	56
รูปที่ 3.3	ภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดของแผ่นผลึกที่จะนำไปกัดด้วยไฟฟ้า	57
รูปที่ 3.4	ภาพถ่ายแสดงแผ่นผลึกด้านหน้าซึ่งผ่านขั้นตอนการเปิดช่องออกไซด์ด้านหลัง และสร้างขั้วไฟฟ้าด้านหน้า พร้อมทั้งจะนำเข้าสู่กระบวนการกัด	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 57

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5	แผนผังแสดงการกัดแผ่นผลึกฐานรองซิลิกอนด้วยไฟฟ้า	58
รูปที่ 3.6	ภาพถ่ายแสดงการทดลองกัดซิลิกอนด้วยไฟฟ้า เนื่องจากสารละลาย PED ทำปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย ดังนั้นในขณะทำการทดลอง จะต้องควบคุมไม่ให้สารละลายสัมผัสกับอากาศ และควบคุมให้ความเข้มข้นของสารละลายคงที่ ด้วยการใช้ condensing tube ช่วยในการกลั่นตัวของสารละลาย	59
รูปที่ 3.7	แสดงภาพถ่ายไดอะแฟรมที่ได้เมื่อกระบวนการกัดสิ้นสุดลง	59
รูปที่ 3.8	ภาพถ่ายแสดงพื้นผิวของแผ่น ไดอะแฟรมที่ได้จากการกัดแผ่นผลึกซิลิกอน อิทธิพลเชิงลชนิต n/p ด้วยไฟฟ้า	60
รูปที่ 3.9	ภาพถ่ายแสดงพื้นผิวของแผ่น ไดอะแฟรมที่ได้จากการกัดแผ่นผลึกซิลิกอน อิทธิพลเชิงลชนิต n/n^+ ด้วยไฟฟ้า	60
รูปที่ 3.10	ภาพถ่ายด้านตัดขวางของแผ่น ไดอะแฟรม แสดงให้เห็นแผ่น ไดอะแฟรม ทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิกอนอิทธิพลเชิงลชนิต n/n^+ จะเห็นแผ่น ไดอะแฟรมมีความสม่ำเสมอ	61
รูปที่ 3.11	ภาพถ่ายแสดงด้านตัดขวางของแผ่น ไดอะแฟรมจากเครื่องสแกนนิ่ง อิเล็กตรอนวัดความหนาของแผ่น ไดอะแฟรมได้ 14 ไมครอน	61
รูปที่ 3.12	แสดงอุปกรณ์และวิธีวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน	63
รูปที่ 3.13	แสดงวงจรควอเตอร์บริดจ์ (quarter bridge) สำหรับใช้ทดสอบ วัดค่าความไวของตัวต้านทานบน ไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเบี่ยงโซวีชีสทีป	65
รูปที่ 3.14	(ก) แสดงกราฟผลการทดลองวัดความไวของตัวต้านทานในแนวรัศมี R1 และ R3 ซึ่งวางตัวอยู่บน ไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดัน	66
รูปที่ 3.14	(ข) แสดงกราฟผลการทดลองวัดความไวของตัวต้านทานในแนวสัมผัส R2 และ R4 ซึ่งวางตัวอยู่บน ไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดัน	67
รูปที่ 3.15	แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวต้านทานทั้งสี่ตัว ซึ่งวางตัวอยู่บน ไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดัน	68
รูปที่ 3.16	แสดงกราฟผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของทรานสดิวเซอร์ความดันกับความดันที่กระทำจากภายนอก เมื่อใช้ วงจรแบบฟูลบริดจ์และไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว	72

- รูปที่ 3.17 แสดงกราฟผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันกับความดันที่กระทำจากภายนอก เมื่อจัดวงจรแบบฟลูบริดจ์และไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว 73
- รูปที่ 3.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันออฟเซตกับอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ความดันแบบไม่มีคาร์ดริงล้อมรอบตัวต้านทาน เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว 76
- รูปที่ 3.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันออฟเซตกับอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ความดันแบบไม่มีคาร์ดริงล้อมรอบตัวต้านทาน เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว 77
- รูปที่ 3.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันออฟเซตกับอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ความดันแบบมีคาร์ดริงล้อมรอบตัวต้านทาน เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว 78
- รูปที่ 3.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันออฟเซตกับอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ความดันแบบมีคาร์ดริงล้อมรอบตัวต้านทาน เมื่อทดลองด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว 79
- รูปที่ 3.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ความดัน ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 55 เซลเซียส 81
- รูปที่ 3.23 แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของบริดจ์ เปรียบเทียบระหว่างทรานซิสเตอร์ความดันแบบไม่มีคาร์ดริงในรูป (ก) และ แบบมีคาร์ดริงในรูป (ข) ที่ความดัน 0 มม.ปรอท อุณหภูมิ 46 เซลเซียส แรงดันไบแอส 8 โวลต์ 83
- รูปที่ 3.24 แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของบริดจ์ เปรียบเทียบระหว่างทรานซิสเตอร์ความดันแบบไม่มีคาร์ดริงในรูป (ก) และ แบบมีคาร์ดริงในรูป (ข) ที่ความดัน 0 มม.ปรอท อุณหภูมิ 70 เซลเซียส แรงดันไบแอส 8 โวลต์ 84
- รูปที่ 3.25 แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของบริดจ์ เปรียบเทียบระหว่างทรานซิสเตอร์ความดันแบบไม่มีคาร์ดริงในรูป (ก) และ แบบมีคาร์ดริงในรูป (ข) ที่ความดัน 0 มม.ปรอท อุณหภูมิ 70 เซลเซียส แรงดันไบแอส 5 โวลต์ 85

รูปที่ ก-1	แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิกอน ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนแห้ง ในกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	103
รูปที่ ก-2	แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิกอน ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ ในกระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น	104
รูปที่ ก-3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือปนของกระบวนการแพร่ที่เวลาและอุณหภูมิค่าต่างๆ	105
รูปที่ ก-4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือปนของกระบวนการแพร่ที่เวลาและอุณหภูมิค่าต่างๆ	105
รูปที่ ข-1	แสดงค่า solid solubility ของสารเจือปนชนิดต่างๆ ในซิลิกอน	111
รูปที่ ข-2	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion - coefficient) และอุณหภูมิของสารเจือปนชนิดต่างๆ ในซิลิกอน	112
รูปที่ ข-3	แสดงการกระจายของอะตอมสารเจือปนในซิลิกอน หลังจากการทำ predeposition	115
รูปที่ ข-4	แสดงการกระจายของอะตอมสารเจือปนในซิลิกอนหลังจากการ drive-in	117
รูปที่ ง-1	แสดงโครงสร้างภาพตัดขวางของทรานซิสเตอร์ความดันที่ถูกรับบรรจุเป็นอุปกรณ์หัตถ์ เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต	119
รูปที่ ง-2	ภาพถ่ายแสดงหัววัดที่ได้รับการเก็บบรรจุอย่างสมบูรณ์ พร้อมด้วยสายนำสัญญาณและขั้วต่อแบบ DIN	120
รูปที่ ง-3	แสดงแผนผังอุปกรณ์และวิธีการทดสอบหัววัดกับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต	121
รูปที่ ง-4	ภาพถ่ายแสดงการต่อหัววัดเข้ากับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต	121
รูปที่ ง-5	กราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหัววัด จากการทดสอบกับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต	122

