

ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET

MOISFET PRESSURE TRANSDUCER



นายอัมพร โพธิ์ไย
MR. AMPORN POYAI

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2538

ISBN 974-621-325-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOISFET PRESSURE TRANSDUCER

MR. AMPORN POYAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

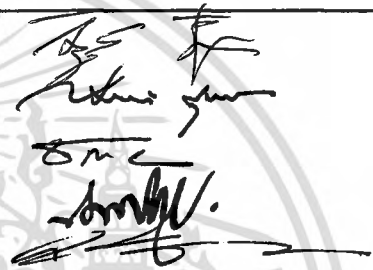
1995

ISBN 974-621-325-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ทรานส์ดีวเซอร์ความดันแบบ MOISFET
MOISFET PRESSURE TRANSDUCER
ชื่อนักศึกษา นายอัมพร โพธิ์ไธ รหัสนักศึกษา 36061074
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง รศ. ดร. สมเกียรติ ศภเดช ผศ. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ดร. สมศักดิ์ ชุ่มช่วย ดร. กิติพล ชิตสกุล	

ค่าระดับคะแนนที่เป็นเอกฉันท์จากคณะกรรมการสอบ GOOD
วัน/เดือน/ปี ทสอบ 31 มีนาคม 2538 เวลา 10.00 น. ถึงเวลา 12.00 น.
สถานที่สอบ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ห้อง (E 4-5-4)



วันที่ 07 เดือน เมษายน พ.ศ. 2538

<u>หมายเหตุ</u>	การวัดผลวิทยานิพนธ์ให้ใช้ค่าระดับคะแนนดังนี้										
	<table border="0"> <tr> <td>ค่าระดับคะแนน</td> <td>ผลการศึกษา</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>Outstanding (ดีเยี่ยม)</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>Good (ดี)</td> </tr> <tr> <td>P</td> <td>Pass (ผ่าน)</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>Fail (ไม่ผ่าน)</td> </tr> </table>	ค่าระดับคะแนน	ผลการศึกษา	O	Outstanding (ดีเยี่ยม)	G	Good (ดี)	P	Pass (ผ่าน)	F	Fail (ไม่ผ่าน)
ค่าระดับคะแนน	ผลการศึกษา										
O	Outstanding (ดีเยี่ยม)										
G	Good (ดี)										
P	Pass (ผ่าน)										
F	Fail (ไม่ผ่าน)										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET
นักศึกษา	นายอัมพร โพธิ์ไย
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	อ. จิรวัฒน์ ปานกลาง
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2538

บทคัดย่อ

ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS เป็นทรานซิสเตอร์ที่ทำงานด้วยสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOS ทั่วไป โครงสร้างดังกล่าวมีข้อดีคือ สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดพีและเอ็นบนฐานรองเดียวกันได้โดยไม่ต้องใช้บ่อแยก ทำให้โครงสร้างนี้สามารถสร้างให้มีความหนาแน่นของทรานซิสเตอร์สูงมากกว่าทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS

แผ่นซิลิกอนนั้นถ้าได้รับความเค้นมากกระทำ จะทำให้พิกัดความต้านทานของเนื้อสารเปลี่ยนไป ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีป ดังนั้นแผ่นซิลิกอนจึงเป็นที่นิยมที่จะนำมาสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ความดัน ที่ใช้ในงานด้านการแพทย์และงานด้านอุตสาหกรรม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอผลงานวิจัย ทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบ MOISFET บนไดอะแฟรมบาง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ การศึกษาหาวิธีการสร้างทรานซิสเตอร์ความดัน เพื่อเป็นพื้นฐานการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่สมบูรณ์ต่อไป เริ่มต้นเป็นการศึกษาทฤษฎีของทรานซิสเตอร์ความดัน และทฤษฎีของ MOISFET เพื่อใช้ในการออกแบบตัวทรานซิสเตอร์ ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก กระบวนการแอสแซมบลี และการเก็บบรรจุ สำหรับโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดันได้ออกแบบ และสร้างทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS บนฐานรองซิลิกอนแบบอพิทาซี n/m^+ ระบาย (100) หนา 400 ไมโครเมตร ที่มีพิกัดความต้านทาน 8-12 โอห์ม. เซนติเมตร ซึ่งถูกสกัดแผ่นผลึกจากด้านหลังตรงบริเวณที่สร้างทรานซิสเตอร์ ให้มีความหนาของแผ่นผลึกเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 ไมโครเมตรเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ด้วยกระบวนการกัดเนื้อฐานรองซิลิกอนแบบแอนไอโซทรอปิก ในสารละลาย EPD ด้วยเทคนิคการควบคุมความหนาด้วยการสกัดด้วยร่องตัววี และใช้แสงเป็นมอนิเตอร์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ ตำแหน่งการวางและทิศทางวางตัวของทรานซิสเตอร์ที่มีผลต่อความไวของทรานซิสเตอร์โครงสร้างดังกล่าว เมื่อมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันมากระทำต่อส่วนบนของแผ่นผลึกที่แตกต่างจากความดันบรรยากาศในช่วง -1 ถึง $+1$ บรรยากาศพบว่าทำให้คุณสมบัติกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไป โดยที่กระแสครนของทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นและชนิดพี จะมีค่าเปลี่ยนไปขึ้นกับทิศทางการวางตัวของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS บนไดอะแฟรม ส่วนค่าแรงดันขีดเริ่มและค่าแรงดันพังทลายจะไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าปกติ และทำการศึกษาคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่มีต่ออุณหภูมิ ต่อจากนั้นทำการทดสอบความเสถียรของสัญญาณที่ให้ออกมา พบว่าสัญญาณมีความเสถียรและความไวของทรานซิสเตอร์ความดันจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THESIS TITLE	MOISFET PRESSURE TRANSDUCER
STUDENT	MR. AMPORN POYAI
THESIS ADVISOR	ASST. PROF. WISUT TITIROONGRUANG
THESIS CO-ADVISOR	MR. JIRAWATH PARNKLANG
LEVEL OF STUDY	MASTER OF ENGINEERING
DEPARTMENT	ELECTRICAL ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR	1995

ABSTRACT

MOIS is a structure of field effect transistor. With this structure, PMOISFET and NMOISFET can be fabricated on the same silicon substrate without well structure. This structure, hence, is desirable for higher density devices fabrication.

Theoretically, the resistivity change of a silicon wafer is subjected to a stress. This phenomena is known as a piezoresistive effect. Silicon wafer, therefore, can be used as a miniature pressure transducers for both medical and industrial applications.

In this thesis, a silicon MOISFET pressure transducer fabricated on a thin diaphragm is studied. The objectives of this study are to find the possible methods for fabricating pressure transducer employing MOISFET structure. Basic theories of pressure transducer and MOISFET are first reviewed. These are used as the background knowledge for designing a MOISFET pressure transducer. Fabrication process, assembly process and the packaging are then presented. The starting substrate is an n/n^+ (100)-oriented epitaxial wafer with the thickness of 400 μm . The wafer resistivity is of 8-12 $\Omega\cdot\text{cm}$. This wafer is etched at the back side to form the thin diaphragm using EPD anisotropic etchant. The thickness of the diaphragms are varied such as 20, 30, 40, 50 and 60 μm . The V-grove and light monitoring techniques have been used for diaphragm thickness controlling.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The change of electrical characteristics of transistors fabricated on such diaphragms are not only depend on the location of the devices but also on the diaphragm thickness and the direction of the examined. The results show that when the air pressure are diviated from 1 atm, in range of -1 to +1 atm, the I-V characteristic of transistor changes accordingly. The change in drain current of NMOIS and PMOIS transistors depends on the orientation of the devices on diaphragm but threshold voltage and breakdown voltage seem to be remained unchanged. Temperature effects on I-V characteristic of the pressure transducer are also studied. Additionally, the output signal stability of pressure transducer is investigated. The device has shown its high stability which is proved by the constant sensitivity when the temperature is varied.



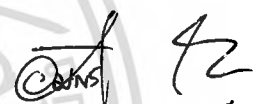
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ผู้ซึ่งได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้ และให้แนวความคิดในการแก้ปัญหาต่างๆ ด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณ อ.จิรวรรณ ปานกลาง ผู้ซึ่งให้แนวความคิด กำเนาะนำ ข้อปฏิบัติ ตลอดจนวิธีการแก้ปัญหาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ผู้ซึ่งให้แนวความคิดในการแก้ปัญหา ขอขอบพระคุณ ผศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ช่วยเหลือในด้านเครื่องมือในการสร้าง และการทดสอบเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้กำลังใจและคอยให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการเรียนมาโดยตลอดจนถึงทุกวันนี้