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	ค่าสัมประสิทธิ์เป็ยโซริชิสทีปที่อุณหภูมิห้องสำหรับซิลิกอนชนิดเอ็มและพี	9
ตารางที่ 3.1	แสดงผลการทดลองวัดค่าความไวของตัวต้านทาน R1 R2 R3 และ R4	65
ตารางที่ 3.2	(ก) แสดงผลการทดลองวัดค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันเมื่อไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัว ที่ค่าความดัน 300 มม.ปรอท	70
ตารางที่ 3.2	(ข) แสดงผลการทดลองวัดค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันเมื่อไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว ที่ค่าความดัน 300 มม.ปรอท	71
ตารางที่ 3.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันออฟเซตกับอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ความดันแบบมีเก้รตริงและแบบไม่มีเก้รตริง เมื่อไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันคงตัวและแหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงตัว	75
ตาราง ก-1	แสดงสีของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ กัน	106
ตาราง ข-1	แสดงปริมาณต่างๆ ที่ได้หลังจากการทำ predeposition	113
ตาราง ข-2	แสดงปริมาณต่างๆ ที่ได้หลังจากการทำ drive-in	116

สัญลักษณ์ (list of symbols)

สัญลักษณ์	ปริมาณ	ชื่อของหน่วย
a	ค่าคงตัวแลททีส์	อังสตรอม (Å)
C_s	solid solubility	อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
d	ความหนาของ ไดอะแฟรม	ไมครอน
D	สัมประสิทธิ์การแพร่	เซนติเมตรกำลังสองต่อวินาที
E	พลังงานจลน์	อิเล็กตรอน โวลต์
E_{eff}	แถบพลังงานต้องห้าม	อิเล็กตรอน โวลต์
h	ค่าคงตัวของพลังค์	จูล-วินาที
k	เวฟนัมเบอร์	1 ต่อเมตร
l	ขนาดของ ไดอะแฟรม	ไมครอน
m^*	มวลยังผล	กิโลกรัม
m_l	มวลยังผลตามยาว	กิโลกรัม
m_t	มวลยังผลตามขวาง	กิโลกรัม
n	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ	1 ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
P	ความดัน	มม.ปรอท
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	คูลอมบ์
Q_f	ฟลักซ์ออกไซด์ชาร์จ	ประจุต่อตารางเซนติเมตร
Q_{it}	อินเตอร์เฟซแทรปชาร์จ	ประจุต่อตารางเซนติเมตร
Q_m	โมบิลิตีอนิกชาร์จ	ประจุต่อตารางเซนติเมตร
Q_{ot}	ออกไซด์แทรปชาร์จ	ประจุต่อตารางเซนติเมตร
R	ค่าความต้านทาน	โอห์ม (ohm)
R_r	ตัวต้านทานในแวนร์คีมี	โอห์ม
R_c	ตัวต้านทานในแวนล์มัส	โอห์ม
T	อุณหภูมิ	เซลเซียส
Vcc	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ปริมาณ	ชื่อของหน่วย
W_b	ความกว้างของพื้นหลุม	ไมครอน
W_o	ความกว้างของปากหลุม	ไมครอน
x_j	ความลึกของรอยต่อ	ไมครอน
β	ผลรวมของแรงดันออฟเซตซึ่งเกิดจาก มิลลิเมตรของตัวต้านทาน	มิลลิโวลต์
μ	โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอน	เซนติเมตรกำลังสองต่อ โวลต์-วินาที
$\mu_{ }$	ค่า โมบิลิตี้ตามแกนยาวของ เอลลิพซอยด์	เซนติเมตรกำลังสองต่อ โวลต์-วินาที
μ_{\perp}	ค่า โมบิลิตี้ตามแกนสั้นของ เอลลิพซอยด์	เซนติเมตรกำลังสองต่อ โวลต์-วินาที
$\pi_{ }$	สัมประสิทธิ์ เปีย โซริซีสที่ปตามยาว	เซนติเมตรกำลังสองต่ออาเยน
π_{\perp}	สัมประสิทธิ์ เปีย โซริซีสที่ปตามขวาง	เซนติเมตรกำลังสองต่ออาเยน
$\pi_{11}, \pi_{12},$ π_{44}	สัมประสิทธิ์ เปีย โซริซีสที่ป	เซนติเมตรกำลังสองต่ออาเยน
σ	ความเค้น ไตเมนชันเลส	
σ_c	สภาพการนำไฟฟ้า	ซีเมนต์ (siemens)
σ_T	ความเค้นซึ่งเกิดจากความร้อน	นิวตันต่อตารางเมตร
$\sigma_{ }$	ความเค้นขนาน	นิวตันต่อตารางเมตร
σ_{\perp}	ความเค้นตั้งฉาก	นิวตันต่อตารางเมตร
τ	เวลาอิสระเฉลี่ย	วินาที
ΔR	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง	
$(\Delta R/R)$	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน	
$(\Delta R/R)_{\parallel}$	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ของตัวต้านทาน ในแนวรัศมี	
$(\Delta R/R)_{\perp}$	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ของตัวต้านทาน ในแนวสัมผัส	

การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (Oxide layer growth)

ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ถูกสร้างด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) [22],[23],[24] โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดังกล่าว ทำได้ 2 ลักษณะได้แก่

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation):

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 1100 °c ดังแสดงด้วยสมการเคมี



2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation):

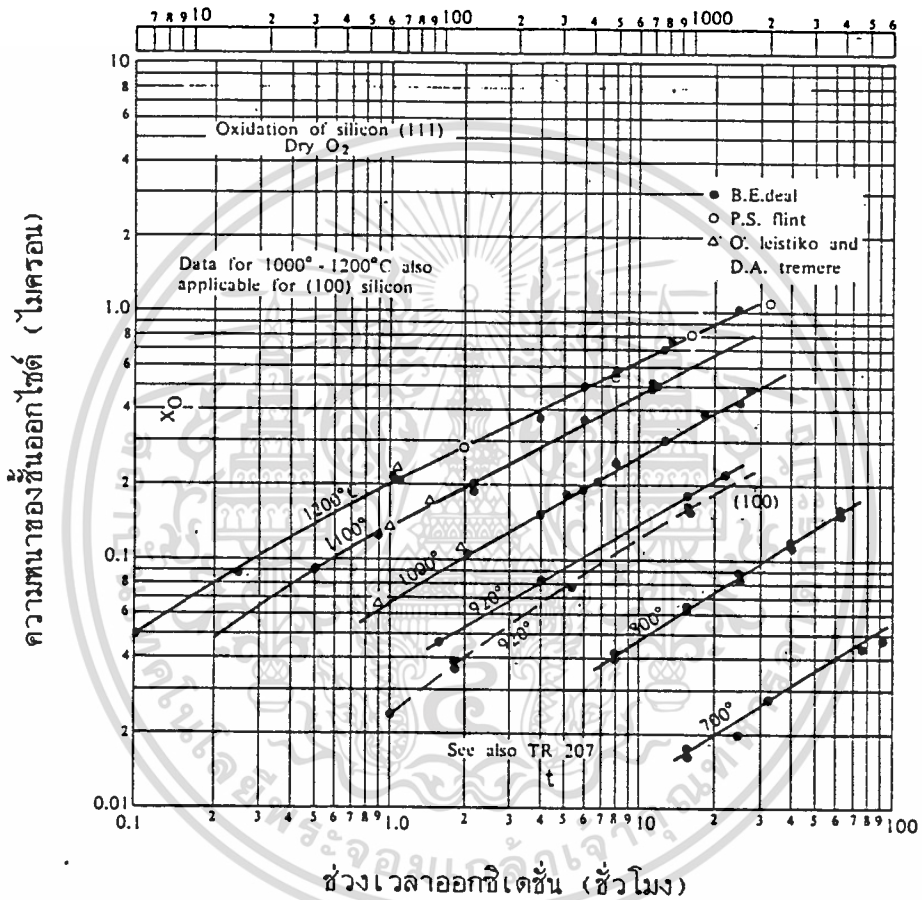
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิประมาณ 1100 °c ดังแสดงด้วยสมการเคมี



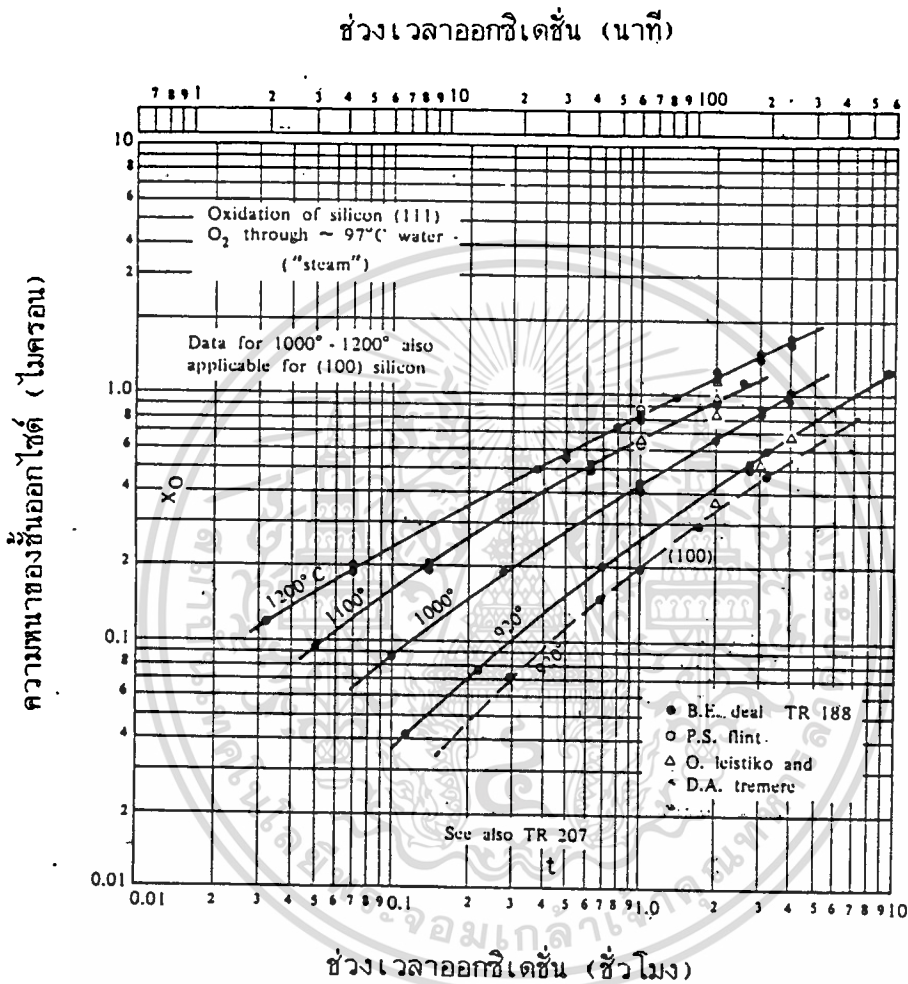
ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะขึ้นกับอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราการไหลของออกซิเจน กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้นจะทำให้เกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ให้ได้ความหนาค่าหนึ่ง จะคำนวณได้จากกราฟในรูปที่ ก-1 และ ก-2 ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะให้สีซึ่งสังเกตได้จากการสะท้อนแสงฟลูออเรสเซนซ์ตรงๆ ดังแสดงในตารางที่ ก-1 ซึ่งเป็นตารางที่ใช้ในการเทียบสีความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นฉนวนที่ต้านทานการแพร่ของอะตอมสารเจือในกระบวนการแพร่สารเจือ ความสามารถในการต้านทานจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิและเวลาค่าต่างๆ จะคำนวณได้จากกราฟซึ่งแสดงในรูปที่ ก-3 และ ก-4

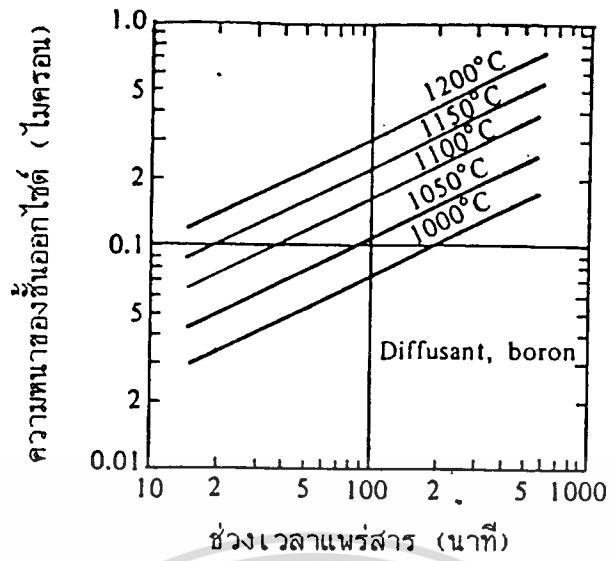
ช่วงเวลาออกซิเดชัน (นาที)



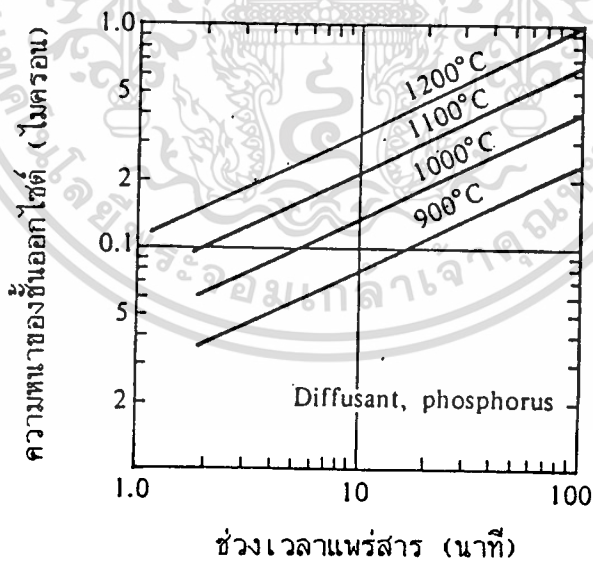
รูปที่ ก-1 แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิกอนในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนแห้ง ในกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง



รูปที่ ก-2 แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิกอนในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำในกระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น



รูปที่ ก-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือโบรอน ภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการแพร่ที่เวลาและอุณหภูมิค่าต่างๆ