(นาย อัมพร โพธิ์ไย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญภาพ	X
สารบัญตาราง	XVIII
สัญลักษณ์	XIV
ศัพท์เทคนิค	XXII
คำนำ	1
บทที่ 1 บทนำ	3
1.1 ความเป็นมา	3
1.2 ประเภทของหัววัดความดัน	4
1.3 เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์พลาสมาและอุปกรณ์แอ็คทีฟ	4
1.4 แนวโน้มของการใช้งานหัววัดความดันทางด้านการแพทย์และอุตสาหกรรม	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	6
2.1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET	6
2.2 โครงสร้างของ MOISFET	7
2.2.1 ทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (PMOISFET)	8
2.2.2 ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (NMOISFET)	9
2.3 คุณสมบัติการทำงานของ MOISFET	10
2.3.1 คุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ MOISFET	10
2.3.2 แรงดันขีดเริ่ม	11
2.3.3 แรงดันพังทลาย	14
2.4 แบบจำลองของ MOISFET	15
2.4.1 แบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET	16
2.4.2 แบบจำลองทางไฟสลับของ MOISFET	17
2.5 ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีป	18
2.5.1 โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน	18
2.5.2 ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปในซิลิกอนชนิดเอ็น	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3	ปรากฏการณ์เบี่ยงโพสิทีฟในซิลิกอนชนิดพี	25
2.6	สัมประสิทธิ์เบี่ยงโพสิทีฟและความเค้นในซิลิกอน	27
2.7	การเลือกชนิด ระบายของฐานรองและการวางตัวของ MOISFET	31
บทที่ 3	การออกแบบและการสร้าง	37
3.1	การออกแบบไดอะแฟรม	37
3.2	การออกแบบ MOISFET	39
3.2.1	การออกแบบเพื่อหาขนาดของ MOISFET ที่ดีที่สุดในการใช้งาน เป็นทรานซิสเตอร์ความดัน	39
3.2.2	การออกแบบเพื่อหาทิศทางการวางตัวของ MOISFET ที่เหมาะสม ในการใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ความดัน	41
3.2.3	การออกแบบเพื่อหาตำแหน่งที่ดีที่สุดของ MOISFET บนไดอะแฟรม สำหรับการใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ความดัน	42
3.3	ต้นแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET	44
3.4	ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET	46
3.5	กระบวนการแอสเซมบลีและการเก็บบรรจุ	63
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	66
4.1	หาค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดันต่างๆ	68
4.1.1	การทดลองและผลการทดลองวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ ความดันแบบ PMOISFET ที่ความดันต่างๆ	69
4.1.2	การทดลองและผลการทดลองวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ	71
4.2	หาค่าแรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดันต่างๆ	74
4.2.1	การทดลองและผลการทดลองวัดค่าแรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์ ความดันแบบ PMOISFET ที่ความดันต่างๆ	74
4.2.2	การทดลองและผลการทดลองวัดค่าแรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์ ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ	76
4.3	หาค่า k' ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดันต่างๆ	79
4.3.1	การทดลองและผลการทดลองหาค่า k' ของทรานซิสเตอร์ความดัน แบบ PMOISFET ที่ความดันต่างๆ	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่า k' ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ	82
4.4 หาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกทของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดันต่างๆ	85
4.4.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกทของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ความดันต่างๆ	86
4.4.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกทของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ	88
4.5 หาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างๆ	90
4.5.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างๆ	90
4.5.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างๆ	90
4.6 หาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ตำแหน่งต่างๆ บนไดอะแฟรม	93
4.6.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ตำแหน่งต่างๆ บนไดอะแฟรม	93
4.6.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ตำแหน่งต่างๆ บนไดอะแฟรม	96
4.7 หาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ค่า W/L ต่างๆ	100
4.7.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ค่า W/L ต่างๆ	100
4.7.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ค่า W/L ต่างๆ	100
4.8 หาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่อุณหภูมิต่างๆ	103
4.8.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่อุณหภูมิต่างๆ	103
4.8.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่อุณหภูมิต่างๆ	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 เสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดัน ต่างๆ	108
4.9.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของ ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ความดันต่างๆ	108
4.9.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของ ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ	110
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	112
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์	120
เอกสารอ้างอิง	123
ภาคผนวก ก การประยุกต์ใช้งาน	125
ภาคผนวก ข การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์	130
ภาคผนวก ค กระบวนการแพร่สารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส	131
ภาคผนวก ง กระบวนการแพร่สารเจือทองคำ	134
ภาคผนวก จ การกัดและเทคนิคการกัดแผ่นซิลิกอน	135
ภาคผนวก ฉ แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง	138
ภาคผนวก ช รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการสร้าง	145
ประวัติผู้เขียน	146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1-1 แสดงโครงสร้างทั่วไปของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่สร้างขึ้นใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้	6
รูปที่ 2.2-1 แสดงโครงสร้างของ MOISFET	7
รูปที่ 2.2-2 แสดงโครงสร้างของ PMOISFET	8
รูปที่ 2.2-3 แสดงการไบอัสของ PMOISFET	9
รูปที่ 2.2-4 แสดงโครงสร้างของ NMOISFET	9
รูปที่ 2.2-5 แสดงการไบอัสของ NMOISFET	10
รูปที่ 2.3-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ NMOISFET	12
รูปที่ 2.4-1 แสดงภาพตัดขวางของ MOISFET ที่มีโครงสร้างอื่นแฝงอยู่เมื่อพิจารณาแบบไฟตรง	16
รูปที่ 2.4-2 แสดงแบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET	16
รูปที่ 2.4-3 แสดงภาพตัดขวางของ MOISFET ที่มีโครงสร้างอื่นแฝงอยู่เมื่อพิจารณาแบบไฟสลับ	17
รูปที่ 2.4-4 แสดงแบบจำลองทางไฟสลับของ MOISFET	17
รูปที่ 2.5-1 (ก) พลังงาน E เป็นฟังก์ชันของโมเมนตัม P สำหรับหลักการพื้นฐาน (เส้นประ) และ เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น k ด้วยธรรมชาติของอนุภาค (ข) ส่วนที่แสดงค่าที่เป็นไป ได้ของแถบความนำ แถบต้องห้าม และแถบวาเลนซ์	19
รูปที่ 2.5-2 โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน (ก) ทิศทาง [100] (ข) ทิศทาง [111]	21
รูปที่ 2.5-3 Constant - energy ellipsoids ใน k - space ใกล้จุดต่ำสุดในแถบความนำของซิลิกอน	21
รูปที่ 2.5-4 (ก) การเปรียบเทียบในทิศทาง [100] ที่เวลลีย์ [100] พลังงานน้อยสุดเป็นส่วนที่ต่ำสุด และเวลลีย์ [010] และ [001] ส่วนที่ต่ำสุดถูกยกขึ้น อิเล็กตรอนจะไหลจากเวลลีย์ [010] และ [001] ไปยังเวลลีย์ [100] (ข) และ (ค) แสดงการยึดครองของอิเล็กตรอนของแถบ ความนำเนื่องจากการไหลของอิเล็กตรอน	24
รูปที่ 2.5-5 เฟลคเตอร์ P(N,T) ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีบที่อุณหภูมิห้อง ที่มีการคูณเพื่อให้ ได้แกจเฟลคเตอร์ที่อุณหภูมิ T และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (donor) N ในซิลิกอน ชนิดเอ็น ดังที่คำนวณโดย Kanda	24
รูปที่ 2.5-6 แกจเฟลคเตอร์ของซิลิกอนชนิดพี เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ	26
รูปที่ 2.6-1 แสดงตัวต้านทานที่ได้รับความเค้นในแนวขนาน (σ_{\parallel}) และความเค้นตั้งฉาก (σ_{\perp})	30
รูปที่ 2.6-2 แสดงตัวต้านทานในแนวสัมผัส (R_{\parallel}) และความต้านทานในแนวรัศมี (R_{\perp}) บนไดอะ แฟรมสี่เหลี่ยมจตุรัส ที่มีความเค้นสัมผัส (σ'_{\parallel}) และความเค้นแนวรัศมี (σ'_{\perp})	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7-1	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีปแบบขนาน ($\pi_{ }$) และแบบตั้งฉาก (π_{\perp}) สำหรับซิลิกอนชนิดพี (ก) ระบายผลึก (100) (ข) (110) (ค) (111) ที่อุณหภูมิห้อง	32
รูปที่ 2.7-2	การโค้งงอของไดอะแฟรมเนื่องจากความแตกต่างของความดัน	34
รูปที่ 2.7-3	แสดงการกระจายของความเค้นโดเมนชั้นเลสใน 1 ควอดเรนต์ของไดอะแฟรมที่มีขอบในตัว	36
รูปที่ 3.1-1	แสดงรายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET บนฐานรองซิลิกอนระบาย (100)	38
รูปที่ 3.2-1	ภาพด้านบนของ MOISFET	40
รูปที่ 3.2-2	การวาง MOISFET บนไดอะแฟรม (ก) กระจายไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) กระจายไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	41
รูปที่ 3.2-3	แสดงภาพตัดขวางของ MOISFET บนไดอะแฟรมที่มีการแปรค่าระยะห่างจากศูนย์กลางไดอะแฟรม	43
รูปที่ 3.3-1	ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระจายไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$	44
รูปที่ 3.3-2	ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระจายไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$	45
รูปที่ 3.3-3	ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระจายไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r = 0$	45
รูปที่ 3.3-4	ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระจายไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r = 0$	46
รูปที่ 3.4-1	แสดงต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET บนกระดาษกราฟ	47
รูปที่ 3.4-2	(ก) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม	47
รูปที่ 3.4-2	(ข) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอนสำหรับ PMOISFET	48
รูปที่ 3.4-2	(ค) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัสสำหรับ NMOISFET	48
รูปที่ 3.4-2	(ง) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 4 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างออกไซด์ที่เกท	49
รูปที่ 3.4-2	(จ) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 5 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสออลูมิเนียม	49
รูปที่ 3.4-2	(ฉ) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 6 ใช้สำหรับสร้างลวดลายออลูมิเนียม	50
รูปที่ 3.4-3	แสดงภาพถ่ายของกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นโฟโต้มาสก์	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4-4	แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกเริ่มแรก	52
รูปที่ 3.4-5	แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก	53
รูปที่ 3.4-6	แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 7	54
รูปที่ 3.4-7	แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 11	55
รูปที่ 3.4-8	แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 19	56
รูปที่ 3.4-9	แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 27	57
รูปที่ 3.4-10	แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 32	58
รูปที่ 3.4-11	แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 44 (ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน	60
รูปที่ 3.4-12	(ก) แสดงภาพถ่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหล ขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$ ที่สร้างเสร็จแล้ว	61
รูปที่ 3.4-12	(ข) แสดงภาพถ่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหล ตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$ ที่สร้างเสร็จแล้ว	61
รูปที่ 3.4-12	(ค) แสดงภาพถ่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหล ขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r = 0$ ที่สร้างเสร็จแล้ว	62
รูปที่ 3.4-12	(ค) แสดงภาพถ่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหล ตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r = 0$ ที่สร้างเสร็จแล้ว	62
รูปที่ 3.5-1	แสดงภาพถ่ายชิปทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ติดอยู่บนตัวถัง โลหะแบบ TO-5 พร้อมทั้งต่อสายระหว่างขั้วไฟฟ้าของ MOISFET กับขาโลหะ ของฐานรอง	64
รูปที่ 3.5-2	ภาพตัดขวางแสดงการเก็บบรรจุทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ด้วย ตัวถังโลหะแบบ TO-5	64
รูปที่ 3.5-3	แสดงภาพถ่ายตัวทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่เก็บบรรจุเรียบร้อยแล้ว	65
รูปที่ 4.1-1	ภาพถ่ายแสดงการทดสอบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติกระแส และแรงดัน HEWLETT PACKARD	66
รูปที่ 4.1-2	แผนผังชุดทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของ MOISFET บนไดอะแฟรมกับความดัน (ก) เมื่อความแตกต่างความดันเป็นลบ (ข) เมื่อความแตกต่างความดันเป็นบวก	67
รูปที่ 4.1-3	ภาพถ่ายแสดงชุดทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของ MOISFET บนไดอะแฟรมกับ ความดันที่ใช้ในการทดลอง (ก) เมื่อความแตกต่างความดันเป็นลบ (ข) เมื่อความ แตกต่างความดันเป็นบวก	67
รูปที่ 4.1-4	แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันขีดเริ่มของ PMOISFET	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1-5 ตัวอย่างผลการวัดค่า V_T ของ PMOSFET บนไดอะแฟรม	70
รูปที่ 4.1-6 แสดงผลการทดลองวัดค่า V_T กับความแตกต่างความดันของ PMOSFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉาก กับขอบของไดอะแฟรม	70
รูปที่ 4.1-7 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันขีดเริ่มของ NMOISFET	72
รูปที่ 4.1-8 ตัวอย่างผลการวัดค่า V_T ของ NMOISFET บนไดอะแฟรม	72
รูปที่ 4.1-9 แสดงผลการทดลองวัดค่า V_T กับความแตกต่างความดันของ NMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉาก กับขอบของไดอะแฟรม	73
รูปที่ 4.2-1 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันฟังก์ทลายของ PMOSFET	74
รูปที่ 4.2-2 ตัวอย่างผลการวัดค่าแรงดันฟังก์ทลายของ PMOSFET บนไดอะแฟรม	75
รูปที่ 4.2-3 แสดงผลการทดลองวัดค่าแรงดันฟังก์ทลายกับความแตกต่างความดันของ PMOSFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบ ของไดอะแฟรม	75
รูปที่ 4.2-4 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันฟังก์ทลายของ NMOISFET	77
รูปที่ 4.2-5 ตัวอย่างผลการวัดค่าแรงดันฟังก์ทลายของ NMOISFET บนไดอะแฟรม	77
รูปที่ 4.2-6 แสดงผลการทดลองวัดค่าแรงดันฟังก์ทลายกับความแตกต่างความดันของ NMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบ ของไดอะแฟรม	78
รูปที่ 4.3-1 แสดงวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOSFET	80
รูปที่ 4.3-2 ตัวอย่างผลการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOSFET	80
รูปที่ 4.3-3 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของ k' กับความแตกต่างความดันของ PMOSFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบ ของไดอะแฟรม	81
รูปที่ 4.3-4 แสดงวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET	82
รูปที่ 4.3-5 ตัวอย่างผลการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET	83
รูปที่ 4.3-6 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของ k' กับความแตกต่างความดันของ NMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบ ของไดอะแฟรม	84
รูปที่ 4.4-1 แสดงวงจรสมมูลย์ของ MOISFET ที่มี C_{ox} แฝงอยู่	85
รูปที่ 4.4-2 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ PMOSFET	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4-3 ตัวอย่างผลการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ PMOISFET บนไดอะแฟรม	86
รูปที่ 4.4-4 แสดงผลการทดลองวัดค่าตัวเก็บประจุกับความแตกต่างความดันของ PMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	87
รูปที่ 4.4-5 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ NMOISFET	88
รูปที่ 4.4-6 ตัวอย่างผลการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ NMOISFET บนไดอะแฟรม	88
รูปที่ 4.4-7 แสดงผลการทดลองวัดค่าตัวเก็บประจุกับความแตกต่างความดันของ NMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	89
รูปที่ 4.5-1 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับความหนาของไดอะแฟรมของ PMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	91
รูปที่ 4.5-2 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับความหนาของไดอะแฟรมของ NMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	92
รูปที่ 4.6-1 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง PMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	93
รูปที่ 4.6-2 กราฟสามมิติแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง PMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	94
รูปที่ 4.6-3 กราฟเส้นระดับความไวแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง PMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	95
รูปที่ 4.6-4 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	97
รูปที่ 4.6-5 กราฟสามมิติแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6-6	กราฟเส้นระดับความไวแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	99
รูปที่ 4.7-1	แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับค่า W/L ของ PMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	100
รูปที่ 4.7-2	แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับค่า W/L ของ NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	102
รูปที่ 4.8-1	แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่า k' กับอุณหภูมิของ PMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	103
รูปที่ 4.8-2	แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความไวกับอุณหภูมิของ PMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	104
รูปที่ 4.8-3	แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่า k' กับอุณหภูมิของ NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	106
รูปที่ 4.8-4	แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความไวกับอุณหภูมิของ NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	107
รูปที่ 4.9-1	แสดงวงจรที่ใช้วัดเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET	108
รูปที่ 4.9-2	แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมที่ความดันบรรยากาศ (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมที่ความดันบรรยากาศ (ค) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมที่ความแตกต่างความดันเป็น 760 ทอร์ (ง) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมที่ความแตกต่างความดันเป็น 760 ทอร์	109
รูปที่ 4.9-3	แสดงวงจรที่ใช้วัดเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9-4	แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมที่ความดันบรรยากาศ (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมที่ความดันบรรยากาศ (ค) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมที่ความแตกต่างความดันเป็น 760 ทอร์ (ง) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมที่ความแตกต่างของความดันเป็น 760 ทอร์	111
รูปที่ 5-1	แสดงความสัมพันธ์ของค่า μ_{Au} กับความดัน (ก) PMOISFET เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) PMOISFET เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ค) NMOISFET เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ง) NMOISFET เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	114
รูปที่ ก-1	แสดงโครงสร้างภาพตัดขวางของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ถูกเก็บบรรจุเป็นหัววัดเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบจำลองการหมุนเวียนของเลือด	125
รูปที่ ก-2	แสดงภาพถ่ายหัววัดที่ได้รับการเก็บบรรจุเสร็จสมบูรณ์แล้ว	126
รูปที่ ก-3	แสดงแผนผังการทดสอบหัววัดความดันแบบ MOISFET กับระบบจำลองการหมุนเวียนเลือด	127
รูปที่ ก-4	แสดงภาพถ่ายการทดสอบหัววัดความดันแบบ MOISFET กับระบบจำลองการหมุนเวียนเลือด	127
รูปที่ ก-5	กราฟแสดงสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากหัววัดจากการทดสอบกับระบบจำลองการหมุนเวียนเลือด	128
รูปที่ ข-1	ความหนาออกไซด์ (X_o) กับเวลา (t_o) และอุณหภูมิ (T) ในการทำออกซิเดชัน	130
รูปที่ ค-1	แสดงค่า Solid Solubility ของสารเจือในซิลิกอน (ความเข้มข้นสารเจือสูงสุด C_{Bmax} ที่อุณหภูมิ T ใดๆ)	132
รูปที่ ค-2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือในซิลิกอน	134
รูปที่ ง-1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองคำในสภาวะอิ่มตัว (C_{Au}) กับความเข้มข้นของสารเจือ Background (C_B) และอุณหภูมิในการแพร่ทองคำ (T)	134
รูปที่ จ-1	แสดงภาพตัดขวางของหลุมที่ถูกกัด (ก) หลุมรูปตัวยู (ข) หลุมรูปตัววี	135
รูปที่ จ-2	แสดงเทคนิคการควบคุมความหนาด้วยร่องตัววี	136
รูปที่ จ-3	แสดงแผนภูมิการกัดแผ่นผลึกซิลิกอน	136
รูปที่ จ-4	แสดงภาพถ่ายของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการกัดแผ่นผลึกซิลิกอน	137
รูปที่ ฉ-1	แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต้นแบบ	138
รูปที่ ฉ-2	แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพย่อส่วนลงบนกระจกมาสก์	138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ ฉ-3 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม (เครื่อง Spinner)	139
รูปที่ ฉ-4 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายมาสก์ (Mask aligner)	139
รูปที่ ฉ-5 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือ	140
รูปที่ ฉ-6 แสดงภาพถ่ายเครื่องวัดความต้านทานแผ่น (Four point probe)	140
รูปที่ ฉ-7 แสดงภาพถ่ายเครื่องตัดแยกชิป	141
รูปที่ ฉ-8 แสดงภาพถ่ายเครื่องติดชิปบนตัวถัง	141
รูปที่ ฉ-9 แสดงภาพถ่ายเครื่องสั่นความถี่สูง	142
รูปที่ ฉ-10 แสดงภาพถ่ายเครื่องต่อสายลวดตัวนำ	142
รูปที่ ฉ-11 แสดงภาพถ่ายกล่องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการตรวจสอบลวดลาย	143
รูปที่ ฉ-12 แสดงภาพถ่ายเครื่องวัดความหนา	143
รูปที่ ฉ-13 แสดงภาพถ่ายเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ	144



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.5-1 ความคล่องตัวและเกจเฟคเตอร์สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี	26
ตารางที่ 2.6-1 สัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีฟสำหรับซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี	29
ตารางที่ 3.1-1 การออกแบบขนาดของช่องโคอะแฟรม	39
ตารางที่ 3.2-1 การแปรค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) ของช่องทางเดินกระแสของ MOISFET	40
ตารางที่ 3.2-2 แสดงค่าระยะห่างจากศูนย์กลางโคอะแฟรม (r) ที่ใช้ในการทดลอง	43
ตารางที่ 3.2-3 ขนาดช่องทางเดินกระแสของ MOISFET เมื่อ $r=0$	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ค่าคงที่แลททิส	อังสโตม (\AA)
C_{DS}	ความจุไฟฟ้าแคปรน-ซอส	พิโคฟารัด (PF)
C_{GD}	ความจุไฟฟ้าเกต-แคปรน	พิโคฟารัด (PF)
C_{GS}	ความจุไฟฟ้าเกต-ซอส	พิโคฟารัด (PF)
C_{ox}	ความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์	F/cm^2
C_s	Solid Solubility	อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm ³)
d	ความหนาของไดอะเฟรม	ไมโครเมตร (μm)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่	เซนติเมตรกำลังสองต่อวินาที (cm ² /s)
E_C	พลังงานแถบความนำ	อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)
E_F	พลังงานระดับเฟอร์มิ	อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)
E_G	พลังงานแถบต้องห้าม	อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)
E_i	พลังงานระดับอินทรินซิก	อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)
E_v	พลังงานแถบวาเลนซ์	อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)
h	ค่าคงตัวของพลังค์	จูล-วินาที (J.s)
I_{DS}	กระแสแคปรน	แอมแปร์ (A)
k	เวฟนิ่งเบอร์	ต่อเมตร (m ⁻¹)
l	ขนาดของไดอะเฟรม	ไมโครเมตร (μm)
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส	ไมโครเมตร (μm)
m^*	มวลยังผล	กิโลกรัม (Kg)
m_l	มวลยังผลตามยาว	กิโลกรัม (Kg)
m_t	มวลยังผลตามขวาง	กิโลกรัม (Kg)
n_i	ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (cm ⁻³)
P	ความดัน	ทอร์ (Torr)
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	คูลอมบ์ (C)
Q_{ss}	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนไดออกไซด์	คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร (C/cm ²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ox}	ความหนาของเกตออกไซด์	อังสตรอม (\AA)
t	เวลา	วินาที (s)
V	ศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไบอัส	โวลต์ (V)
V_{BV}	แรงดันพังทลาย	โวลต์ (V)
V_{DD}	แรงดันไบอัสภายนอก	โวลต์ (V)
V_{DS}	แรงดันเดรน-ซอร์ส	โวลต์ (V)
V_{GS}	แรงดันเกต-เดรน	โวลต์ (V)
V_T	แรงดันขีดเริ่ม	โวลต์ (V)
W	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	ไมโครเมตร (μm)
W_b	ความกว้างของพื้นหลุม	ไมโครเมตร (μm)
W_o	ความกว้างของปากหลุม	ไมโครเมตร (μm)
X_j	ความลึกของรอยต่อ	ไมโครเมตร (μm)
β	ค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์	(A/V^2)
K	เกจเฟคเตอร์	-
k'	ค่าทรานคอนดักแตนซ์ของกระบวนการสร้าง	A/V^2
ϵ_o	ค่าเพอร์มิตทิวิตี้ของสุญญากาศ	F/cm
ϵ_{ox}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์	-
ϵ_s	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	-
ϵ_{si}	ค่าเพอร์มิตทิวิตี้ของซิลิกอน	F/cm
ρ	สภาพต้านทาน	$\Omega\text{-cm}$
ρ_s	ความต้านทานแผ่น	Ω/\square
μ	ความคล่องตัวของพาหะ	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
$\mu_{ }$	ค่าความคล่องตัวตามแกนยาวของอิลิปซอยด์	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
μ_{\perp}	ค่าความคล่องตัวตามแกนสั้นของอิลิปซอยด์	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
μ_{nAu}	ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในซิลิกอนที่ เติมอะตอมทองคำ	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
μ_{pAu}	ค่าความคล่องตัวของโฮลในซิลิกอนที่ เติมอะตอมทองคำ	$\text{cm}^2/\text{V-s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
π_{\parallel}	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีปตามยาว	cm^2/dyn
π_{\perp}	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีปตามขวาง	cm^2/dyn
$\pi_{11}, \pi_{12},$		
π_{44}	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีป	cm^2/dyn
σ	สภาพความนำ	$(\Omega\text{-cm})^{-1}$
σ'	ความเค้นโดเมนชั้นเลส	-
σ'_{\parallel}	ความเค้นขนาน	N/m^2
σ'_{\perp}	ความเค้นตั้งฉาก	N/m^2
τ	เวลาอิสระเฉลี่ย	วินาที(s)
ΔR	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง	โอห์ม (Ω)
$(\Delta R/R)$	อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน	-
$(\Delta R/R)_{\parallel}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานในแนวรัศมี	-
$(\Delta R/R)_{\perp}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก	-
$\Delta k'$	ค่า process transconductance ที่เปลี่ยนแปลง	A/V^2
$(\Delta k'/k')$	อัตราการเปลี่ยนแปลง process transconductance	-
$\Delta \mu$	ค่าความคล่องตัวที่เปลี่ยนแปลง	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
$(\Delta \mu/\mu)$	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความคล่องตัว	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