รูปที่ ก-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการแพร่ที่เวลาและอุณหภูมิค่าต่างๆ

ตาราง ก-1 แสดงสีของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ กัน [21]

ความหนา (อังสตรอม)	สี
500	สีน้ำตาลอ่อน
700	สีน้ำตาล
1000	สีม่วงเข้มถึงสีแดงม่วง
1200	สีฟ้า
1500	สีน้ำเงินอ่อนถึงสีเทาน้ำเงิน
1700	สีน้ำเงินถึงสีเหลือง-เขียวอ่อน
2000	สีทองถึงสีเหลือง
2200	สีทองค่อนข้างเหลืองแกมส้ม
2500	สีส้มถึงสีเขียวอ่อน
2700	สีแดงม่วง
3000	สีน้ำเงินถึงสีม่วง-น้ำเงิน
3100	สีน้ำเงิน
3200	สีน้ำเงินถึงสีน้ำเงิน-เขียว
3400	สีเขียวอ่อน
3500	สีเขียวถึงสีเหลือง-เขียว
3600	สีเหลือง-เขียว
3700	สีเขียว-เหลือง
3900	สีเหลือง
4100	สีส้มอ่อน
4200	สีชมพูอ่อน
4400	สีม่วง-แดง
4600	สีแดง-ม่วง
4700	สีม่วง
4800	สีน้ำเงิน-ม่วง

ความหนา (อังสโตม)	ชื่อ
4900	สีน้ำเงิน
5000	สีน้ำเงิน-เขียว
5200	สีเขียว
5400	สีเหลือง-เขียว
5600	สีเขียว-เหลือง
5700	สีเหลืองถึงสีเทาอ่อน
5800	สีส้มอ่อนหรือเหลืองถึงสีชมพู
6000	สีชมพูอ่อน
6300	สีม่วงแดง
6800	สีคล้ายเทา
7200	สีน้ำเงินเขียวถึงสีเขียว
7700	สีเหลืองอ่อน
8000	สีส้ม
8200	สีชมพู
8500	สีแดงม่วงอ่อน
8600	สีม่วง
8700	สีน้ำเงินม่วง
8900	สีน้ำเงิน
9200	สีน้ำเงินเขียว
9500	สีเหลืองเขียว
9700	สีเหลืองถึงเหลืองอ่อน
9900	สีส้ม
10000	สีชมพูอ่อน
10200	สีม่วงแดง
10500	สีแดงม่วง
10600	สีม่วง

ความหนา (อังสโตม)	ขม
10700	สีน้ำเงินม่วง
11000	สีเขียว



ภาคผนวก ข

กระบวนการแพร่สารเจือโบราณและฟอสฟอรัส

กระบวนการแพร่สารเจือแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ การทำ predeposition และการ drive-in [22],[23],[24]

การทำ predeposition เป็นการแพร่สารโดยไม่จำกัดปริมาณสารเจือ ปริมาณของสารเจือที่แพร่ซึมเข้าไปในโครงสร้างผลึกจะถูกกำหนดด้วยค่า solid solubility ค่า solid solubility ของสารเจือในซิลิกอนที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง คือปริมาณสารเจือที่จะแพร่ออกมาได้มากที่สุด กราฟในรูปที่ ข-1 แสดงค่า solid solubility ของสารเจือชนิดต่างๆ ในซิลิกอน

การ drive-in เป็นขั้นตอนการแพร่สารเจือแบบจำกัดปริมาณสารเจือ การ drive-in มักเกิดขึ้นพร้อมกับการทำออกซิไดซ์ชั้น ทั้งนี้เพื่อสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ชั้นปกคลุมและป้องกันการแพร่ของสารเจือออกมาจากแผ่นผลึก ในระหว่างการ drive-in ระยะเวลา อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซจะเป็นตัวแปรซึ่งถูกควบคุมเพื่อที่จะให้ได้ค่าความลึกของรอยต่อ (junction depth, x_j) ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ และ profile ของสารเจือ ตามต้องการ

คณิตศาสตร์ของการแพร่

การทำ predeposition

ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ (concentration) ที่ผิวของแผ่นผลึก C_s จะขึ้นกับค่า solid solubility ของสารเจือที่ค่าอุณหภูมิของการทำ predeposition profile ของอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นผลึกในระหว่างการทำ predeposition จะหาได้จากสมการ

$$C_{(x)} = C_s \operatorname{erfc} [x/\operatorname{sqr}(4Dt_1)] \quad (1)$$

โดยที่ C_s = ค่า solid solubility ของสารเจือในซิลิกอนที่ค่าอุณหภูมิของการทำ predeposition

$C_{(x)}$ = ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ความลึก x ลงไปในแผ่นผลึก

x = ระยะทางจากผิวหน้าลึกลงไปในแผ่นผลึก

- D_1 = สัมประสิทธิ์ของการแพร่ (diffusion coefficient) ของสารเจือที่ค่า
อุณหภูมิของการทำ predeposition (แสดงในรูปที่ ๒-2)
- t_1 = ช่วงเวลาในการทำ predeposition

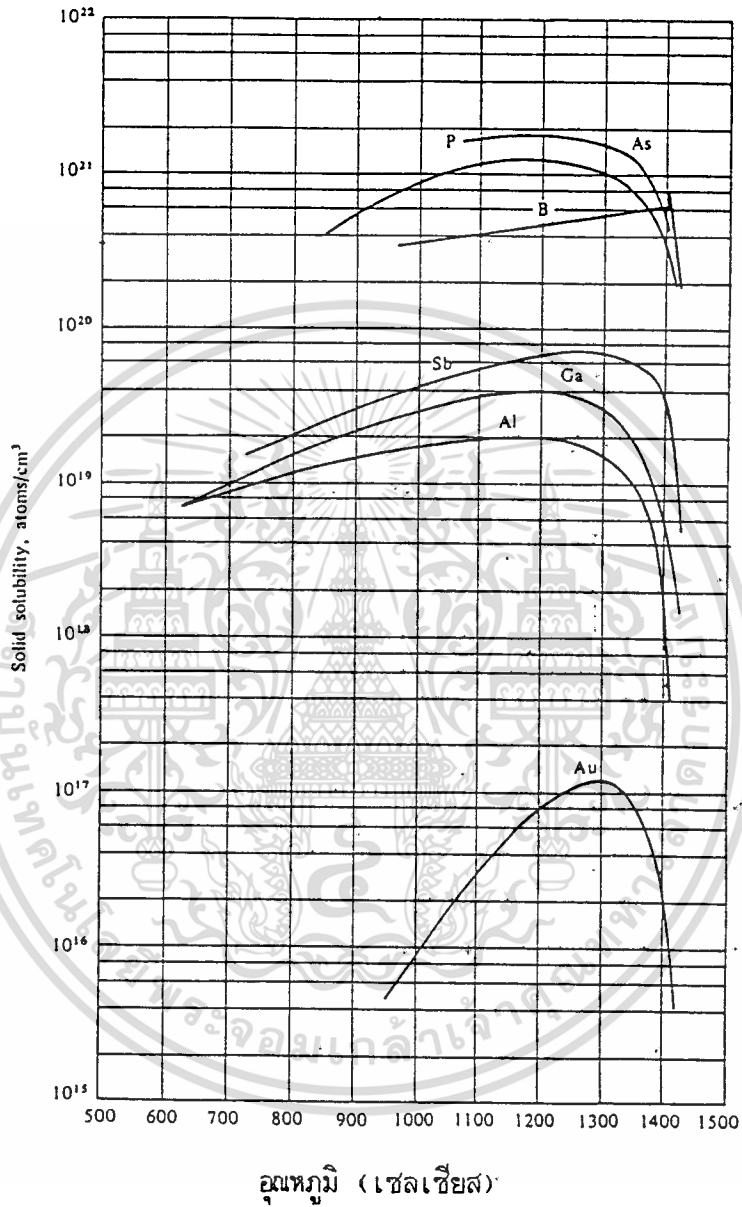
การ drive-in

การ drive-in เป็นขั้นตอนการกำหนด ความลึกของรอยต่อ และ profile ของอะตอมสารเจือ การ drive-in จะกระทำในเตาแพร่สารอุณหภูมิสูงในทันทีหลังจากการกัดสารเจือส่วนเกินซึ่งตกค้างบนแผ่นผลึกในการทำ predeposition ออก