anisotropic etching	การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก
assembly process	กระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
channel length	ความยาวช่องทางเดินกระแส
channel width	ความกว้างช่องทางเดินกระแส
conductance	คอนดักแตนซ์
die bonding	การติดชิป
diffusion coefficient	สัมประสิทธิ์การแพร่
diffusion process	กระบวนการแพร่สารเจือ
encapsulate	การหุ้มกัฟ
enhancement mode	เอ็นฮานเมนต์โหมด
epitaxy process	กระบวนการอพิทาซี
lateral structure	โครงสร้างทางด้านขวาง
metalization process	กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ
mobility	ความคล่องตัว
overlap	ส่วนซ้อนทับ
oxidation process	กระบวนการออกซิเดชัน
Photolithography process	กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี
scribing	การตัดแยกชิป
wire bonding	การต่อสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็วมาก รวมไปถึงความเจริญก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงมีการนำอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เข้าไปใช้กับงานด้านต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกและเพื่อความเที่ยงตรง เช่น การขนส่ง การแพทย์ การควบคุมในระบบอุตสาหกรรม เป็นต้น ในงานเหล่านี้ทรานสดิวเซอร์ (transducer) จะใช้เป็นตัวรับรู้การเปลี่ยนแปลงสิ่งต่างๆ เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานผ่านทางทรานสดิวเซอร์นี้ได้

ทรานสดิวเซอร์ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอนนับว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณต่างๆ ได้ เช่น วัดความดันสะเทือน ความขรุขระของพื้นผิว ความเค้น อัตราการไหล แรงบิด น้ำหนัก อัตราเร่ง และความดัน โดยทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอน ส่วนใหญ่จะอาศัยปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟ (piezoresistive effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อมีความเค้นมากจะทำให้พิกัดความต้านทานของเนื้อสารเปลี่ยนไป

จุดประสงค์หลักในการค้นคว้าทดลอง วิจัย และพัฒนาทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอนบนไดอะแฟรมบาง ก็เพื่อทำให้โครงสร้างมีขนาดเล็ก (miniature) ความไวสูง (high sensitivity) มีความเป็นเชิงเส้น (linearity) และมีเสถียรภาพที่ดี (high stability) ดังนั้นจึงทำการสร้างทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS บนไดอะแฟรม เนื่องจากทรานซิสเตอร์โครงสร้างนี้มีข้อดีคือ สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีได้บนฐานรองเดียวกัน^[1] ทำให้ประหยัดพื้นที่ ดังนั้นในเทคโนโลยีเดียวกัน สามารถสร้างวงจรรวมที่มีความหนาแน่นได้มากกว่า

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาและสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ซึ่งจะเป็นการพัฒนาอุปกรณ์วัดความดันแบบแอคทีฟขึ้นมา โดยอาศัยกระบวนการสร้างภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ตัวนี้จะเป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่ที่ยังไม่เคยมีใครศึกษาและทำการสร้าง ซึ่งเป็นอีกก้าวหนึ่งในการพัฒนาทรานสดิวเซอร์ความดันให้มีความสามารถที่จะสร้างเป็นวงจรรวมได้ เพื่อใช้แทนทรานสดิวเซอร์ความดันแบบพาสซีฟที่ใช้ในทางการแพทย์ และทางอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET เป็นอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ ที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ ดังนั้นทรานสดิวเซอร์ความดันแบบนี้จึงเป็นทรานสดิวเซอร์ที่มีความไวสูงกว่าทรานสดิวเซอร์ความดันที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้

เมื่อทำการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ขึ้นมาแล้ว จึงต้องทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เมื่อมีความดันกระทำ ดังนั้นจึงทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์โครงสร้างแบบนี้ คุณสมบัติที่วัดได้แก่ ค่าแรงดันขีดเริ่ม ค่าแรงดันพังทลาย คุณสมบัติทางกระแสและแรงดันเป็นต้น ดังนั้นถ้ารู้คุณสมบัติเหล่านี้แล้ว ก็สามารถที่จะออกแบบและทำการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ให้มีประสิทธิภาพสูงมากยิ่งขึ้นต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการวิจัยทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET โดยเริ่มต้นจากการศึกษาทางทฤษฎี การออกแบบ การสร้างเป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์ และทดสอบคุณสมบัติต่างๆ รายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยสามารถสรุปได้เป็นบทดังนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาของการพัฒนาอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ความดัน ต่อจากนั้นจะเป็นการจำแนกประเภทของหัววัดความดันที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้ นอกจากนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์พาสซีฟและอุปกรณ์แอคทีฟ สุดท้ายจะกล่าวถึงแนวโน้มของการใช้งานหัววัดความดันทางด้านการแพทย์และอุตสาหกรรม

บทที่ 2 เริ่มแรกจะทำการศึกษาโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET จากนั้นเป็นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET โดยใช้โครงสร้างของ MOISFET ทั้งชนิดพีแซนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหนด และชนิดเอ็นแซนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหนด คุณสมบัติการทำงานของ MOISFET แบบจำลองของ MOISFET ทั้งแบบจำลองทางไฟตรงและแบบจำลองทางไฟสลับ จากนั้นจะทำการศึกษาปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีฟ โดยศึกษาจากโครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีฟในตัวซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี ศึกษาความเค้นและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีฟในซิลิกอน สุดท้ายจะกล่าวถึงการเลือกชนิด ระบายของฐานรอง และตำแหน่งการวางตัวของ MOISFET บนไดอะแฟรม

บทที่ 3 เป็นการออกแบบและการสร้าง ประกอบด้วยการออกแบบเพื่อหาขนาด ตำแหน่ง และทิศทางการวางตัวของ MOISFET ที่เหมาะสม จากนั้นจะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET สุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการแอสเซมบลี และการเก็บบรรจุ

บทที่ 4 นำเสนอการทดลองและผลการทดลอง คือการหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ค่าแรงดันพังทลาย ค่าทรานคอนดักแตนซ์ของกระบวนการสร้าง ค่าความไว ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET และสุดท้ายจะเป็นการทดสอบเสถียรภาพของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่สร้างขึ้นมาที่เงื่อนไขต่างๆ

บทที่ 5 เป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้ทฤษฎีในบทที่ 2 มาใช้อธิบายผลการทดลองในบทที่ 4

บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองที่ทำมาทั้งหมด เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการพัฒนาทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ดีต่อไป