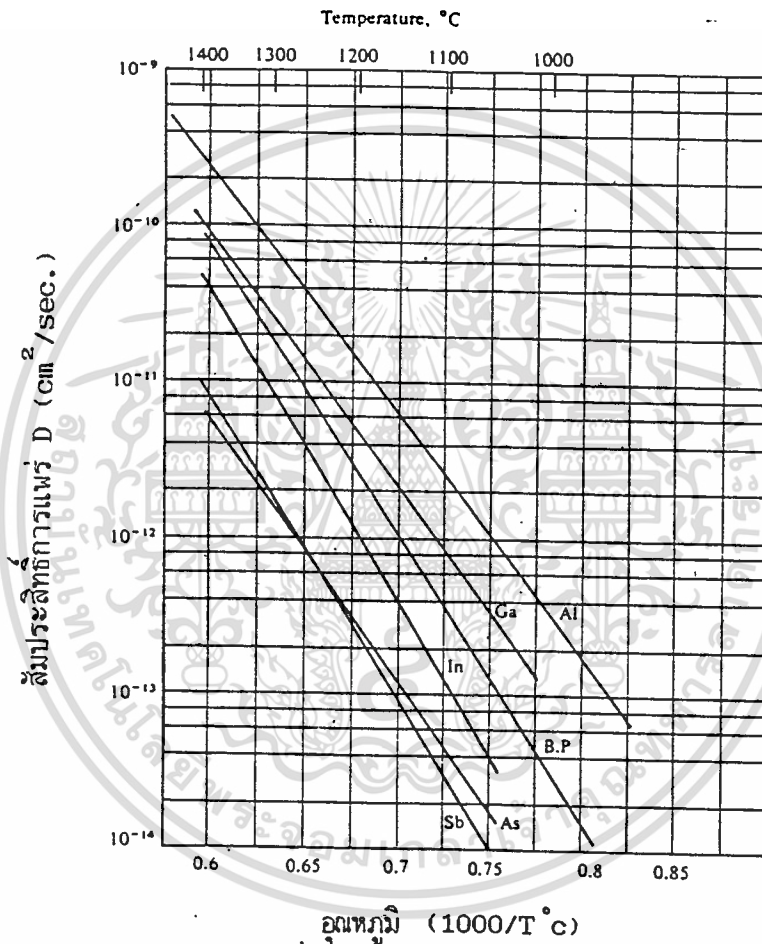
โดยประมาณว่า profile ของอะตอมสารเจือที่ได้จากการทำ predeposition เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีรูปร่างสูงและแคบ profile ของอะตอมสารเจือที่ได้หลังจากการ drive-in จะเขียนแสดงได้ดังสมการ

$$C_{(x)} = [Q/\text{sqr}(\pi D_2 t_2)] \exp -(x^2)/4D_2 t_2 \quad (2)$$

- โดยที่
- $C_{(x)}$ = ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ระยะ x ลึกลงไปจากผิวหน้าของแผ่นผลึก
- Q = จำนวนอะตอมสารเจือที่แพร่ลงไปในผลึกในช่วงการทำ predeposition
- D_2 = สัมประสิทธิ์ของการแพร่ของอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิของการ drive-in
- t_2 = ช่วงเวลาการทำ drive-in
- e = ค่าคงที่ = 2.71828
- x = ระยะความลึกลงไปในแผ่นผลึก



รูปที่ ๑-๒ แสดงค่า solid solubility ของสารเจือชนิดต่างๆ ในซิลิกอน



รูปที่ ข-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) และอุณหภูมิของสารเจือชนิดต่างๆ ในซิลิกอน

การคำนวณหาค่าตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการแพร่สารเจือ

ตัวอย่าง พิจารณาการทำ predeposition และ drive-in ดังต่อไปนี้

ก. predeposition ทำการ predeposition บนแผ่นผลึกซิลิกอนที่อุณหภูมิ 975°C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยการแพร่จากแหล่งจ่ายสารเจือฟอสฟอรัสแบบไม่จำกัดปริมาณสารเจือ

1. คำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเป็นฟังก์ชันกับความลึกของรอยต่อ โดยมีขั้นตอนดังนี้

ก) จากกราฟในรูปที่ ข-1 ได้ $C_{\infty} = 8 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$

ข) จากกราฟในรูปที่ ข-2 ได้ $D_1 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{sec.}$

ค) $t_1 = 30 \text{ นาที} = 1800 \text{ วินาที}$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \text{sqr}(4D_1 t_1) &= \text{sqr}[(4)(1.7 \times 10^{-14})(1800)] \\ &= \text{sqr}(1.22 \times 10^{-10} \text{ cm}^2) = 1.106 \times 10^{-5} \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\text{แต่ } 1.106 \times 10^{-5} = .1106 \mu \approx .11 \mu$$

$$\text{ดังนั้น } C_{(x)} = C_{\infty} \text{erfc}(x/.11\mu) = C_{\infty} \text{erfc}(z)$$

การหาค่า z และ $\text{erfc}(z)$ และ $C_{(x)}$ แสดงในตารางที่ ข-1 การกระจายของปริมาณสารเจือที่ได้จากการทำ predeposition แสดงในรูปที่ ข-3

ตารางที่ ข-1 แสดงปริมาณต่างๆ ที่ได้หลังจากการทำ predeposition

x	Z	$\text{erfc}(Z)$	$C(x)$
0	0	1	$8 \times 10^{20}/\text{cm}^3$
$.1\mu$.9042	.20	$1.6 \times 10^{20}/\text{cm}^3$
$.2\mu$	1.8083	.010	$8 \times 10^{18}/\text{cm}^3$
$.3\mu$	2.7125	1.23×10^{-4}	$9.8 \times 10^{16}/\text{cm}^3$
$.4\mu$	3.6166	3.1×10^{-7}	$2.48 \times 10^{14}/\text{cm}^3$
$.5\mu$	4.5208	1.6×10^{-10}	$1.28 \times 10^{11}/\text{cm}^3$