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ตัวตรวจจับสำหรับวัดสัญญาณทางกล อาทิ (ก) การวัดที่เปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ เช่น ตำแหน่ง การขจัด ความขรุขระของพื้นผิว อัตราการเคลื่อนที่และการหมุน (ข) การวัดที่สัมพันธ์กับแรง เช่น น้ำหนัก แรงดัน อัตราเร่ง ความสูง และการสั่นสะเทือน การวัดสัญญาณทางกลมีการวัดจากตัวตรวจจับได้หลายแบบ ตัวอย่างเช่น เทคโคมิเตอร์ (tachometer) สามารถสร้างได้จากงานที่เจาะรูไว้ แหล่งกำเนิดแสงและตัวรับรู้แสง ถ้าเอางานมาติดกับมอเตอร์ก็จะสามารถวัดความเร็วในการหมุนได้ โดยวางตัวตรวจจับแสงให้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงที่ส่องผ่านรูก็จะสามารถนับพัลส์ที่ตกลงบนตัวตรวจจับได้ และวัดความเร็วในการหมุนได้ ในการวัดแบบนี้เป็นการเปลี่ยนสัญญาณเชิงกลเป็นสัญญาณแสง แล้วเปลี่ยนจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกที ข้อดีของการวัดแบบนี้ก็คือวัดสิ่งที่ต้องการวัดค่าออกมาไม่จำเป็นต้องมีการสัมผัสเชิงกลกับตัวตรวจจับ ซึ่งจะแปรเป็นสัญญาณไฟฟ้าออกมา การวัดสัญญาณทางกลจึงสามารถวัดได้จากตัวตรวจจับหลายๆ แบบ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงตัวตรวจจับทางกลที่มีการเปลี่ยนสัญญาณทางกลไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า

ตัวตรวจจับแบบโซลิดสเตทส่วนมากจะใช้ปรากฏการณ์เปียโซรีซีสทีป ในปี 1856 Lord Kelvin^[2] ได้รายงานว่ามีตัวนำที่ได้รับแรงดันจะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป จากปรากฏการณ์ดังกล่าวในปัจจุบันมีการผลิตสเตรนเกจมากมายเพื่อใช้วัดแรง ซึ่งโดยทั่วไปสเตรนเกจมักจะถูกบอนด์ติดกับวัตถุที่จะวัดโดยตรง เมื่อได้รับความเค้นสเตรนเกจที่บอนด์ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน โดยสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้จากวงจรวีสโตนบริดจ์ที่ต่อออกมา การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีค่าน้อยมากในตัวนำ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงมีความสำคัญขึ้นมา

ในปี 1954 Smith^[3] ได้รายงานผลการทดลองว่าปรากฏการณ์ดังกล่าว จะพบในซิลิกอนและเจอร์มาเนียม โดยจะมีขนาดมากกว่าในโลหะตัวนำเป็นร้อยเท่า อีกหลายปีต่อมาจึงมีการสร้างตัววัดความดันแบบซิลิกอนขึ้นมา ส่วนประกอบหลักก็จะเป็นไดอะแฟรมบางของซิลิกอน ซึ่งจะสร้างวงจรวีสโตนบริดจ์บนไดอะแฟรมนั้น เมื่อไดอะแฟรมงอตัวจะเกิดการไม่สมดุลขึ้นในวงจร ตัววัดความดันที่สร้างขึ้นในปัจจุบันนี้จะอาศัยปรากฏการณ์เปียโซรีซีสทีปเป็นส่วนใหญ่

วิธีที่สะดวกในการวัดแรงอีกอย่างก็คือใช้ปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก ในวัสดุที่เป็นผลึกต่างๆ เช่น ควอตซ์ จะมีการแสดงขั้วเมื่อได้รับแรงกระทำ วัสดุประเภทนี้เหมาะแก่การวัดแรงดันสลับ เช่น ไมโครโฟนต่างๆ ในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนจะไม่แสดงปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก แต่สามารถใช้ปรากฏการณ์นี้กับเทคโนโลยีของซิลิกอนได้ โดยทำการสร้างชั้นเปียโซอิเล็กทริกบนซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ประเภทของหัววัดความดัน ^[2]

หัววัดความดันที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยมากจะอาศัยปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้

- ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีป (piezoresistive effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อมีความเค้นมากระทำ จะทำให้ค่าพิคัดความต้านทานของเนื้อสารเปลี่ยนไป
- ปรากฏการณ์รอยต่อเพียโซ (piezjunction effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อมีความเค้นกระทำที่รอยต่อแล้วจะทำให้จำนวนพาหะที่เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อมีค่าเปลี่ยนไป
- ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุจะผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อมีความเค้นกระทำ หรือในทางกลับกันเมื่อให้กระแสไฟฟ้าลงไปจะทำให้เกิดความเค้นเชิงกลขึ้นได้
- ปรากฏการณ์การเก็บประจุ (capacitive effect) คือตัวไดอะแฟรมเองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้ากับส่วนที่อยู่รอบๆ ตัวมัน เมื่อไดอะแฟรมงอตัวเนื่องจากความเค้นแล้วค่าตัวเก็บประจุก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย

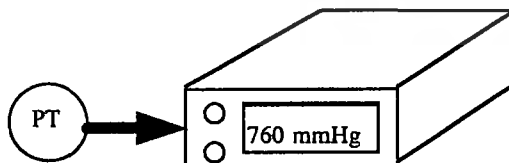
1.3 เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์พาสซีฟและอุปกรณ์แอคทีฟ ^[4]

- อุปกรณ์พาสซีฟจะไม่มีขยายสัญญาณ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ
- อุปกรณ์แอคทีฟเป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมแรงดัน หรือกระแสเพื่อให้เกิดการขยาย (gain) หรือ การเกิดสวิทชิง (switching action) ในวงจร เช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอด หลอดอิเล็กทรอนิกส์

1.4 แนวโน้มของการใช้งานหัววัดความดันทางด้านอุตสาหกรรมและการแพทย์

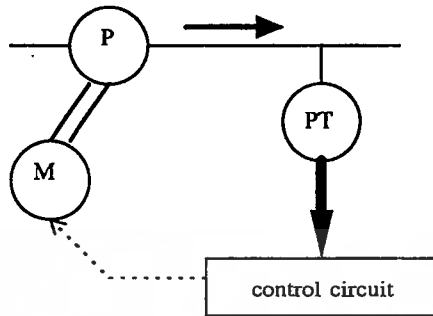
ในปัจจุบันนี้ความเจริญก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เป็นไปอย่างรวดเร็วมาก ดังนั้นจึงทำให้มีการพัฒนาอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรม และทางการแพทย์ที่เจริญก้าวหน้า โดยงานทางด้านนี้ก็จะใช้การควบคุมอัตโนมัติ จึงต้องมีตัวตรวจจับเพื่อเปลี่ยนสภาพการเปลี่ยนแปลงมาอยู่ในรูปสัญญาณที่ควบคุมได้ ดังนั้นทรานสดิวเซอร์ความดันจึงมีบทบาทมากในการรับรู้การเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้ในการควบคุม ดังตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานดังต่อไปนี้

- ใช้วัดความดัน (Pressure measurement)

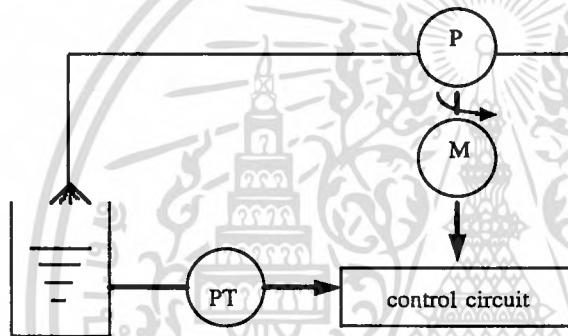


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้กับปั๊มความดัน หรือควบคุมอัตราการไหล (Pump pressure / Flow rate control)



- การควบคุมหรือวัดระดับของเหลว (Liquid level measurement / Control)



PT = อุปกรณ์ตัวรับรู้แรงดัน P = ปั๊ม M = มอเตอร์

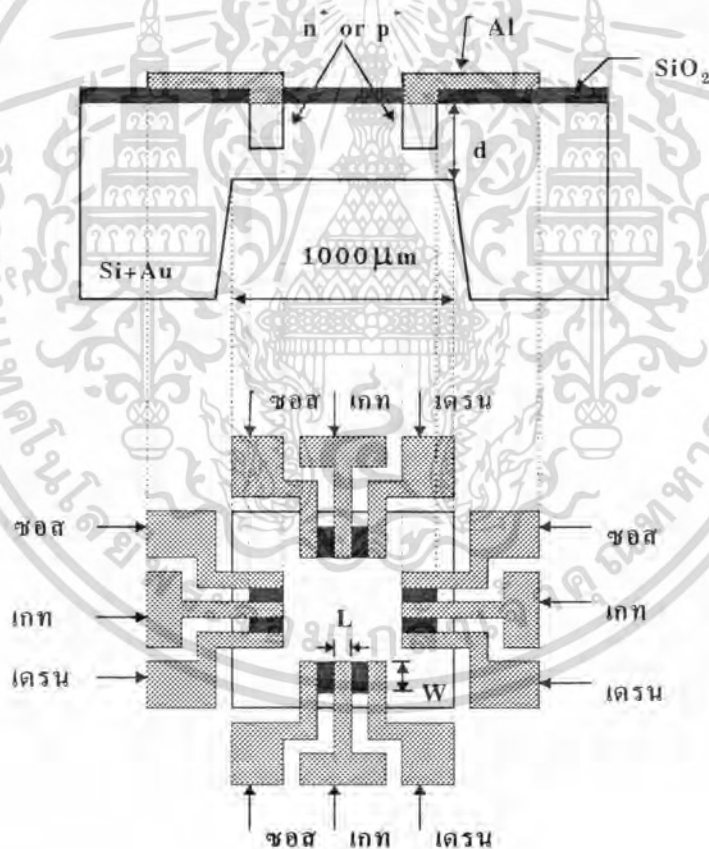
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET

ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีป และคุณสมบัติของ MOISFET ซึ่งปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีปเป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าพิคัดความต้านทานของเนื้อสาร เมื่อถูกกระทำด้วยความเค้น (stress) โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่สร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงดังรูปที่ 2.1-1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ฐานรองซิลิกอนส่วนใหญ่จะใช้ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ (100) และมีพื้นที่ที่มีความไวต่อความดันเป็นแผ่นไดอะแฟรมซิลิกอนบางๆ รูปสี่เหลี่ยมจตุรัส โดยได้จากการกัดฐานรองซิลิกอนด้วยสารละลายแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) ทรานซิสเตอร์ความดันโครงสร้างแบบ MOISFET ได้จากกระบวนการสร้าง MOISFET⁽¹⁾ ที่ผิวหน้าของไดอะแฟรม