2. ความลึกของรอยต่อจะหาได้จากจุดที่มีการเปลี่ยนชนิดของสารเจือจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี ถ้าแผ่นผลึกที่ใช้ในการทำ predeposition เป็นชนิดพี มีพิกัดความต้านทาน $0.3 \Omega\text{-cm}$ ความลึกของรอยต่อจะหาได้จากรูปที่ ข-3 หรือจากการคำนวณซึ่งจะได้ผลลัพธ์ว่า สำหรับฐานรองชนิดพี มีพิกัดความต้านทาน $0.3 \Omega\text{-cm}$ จะมีค่า background concentration C_B เท่ากับ $10^{17} \text{ atom/cm}^3$ จากรูปที่ ข-3 ค่า C_B ซึ่งเท่ากับ $10^{17} \text{ atom/cm}^3$ จะให้ค่าความลึกของรอยต่อ x_j ประมาณ 0.3μ

$$C_B = C_s \operatorname{erfc}(x_j / \sqrt{4D_1 t_1})$$

โดยที่ $C_B = 10^{17} \text{ atom/cm}^3$

$$\operatorname{erfc}(x_j / .1106) = C_B / C_s = 10^{17} / 8 \times 10^{20}$$

$$= 1.25 \times 10^{-4}$$

$$x_j / .1106 = 2.71$$

ดังนั้น

$$x_j = (.1106)(2.71)$$

$$= 0.3 \mu$$

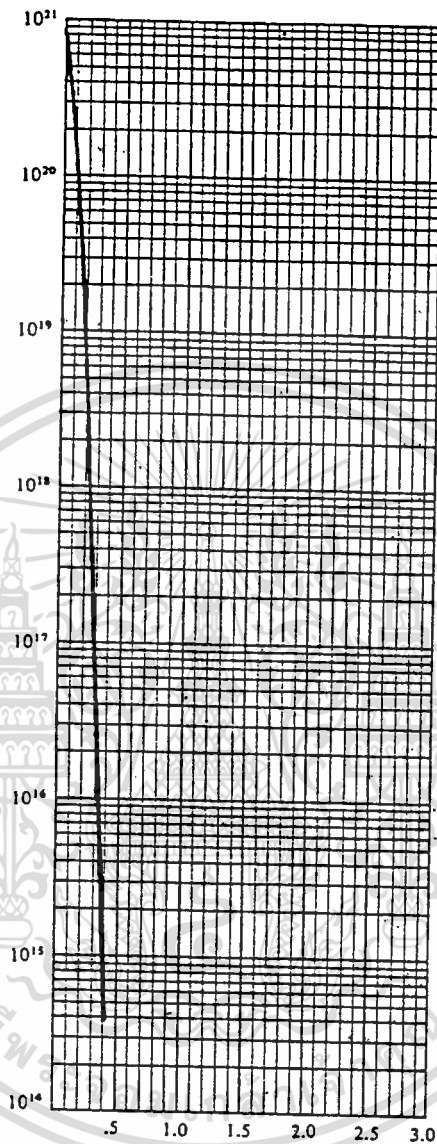
3. จำนวนอะตอมสารเจือทั้งหมดซึ่งแพร่เข้าไปในแผ่นผลึกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะหาได้จากสมการ

$$Q = C_s \sqrt{4D_1 t_1 / \pi}$$

$$= (8 \times 10^{20}) \sqrt{.1106 / \pi} \text{ atom/cm}^2$$

$$Q = 5 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^2$$

จำนวนอะตอมของสารเจือต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร



ระยะความลึกลงไปใ้ในแผ่นผลึก (ไมครอน)

รูปที่ ข-3 แสดงการกระจายของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในซิลิกอนหลังจากการทำ predeposition

ข. drive-in ใช้แผ่นผลึกดังกล่าว หากค่าความหนาแน่นของสารเจือเป็นฟังก์ชันกับความลึก ด้วยกระบวนการ drive-in ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 50 นาที

1. การหา profile ของสารเจือมีลำดับขั้นตอนดังนี้

ก) จากรูปที่ ข-2 ได้ $D_2 = 3.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{sec}$

ข) $t_2 = 50 \text{ นาที} = 3000 \text{ วินาที}$

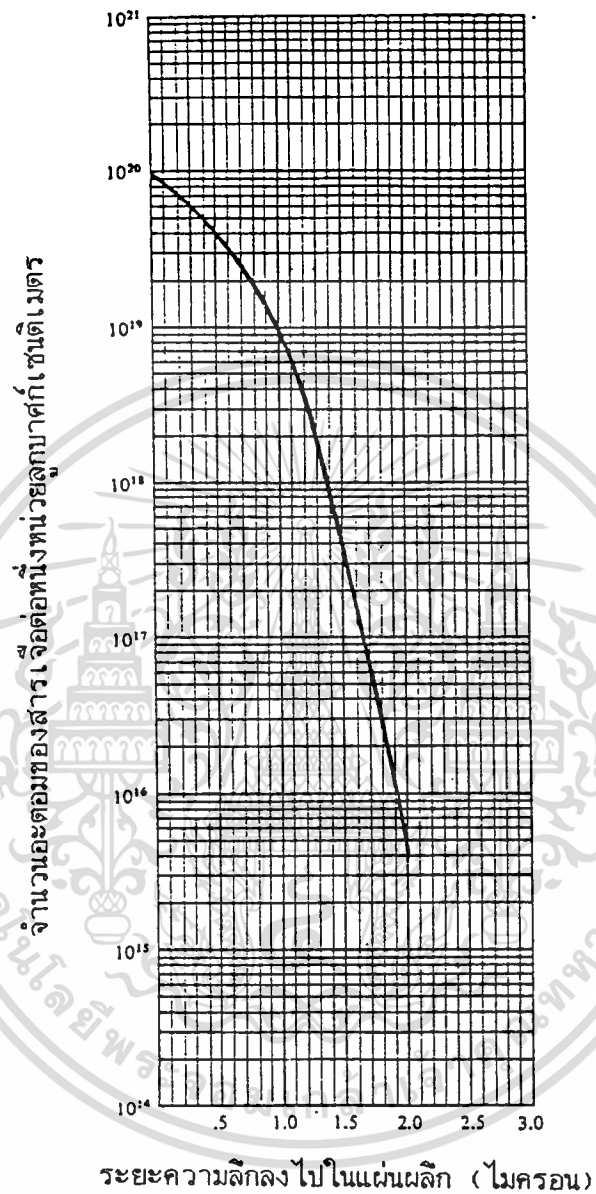
$$\begin{aligned} C(x) &= [Q/\text{sqr}(\pi D_2 t_2)] \exp(-x^2/4D_2 t_2) \\ &= [(5 \times 10^{15} / \text{cm}^2) / (5.58 \times 10^{-5} \text{ cm})] \exp(-x^2/4D_2 t_2) \\ C(x) &= (9 \times 10^{19} / \text{cm}^3) \exp(-x^2/4D_2 t_2) \end{aligned}$$

สมการนี้ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่า x ซึ่งจะได้คำตอบดังแสดงในตารางที่ ข-2 profile ของอะตอมสารเจือที่ได้จากการทำ drive-in แสดงในรูปที่ ข-4

2. ความลึกของรอยต่อของอะตอมสารเจือที่ได้หลังจากการทำ drive-in จะขึ้นกับค่าพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้น แต่สำหรับแผ่นผลึกชนิดนี้ มีพิกัดความต้านทาน $0.3 \Omega\text{-cm}$ จะได้ junction depth x_j ประมาณ 1.65μ ดังแสดงในรูปที่ ข-4