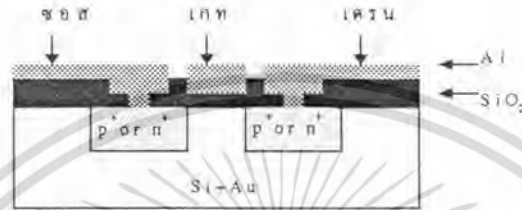
รูปที่ 2.1-1 แสดงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่สร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโครงสร้างในรูปที่ 2.1-1 พบว่าจะประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญคือ ทรานซิสเตอร์แบบ MOISFET กับไดอะแฟรม คุณสมบัติที่สำคัญของส่วนสำคัญนี้จะได้ทำการศึกษาคุณสมบัติต่อไป

2.2 โครงสร้างของ MOISFET ⁽¹⁾

โครงสร้างของ MOISFET (Metal Oxide Intrinsic Semiconductor Field Effect Transister) มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ชั้นคือ ชั้นฐานรองจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นระนาบ (100) ที่ทำการเติมอะตอมทองคำอย่างเหมาะสม ชั้นฉนวนเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้นโลหะตัวนำจะใช้โลหะอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.2-1



รูปที่ 2.2-1 แสดงโครงสร้างของ MOISFET

ลักษณะโครงสร้างของ MOISFET จะมีโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของ MOSFET ทั่วไป ต่างกันตรงที่ฐานรองของ MOISFET จะมีการเติมอะตอมทองคำเข้าไป โดยอะตอมทองคำนี้จะทำหน้าที่จับประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุส่วนมากในเนื้อสาร ทำให้เกิดศักย์ความต้านทานในชั้นฐานรองมีค่าสูงขึ้น และอะตอมทองคำยังทำให้อิเล็กตรอนในชั้นฐานรองมีค่าระดับพลังงานเฟอร์มิเป็น 0.62 eV จะเห็นว่าถ้าฐานรองได้รับการเติมอะตอมทองคำที่เหมาะสมจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ได้

นอกจากลักษณะโครงสร้างของ MOISFET กับ MOSFET มีลักษณะเหมือนกันแล้ว ลักษณะการทำงานยังเหมือนกันอีกด้วย กล่าวคือการทำงานจะอาศัยผลของสนามไฟฟ้าเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส โดยถ้าต้องการให้ทางเดินกระแสเป็นประจุโพลในการนำกระแสของ PMOISFET จะต้องป้อนแรงดันลบ (เมื่อเทียบกับฐานรอง) เข้าไปที่โลหะค้ำบน ซึ่งประจุลบที่ชั้นโลหะนี้จะเหนี่ยวนำประจุโพลในชั้นฐานรองให้ขึ้นมาอยู่ตรงบริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำกับฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ แต่ถ้าต้องการให้ทางเดินกระแสเป็นประจุอิเล็กตรอนในการนำกระแสของ NMOISFET จะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าบวก (เมื่อเทียบกับฐานรอง) เข้าไปที่โลหะค้ำบน ซึ่งประจุบวกที่ชั้นโลหะนี้จะเหนี่ยวนำประจุอิเล็กตรอนในชั้นฐานรองให้ขึ้นมาอยู่ที่บริเวณรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์

จากลักษณะข้างต้นจึงสรุปข้อดีของ MOISFET ได้ดังต่อไปนี้

1. มีค่าความต้านทานขาเข้าของทรานซิสเตอร์สูงมาก เนื่องจากโครงสร้างของส่วนควบคุมการนำกระแสจะถูกกั้นด้วยชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์
2. ขาเดรน (Drain) และขาซอส (Source) สามารถสลับกันได้ เพราะเป็นโครงสร้างแบบสมมาตร

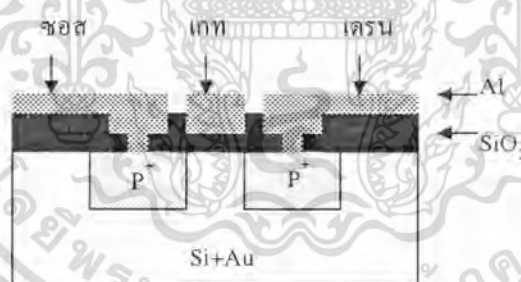
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไม่เกิดปรากฏการณ์วิ่งหนีความร้อน (Thermal Runaway) ภายในอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก
4. ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างซอสและฐานรอง
5. ประหยัดพื้นที่ในการสร้างเพราะสามารถสร้างทั้ง PMOSFET และ NMOSFET บนฐานรองเดียวกันโดยไม่ต้องมีบ่อแยก
6. ค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ MOISFET มีค่าน้อยกว่าใน MOSFET^{[5][6]} แต่โครงสร้างของ MOISFET ก็มีข้อเสียบางประการสามารถสรุปได้ดังนี้
 1. ไม่สามารถทำงานโดยใช้กระแสในการควบคุมการไหลของกระแสได้
 2. มีการทำงานที่กำลังต่ำๆ เท่านั้น
 3. มีค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (Transconductance (g_m)) ต่ำ

2.2.1 ทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหนด (PMOSFET)

การสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหนด จะกระทำโดยเติมอะตอมสารเจือชนิดพีเพื่อสร้างเป็นขั้วซอสและเดรนของทรานซิสเตอร์ชนิดพี ลงบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น ให้มีความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีมีค่าประมาณ 10^{15} ถึง 10^{16} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเติมสารเจือชนิดพีแล้วจึงเติมสารเจือทองคำเข้าไปที่ฐานรอง เมื่อสร้างเสร็จแล้วจะมีโครงสร้างภาพตัดขวางดังแสดงในรูปที่

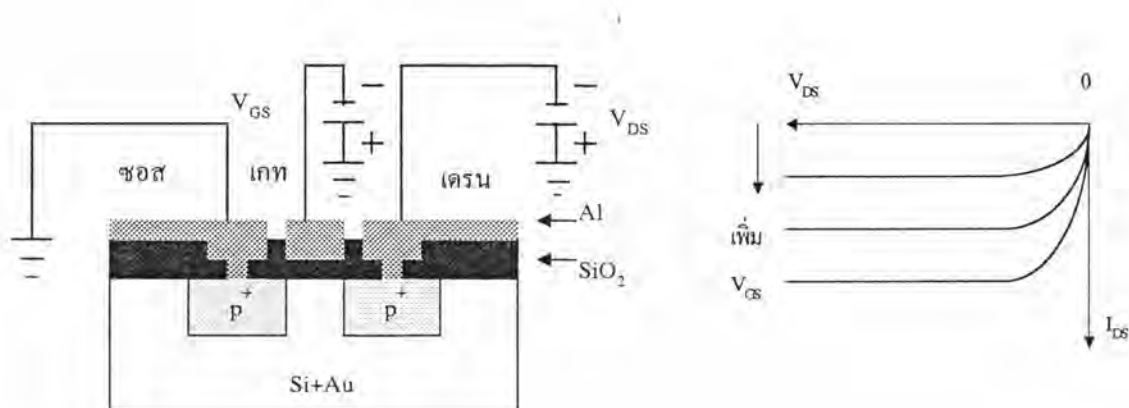
2.2-2



รูปที่ 2.2-2 แสดงโครงสร้างของ PMOSFET

การใช้งานจะกระทำโดยป้อนศักดาไฟฟ้าลบ (เมื่อเทียบกับฐานรอง) ที่ขั้วเกต จะทำให้โฮลมาออกทำให้เกิดช่องทางเดินกระแสขึ้นมา ถ้าศักดาไฟฟ้าที่เดรนมีค่าต่ำกว่าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วซอสก็จะเกิดกระแสโฮลไหลจากขั้วเดรนไปขั้วซอสได้ การทำงานแบบนี้จะเป็นแบบพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหนด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.2-3

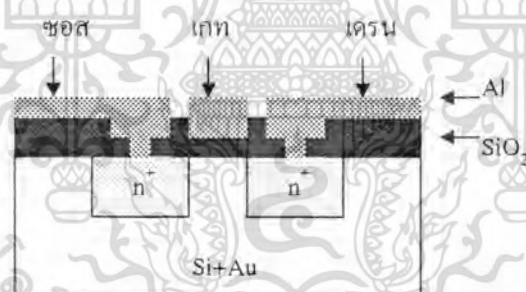
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2-3 แสดงการไบอัสของ PMOSFET

2.2.2 ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (NMOISFET)

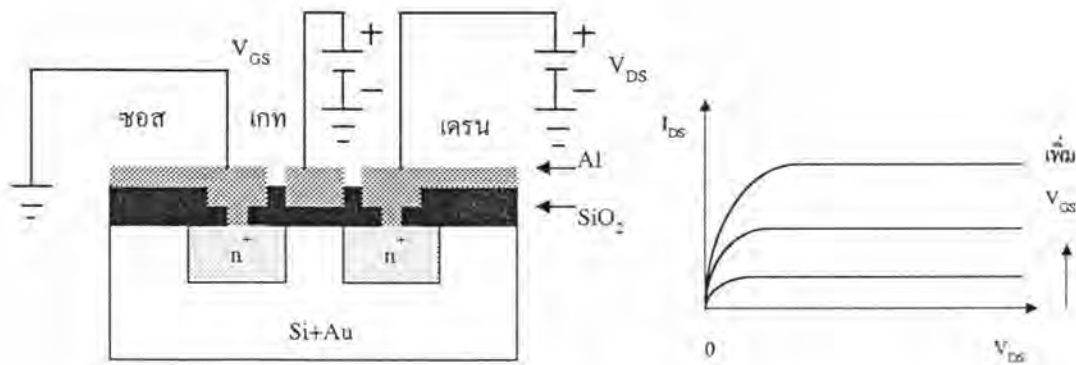
การสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด จะกระทำโดยเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เพื่อสร้างเป็นขั้วซอสและเดรนของทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นลงบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น ให้มีความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นมีค่าประมาณ 10^{15} ถึง 10^{16} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเติมสารเจือชนิดเอ็นแล้วจึงเติมสารเจือทองคำเข้าไปที่ฐานรอง เมื่อสร้างเสร็จแล้วจะมีโครงสร้างภาพตัดขวางดังแสดงในรูปที่ 2.2-4



รูปที่ 2.2-4 แสดงโครงสร้างของ NMOISFET

การใช้งานจะทำได้โดยป้อนศักดาไฟฟ้าบวก (เมื่อเทียบกับฐานรอง) ที่ขั้วเกต จะทำให้อิเล็กตรอนมาออกทำให้เกิดช่องทางการเดินกระแสขึ้นมา ถ้าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วเดรนมีค่าสูงกว่าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วซอส ก็จะทำให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนไหลจากขั้วซอสไปขั้วเดรนได้ การทำงานแบบนี้จะเป็นแบบ เอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2-5 แสดงการไบอัสของ NMOISFET