ตารางที่ ข-2 แสดงปริมาณต่างๆ ที่ได้หลังจากการทำ drive-in

$x(\mu)$	$x^2(\mu^2)$	$x^2/4D_2 t_2$	$e^{-(x^2)/(4D_2 t_2)}$	$C(x) (/ \text{cm}^3)$
0	0	0	1	9×10^{19}
.5	.25	.63	.53	4.77×10^{19}
1.0	1.0	2.5	.0821	7.34×10^{18}
1.5	2.25	5.63	3.54×10^{-3}	3.23×10^{17}
2.0	4.0	10	4.54×10^{-5}	4.05×10^{15}
2.5	6.25	15.6	1.6×10^{-7}	1.48×10^{13}
3.0	9.0	22.5	1.69×10^{-10}	1.52×10^{10}



รูปที่ ข-4 แสดงการกระจายของอะตอมสารเจือปนฟอสฟอรัสในซิลิกอนหลังจากการ drive-in

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงตัวกัด (etchant) บางชนิดซึ่งใช้ในการกัดแบบพลาแนร์ (planar) และแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) [19]

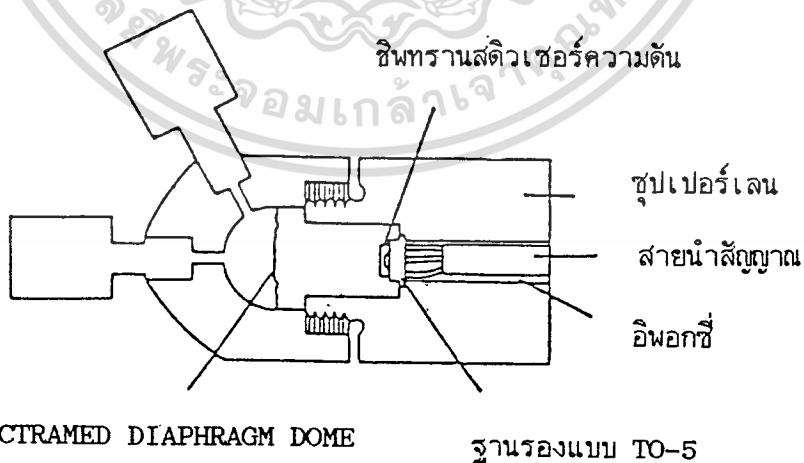
ETCHES	CHARACTERISTICS	COMPOSITION	RATE AND REMARKS
PLANAR ETCH	ETCH UNIFORMITY	HF - HNO ₃ - HAc ~8% ~75% ~17%	~5μ/MIN(111)
(100) ANISOTROPIC	ETCHES [100] ~100 X [111] DIRECTION	KOH - NORMAL PROPANAL H ₂ O	~1μ/MIN AT 80 °C IN (100) SILICON STOPS AT P ⁺⁺ INTERFACE
(110) ANISOTROPIC	ETCHES [110] 600 X [111] DIRECTION	KOH - H ₂ O	~.8μ/MIN AT 80 °C IN (110) SILICON
ETHYLENEDI- AMINE	ORIENTATION DE- PENDENT AND CONCENTRATION	ETHYLENEDI- AMINE - CATECHOL - H ₂ O (HYDRAZINE)	~1.1μ/MIN AT 100 °C IN [100] STOPS ETCHING AT P ⁺⁺ INTER- FACE. VERY SLOW ETCHING OF SiO ₂

ภาคผนวก ง

การประยุกต์ใช้งานทรานสดิวเซอร์ความดันกับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต
(cardiovascular system simulator) [25]

การเก็บบรรจุ

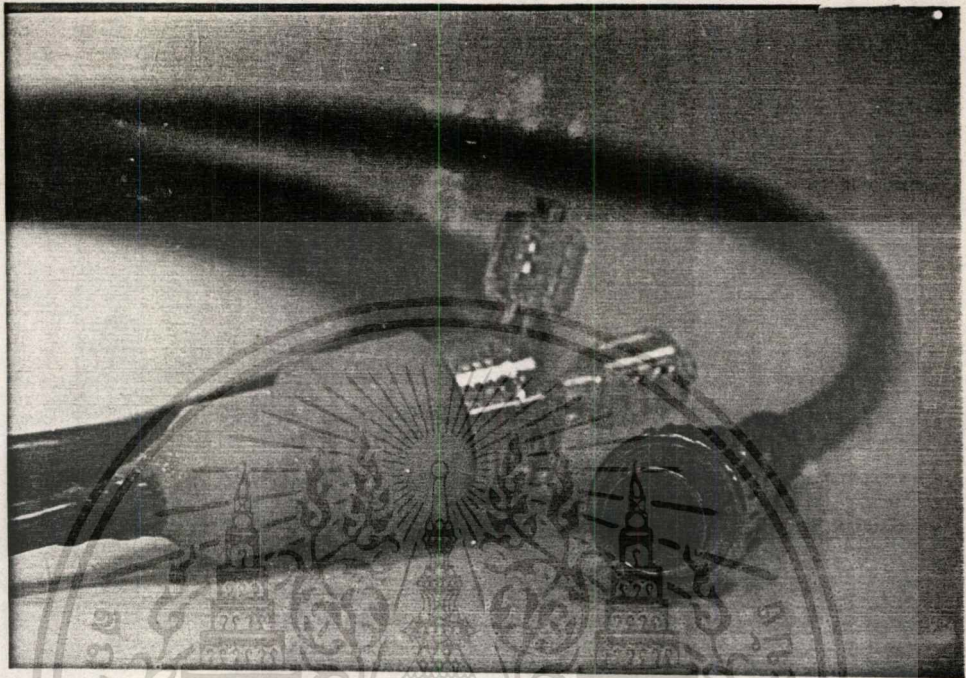
สำหรับการประยุกต์ใช้งานทรานสดิวเซอร์ความดันกับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต จะต้องทำการเก็บบรรจุเป็นหัววัด ดังแสดงด้วยภาพตัดขวางของหัววัดในรูปที่ ง-1 โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้ ชิพทรานสดิวเซอร์ถูกนำมาติดตั้งบนฐานรองกระป๋องโลหะแบบ TO-5 แล้วสอดเข้าไปภายในโครงสร้างตัวถังเก็บบรรจุ ซึ่งทำจากสารซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า ซุปเปอร์เลน โดยให้จุดเชื่อมต่อระหว่างฐานรอง TO-5 กับตัวถังเป็นโอริง (o-ring) ทำการเชื่อมสายนำสัญญาณซึ่งเป็นสายชีลด์เข้ากับขาของฐานรอง TO-5 จำนวน 5 เส้น สายนำสัญญาณเหล่านี้จะถูกผนึกเข้ากับตัวถังด้วยอีพอกซีเพื่อให้มีความแข็งแรง ส่วนปลายของสายนำสัญญาณจะต่อกับขั้วแบบ DIN 5 ขา เพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อกับส่วนขยายสัญญาณ สำหรับการเก็บบรรจุในลักษณะนี้สามารถนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์มาตรฐานซึ่งใช้ในการแพทย์ในปัจจุบัน ดังแสดงด้วยภาพถ่ายในรูปที่ ง-2



รูปที่ ง-1 แสดงโครงสร้างภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์ความดันที่ถูกเก็บบรรจุเป็นอุปกรณ์หัว

วัด เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้นิติเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

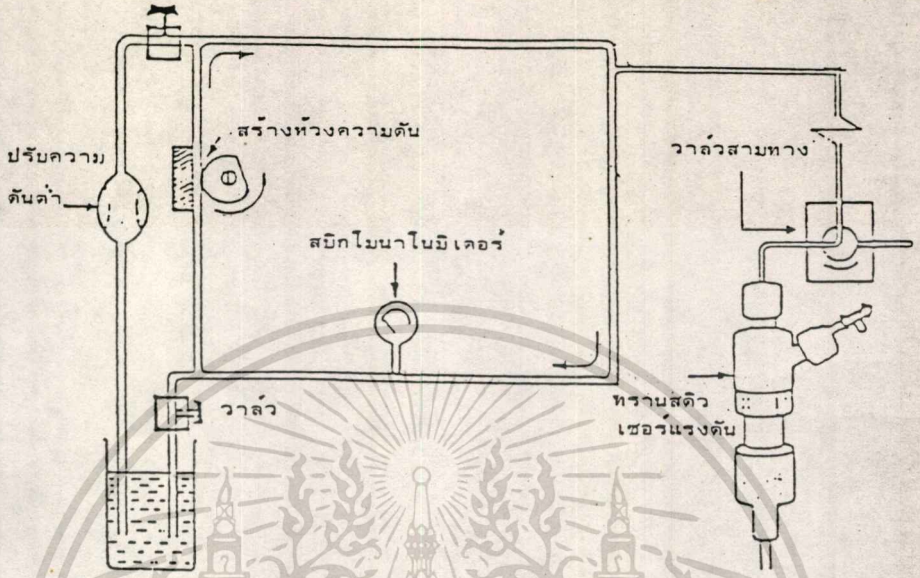


รูปที่ ง-2 ภาพถ่ายแสดงหัววัดที่ได้รับการเก็บบรรจุอย่างสมบูรณ์พร้อมด้วยสายนำสัญญาณและ
หัวต่อแบบ DIN

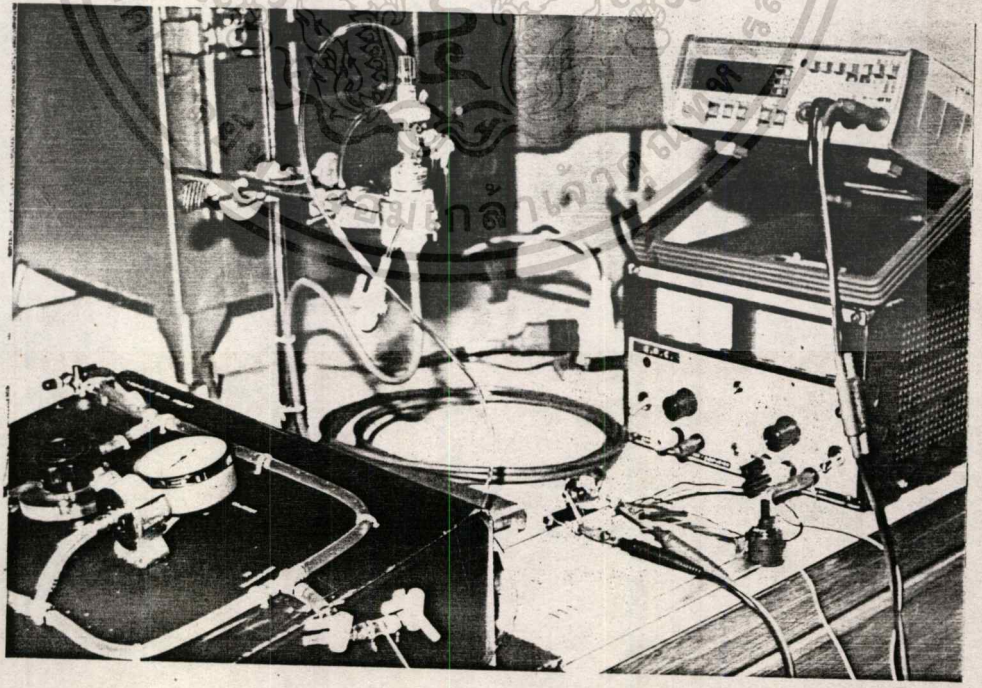
การทดสอบกับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต

หัววัดถูกต่อเข้ากับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต (ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของระบบนี้
ได้แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง [25]) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์การทดลองที่ตั้งแสดงในรูปที่ ง-3
เริ่มต้นทำการทดลองโดยใส่ฟองอากาศในหลอดแคทีเตอร์ (catheter) ออกให้หมด จากนั้นทำ
การปรับความดันเริ่มต้นให้ได้ 80 มม.ปรอท ค่าความดันนี้ถูกแสดงผลด้วยสปีกโมนาโนมิเตอร์ตั้ง
แสดงด้วยภาพถ่ายในรูปที่ ง-4 เมื่อระบบจำลองทำงานก็จะให้ลักษณะที่วงความดันคล้ายกับความ
ดันที่เกิดจากการสูบฉีดโลหิตของหัวใจ เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดมีขนาดต่ำมาก
จึงได้ใช้วงจรขยายสัญญาณช่วยในการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากระบบ
ถูกบันทึกลงบนเครื่องบันทึกสองแกน จะเห็นได้ว่าหัววัดที่สร้างขึ้นสามารถถ่ายทอดลักษณะรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



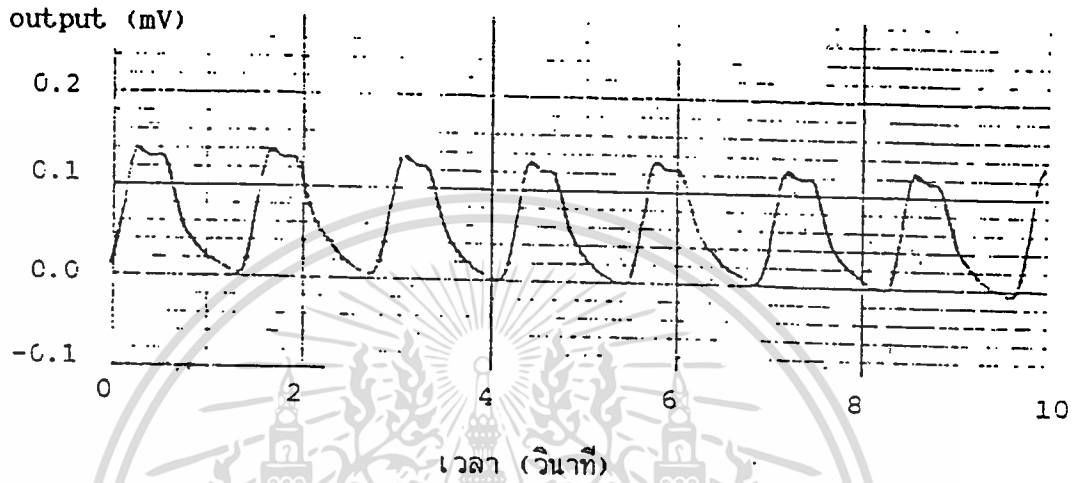
รูปที่ ง-3 แสดงแผนผังอุปกรณ์และวิธีการทดสอบห้วงวัดกับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต



รูปที่ ง-4 ภาพถ่ายแสดงการต่อห้วงวัดเข้ากับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานการคัด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-5 กราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดจากการทดสอบกับระบบจำลองการหมุนเวียนของโลหิต