2.3 คุณสมบัติการทำงานของ MOISFET

2.3.1 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของ MOISFET

การพิจารณาในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะ NMOISFET เท่านั้น ส่วน PMOISFET นั้นจะมีคุณสมบัติการทำงานในลักษณะเดียวกัน แต่เครื่องหมายและทิศทางที่ใช้จะเป็นตรงกันข้าม และสมการกระแสของ MOISFET ก็จะมีลักษณะเดียวกับสมการกระแสของ MOSFET

การทำงานของ MOISFET สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง โดยพิจารณาจากค่าแรงดันตกคร่อมขั้วเกตกับขั้วซอส (V_{GS}) ค่าแรงดันตกคร่อมขั้วเดรนและขั้วซอส (V_{DS}) และค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ซึ่งลักษณะการไบอัสเป็นไปดังรูปที่ 2.2-5 ซึ่งจะแบ่งได้ดังนี้

1. ช่วงไม่ทำงาน (Cutoff Region)

การทำงานของ MOISFET ในช่วงนี้เกิดจาก V_{GS} มีค่าน้อยกว่า V_T ทำให้ไม่สามารถที่จะเหนี่ยวนำประจุให้เกิดช่องทางเดินกระแส ทำให้ไม่มีกระแสไหล ดังนั้นสมการการไหลของกระแสจะเป็นดังนี้

$$I_{DS} = 0 \quad ; \quad V_{GS} < V_T \quad (2.3-1)$$

2. ช่วงไม่อิ่มตัว (Nonsaturated Region)

การทำงานในช่วงนี้บางที่เรียกว่าเป็นการทำงานในช่วงเชิงเส้น (Linear Region) จะเกิดขึ้นเมื่อ V_{DS} มีค่าน้อยกว่า $V_{GS} - V_T$ การไหลของกระแสจะเป็นเชิงเส้นกับ V_{DS} ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีสมการการไหลของกระแสเป็นดังนี้

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad ; \quad V_{DS} < V_{GS} - V_T \quad (2.3-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ I_{DS} คือค่ากระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสของ MOISFET

β คือค่า devices transconductance parameter

$$= k'(W/L)$$

k' คือค่า process transconductance parameter

$$= \mu_{Au} \cdot C_{ox}$$

μ_{Au} คือค่าความคล่องตัวที่ผิวของประจุพาหะที่ใช้ในการนำกระแสของ MOISFET มีค่า

$150 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ สำหรับประจุโฮล และมีค่า $65 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ สำหรับประจุอิเล็กตรอน

C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าที่เกตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$= \epsilon_{ox}/T_{ox}$$

ϵ_{ox} มีค่า $3.9\epsilon_0$ โดยที่ 3.9 เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ และ ϵ_0

เป็นค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (Permittivity of free space) มีค่า $8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$

T_{ox} คือค่าความหนาของชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ที่บริเวณช่องทางเดินกระแสของ MOISFET

W คือค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแสของ MOISFET

L คือค่าความยาวของช่องทางเดินกระแสของ MOISFET

3. ช่วงอิ่มตัว (Saturated Region)

การทำงานในช่วงนี้เกิดขึ้นเมื่อ V_{DS} มีค่ามากกว่า $V_{GS} - V_T$ ช่วงนี้ประจุพาหะในช่องทางเดินกระแสจะมีค่าคงที่ ในขณะที่ V_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสมการการไหลของกระแสเป็นดังนี้

$$I_{DS} = \left(\frac{\beta}{2}\right)[V_{GS} - V_T]^2 \quad ; \quad V_{DS} > V_{GS} - V_T \quad (2.3-3)$$

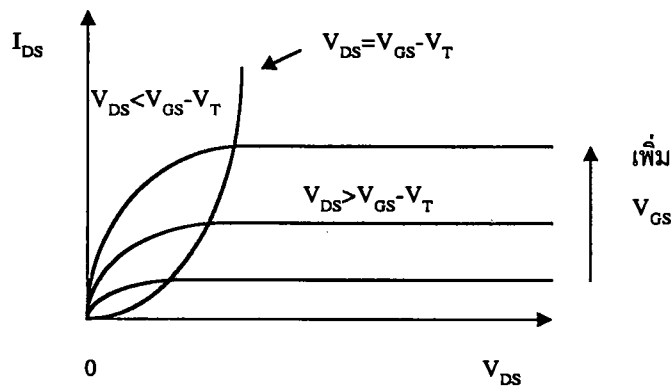
ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันเป็นไปดังรูปที่ 2.3-1

2.3.2 ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T)

แรงดันขีดเริ่ม (V_T) คือแรงดันที่ให้ไปอัสที่เกตเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับ (inversion layer) พอดี โดยแรงที่ป้อนให้ที่เกตนี้จะเพียงพอที่จะเอาชนะค่าฟังก์ชันงาน (work function) ต่างๆ ได้ คุณสมบัติความสัมพันธ์ของแรงดันขีดเริ่มเป็นดังนี้

$$V_T = V_{FB} + \phi_F + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{Si}N(\phi_F)} \quad (2.3-4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ NMOISFET

เมื่อ V_{FB} คือแรงดันแถบราบ (flat band voltage)

C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าที่เกตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

ϵ_{si} มีค่า $11.7 \epsilon_0$

q มีค่า $1.6 \times 10^{-19} \text{ c}$

N คือจำนวนประจุในฐานรอง (ประจุที่ใช้ในการนำกระแสของ MOISFET ที่กำลังพิจารณาอยู่)

ϕ_F คือค่าพลังงานจากระดับพลังงานของฐานรองถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนหรือโฮลที่กำลังนำกระแสอยู่

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{1}{C_{ox}} (Q_{ox} + Q_{ss}) \quad (2.3-5)$$

$$\phi_{MS} = \phi_M - \phi_s \quad (2.3-6)$$

เมื่อ ϕ_{MS} คือฟังก์ชันงานระหว่างเกตโลหะกับชั้นซิลิกอน

ϕ_M คือความต่างศักรีระหว่างขบล่างของแถบความนำซิลิกอนไดออกไซด์ กับระดับพลังงานเฟอร์มิของเกตโลหะ (ในที่นี้เป็นอลูมิเนียม) จะมีค่า 3.2 V

ϕ_s คือความต่างศักรีระหว่างขบล่างของแถบความนำซิลิกอนไดออกไซด์ กับระดับพลังงานเฟอร์มิในชั้นซิลิกอน

$$\phi_s = \phi_{so} + \left(\frac{E_g}{2} + \phi_F \right) \quad (2.3-7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ_{so} คือความต่างศักย์ระหว่างขอบของแถบความนำซิลิกอนไดออกไซด์ กับขอบของแถบความนำซิลิกอนมีค่า 3.25 V

E_g คือความกว้างของระดับพลังงานในแถบต้องห้ามของซิลิกอน มีค่า 1.1 eV ที่อุณหภูมิ 300 K

$$\phi_{Fe} = E_{Fe} - 0.62 \quad (2.3-8)$$

$$\phi_{Fh} = 0.62 - E_{Fh} \quad (2.3-9)$$

$$E_{Fe} = E_c - kT \ln(N_c/N_e) \quad (2.3-10)$$

$$E_{Fh} = E_v - kT \ln(N_v/N_h) \quad (2.3-11)$$

เมื่อ E_c และ E_v คือค่าระดับพลังงานของชั้นแถบความนำ (conduction band) และชั้นแถบวาเลนซ์ (valance band) ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนมีค่า 1.12 eV และ 0 eV ตามลำดับ

k คือค่าคงที่ของโบสมานต์มีค่า 1.38×10^{-23} J/K

T คือค่าของอุณหภูมิ (K)

N_c และ N_v คือปริมาณประจุที่อยู่ในชั้นแถบความนำ และชั้นแถบวาเลนซ์ ตามลำดับ โดยทั่วไปในแผ่นซิลิกอนจะมีปริมาณ 2.9×10^{19} และ 1.04×10^{19} ประจุตามลำดับ

$$N_c = (\rho q \mu_{nAu})^{-1} \quad (2.3-12)$$

$$N_h = \frac{n_i^2}{N_e} \quad (2.3-13)$$

เมื่อ N_c และ N_h คือค่าปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในเนื้อสารตามลำดับ

ρ คือค่าพิถัดความต้านทานของชิ้นสาร

μ_{nAu} คือค่าความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอนในเนื้อสารซิลิกอนชนิดเอ็นที่เดิมอะตอมทองคำ

n_i คือปริมาณประจุพาหะอิเล็กตรอนหรือโฮลในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ มีค่า 1.45×10^{10} อะตอมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 แรงดันพังทลาย ^{[6] [7]}

แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage ; V_{BV}) เป็นการแสดงถึงความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด ในการใช้งานกับวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ เมื่อเกิดแรงดันพังทลายขึ้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ จนไม่สามารถควบคุมได้ และจะเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ได้ โดยทั่วไปสามารถแบ่งแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เป็น 4 ชนิดคือ

1. แรงดันพังทลายแบบอะวอลานช์ (Avalanche Breakdown Voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลดพาหะ เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้น ทำให้พาหะอิสระที่วิ่งผ่านบริเวณปลดพาหะมีพลังงานมากพอ จนทำให้เกิดการชนกับอะตอมภายในบริเวณปลดพาหะ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนกับโฮลขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นทวีคูณ จนไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ โดยปกติแล้วแรงดันพังทลายแบบอะวอลานช์จะเกิดขึ้นในขณะที่รอยต่อได้รับการไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงๆ

2. แรงดันพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown Voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นกับรอยต่อที่มีบริเวณปลดพาหะแคบมากๆ เมื่อรอยต่อนี้ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงพอ (มีค่าประมาณ 10^6 V/cm) ที่ทำให้พาหะอิสระได้รับพลังงานมากจนเกิดปรากฏการณ์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ เกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับจำนวนมากผ่านรอยต่อ

3. แรงดันพังทลายแบบพันซ์ทรู (Punch-through Breakdown Voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดจากการขยายของบริเวณปลดพาหะเมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ จนทะลุผ่านถึงรอยต่ออีกด้านหนึ่ง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ

4. แรงดันพังทลายของไดอิเล็กตริก (Dielectric Breakdown Voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าบริเวณชั้นไดอิเล็กตริกมีค่าสูงเกินกว่าที่ชั้นไดอิเล็กตริกจะทนได้ เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านชั้นไดอิเล็กตริกได้

การศึกษาผลของความดันต่อค่าแรงดันพังทลายของ MOSFET ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะไม่สนใจว่าเกิดการพังทลายแบบใด แต่จะสนใจเพียงว่าความดันนั้นทำให้ค่าแรงดันพังทลายเปลี่ยนไปหรือไม่

ถ้าพิจารณาเป็นรอยต่อพีเอ็น เมื่อป้อนแรงดันย้อนกลับแก่รอยต่อพีเอ็น จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลดประจุพาหะ และสนามไฟฟ้าบริเวณปลดประจุพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้บริเวณปลดพาหะมีการขยายมากขึ้น และสนามไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะทำให้เกิดการพังทลายของรอยต่อ ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ค่าของสนามไฟฟ้า(ξ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-qN_D}{\epsilon_{Si}}(x_n - x) \quad (2.3-14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x_n เป็นค่าความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะในด้านเอ็นมีค่าดังนี้

$$x_n = \left[\frac{2\epsilon_{Si}}{q} (V_{bi} - V_A) \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \right]^{1/2} \quad (2.3-15)$$

V_{bi} คือ Built-in Voltage

$$= \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right]$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ $x = 0$ จะได้

$$\xi(0) = - \left[\frac{2q}{\epsilon_{Si}} (V_{bi} - V_A) \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)} \right]^{1/2} \quad (2.3-17)$$

ถ้าให้สนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้า Avalanche Breakdown (ξ_{CR}) และให้ค่า $V_A = V_{BV}$ คือค่าแรงดันย้อนกลับ จะได้

$$V_{BV} \cong \left(\frac{\xi_{CR}^2 \epsilon_{Si}}{2q} \right) \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] \quad (2.3-18)$$

ξ_{CR} ของซิลิกอนมีค่าประมาณ 2×10^5 V/cm ถึง 8×10^5 V/cm ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการโด๊ป ϵ_{Si} มีค่า $11.7\epsilon_0$

ϵ_0 คือค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity of free space) เท่ากับ 8.854×10^{-14} F/cm

q คือค่าประจุของอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.6×10^{-19} C

N_D คือค่าความหนาแน่นของประจุพาหะในด้านเอ็น

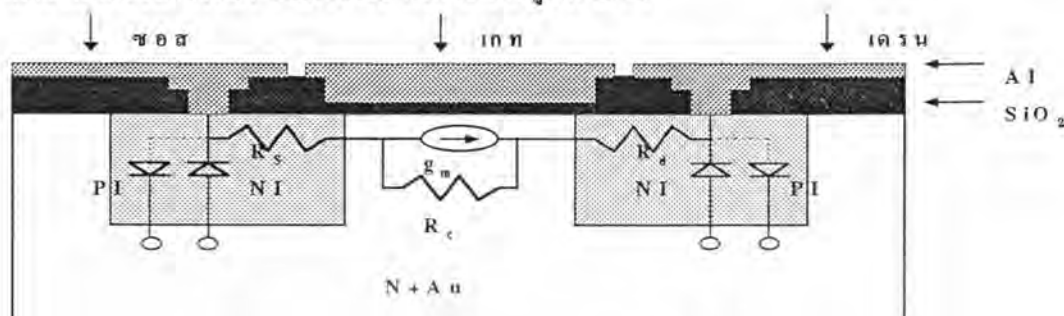
2.4 แบบจำลองของ MOISFET ^[8]

แบบจำลองของ MOISFET จะใช้เป็นตัวแทนของ MOISFET ในการคำนวณค่าต่างๆ ในวงจร ก่อนทำการสร้างวงจรจริง และแบบจำลองของ MOISFET ยังช่วยในการวิเคราะห์การทำงานภายในได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์จะทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 แบบคือ แบบจำลองทางไฟตรง และแบบจำลองทางไฟสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 แบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET

พิจารณาโครงสร้างทั่วไปของ MOISFET เมื่อให้ไฟตรงเข้าไป พบว่าจะมีโครงสร้างแฝงเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของ MOISFET ดังแสดงในรูปที่ 2.4-1

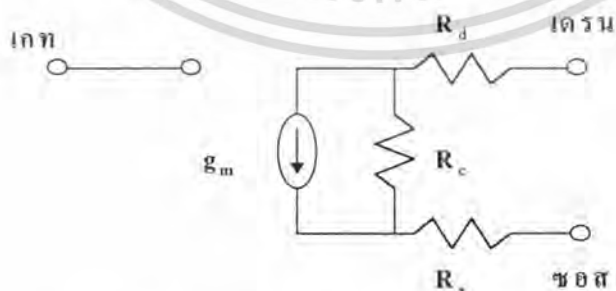


รูปที่ 2.4-1 แสดงภาพตัดขวางของ MOISFET ที่มีโครงสร้างอื่นแฝงอยู่ เมื่อพิจารณาแบบไฟตรง

จากรูปที่ 2.4-1 สามารถสรุปโครงสร้างแฝงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ MOISFET เมื่อพิจารณาแบบไฟตรงได้ดังนี้

1. ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากขั้วซอส (R_s) และขั้วเดรน (R_d) ของ MOISFET
2. แหล่งกำเนิดกระแส (g_m) (ถูกควบคุมโดยแรงดันที่เกต และแรงดันตกคร่อมขั้วซอสและขั้วเดรน) ซึ่งมีความต้านทานภายใน (R_c)
3. ไดโอดที่เกิดจากรอยต่อขั้วซอสและขั้วเดรนของ MOISFET กับฐานรอง (เป็น PI ไดโอดเมื่อเป็น PMOSFET และเป็น NI ไดโอดเมื่อเป็น NMOISFET)

จากโครงสร้างแฝงที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ชนิดพบว่า ในขณะที่ใช้งานจริงไดโอดที่เกิดจากรอยต่อขั้วซอสและขั้วเดรนของ MOISFET จะไม่ค้ำเนื่องถึง เพราะในกรณีใช้งานนั้นที่ฐานรองของ MOISFET ไม่สามารถต่อศักดาไฟเลี้ยงหรือลงกราวด์ได้ ดังนั้น ไดโอดที่เกิดจากรอยต่อขั้วซอสและขั้วเดรนของ MOISFET จึงไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของ MOISFET จึงสรุปได้ว่าวงจรที่ใช้แทนแบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET จะเป็นดังรูป ที่ 2.4-2

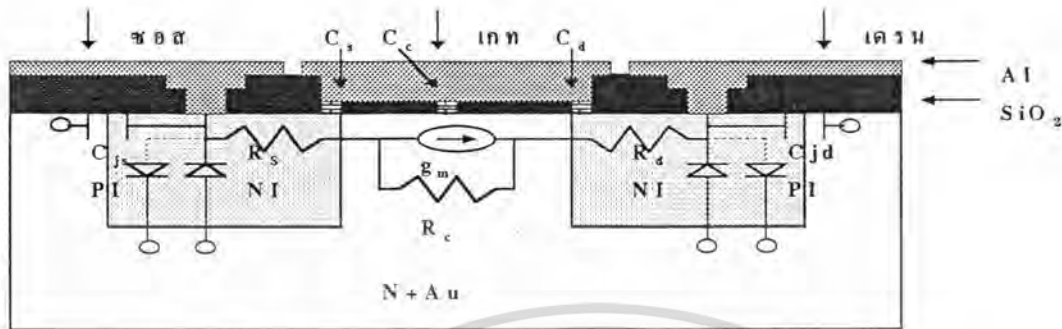


รูปที่ 2.4-2 แสดงแบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 แบบจำลองทางฟิสิกส์ของ MOISFET

พิจารณาโครงสร้างทั่วไปของ MOISFET เมื่อให้โพลีซิลิโคนเข้าไปพบว่าจะมีโครงสร้างแฝงเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของ MOISFET ดังแสดงในรูปที่ 2.4-3

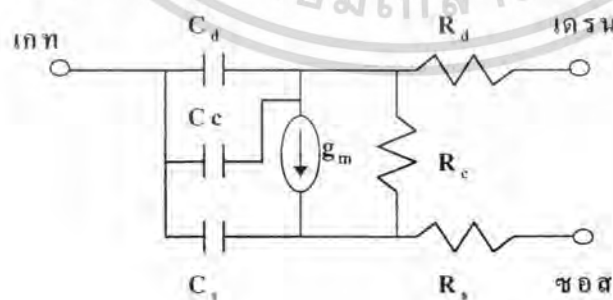


รูปที่ 2.4-3 แสดงภาพตัดขวางของ MOISFET ที่มีโครงสร้างอื่นแฝงอยู่ เมื่อพิจารณาแบบโพลีซิลิโคน

จากรูปที่ 2.4-3 สามารถสรุปโครงสร้างแฝงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ MOISFET เมื่อพิจารณาแบบโพลีซิลิโคน จะมีโครงสร้างแฝงที่เพิ่มขึ้นมาจากการพิจารณาแบบโพลีซิลิโคนดังนี้

1. ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการออกแบบขั้วเกตที่เกินเข้าไปบนขั้วซอส (C_s) และบนขั้วเดรน (C_d) (gate overlap design) โดยทั่วๆ ไปแล้วส่วนเกินในแต่ละด้านจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าความจุ C_s และ C_d ส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากัน
2. ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วเกตกับฐานรองบริเวณช่องทางเดินกระแสของ MOISFET (C_c)
3. ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากรอยต่อของฐานรองกับขั้วซอส (C_{js}) และขั้วเดรน (C_{jd})

จากโครงสร้างแฝงที่เกิดขึ้น 3 ชนิดนี้ พบว่าจะไม่คำนึงถึงค่า C_{js} และ C_{jd} เพราะในขณะที่ใช้งานนั้นที่ฐานรองของ MOISFET ไม่สามารถต่อสัปดาห์ไฟเลี้ยงหรือลงกราวด์ได้ ดังนั้น C_{js} และ C_{jd} จึงไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของ MOISFET จึงสรุปได้ว่าวงจรที่ใช้แทนแบบจำลองทางฟิสิกส์ของ MOISFET จะเป็นดังรูปที่ 2.4-4



รูปที่ 2.4-4 แสดงแบบจำลองทางฟิสิกส์ของ MOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเขียนพลังงานในรูปของโมเมนตัมจะได้ว่า

$$E = p^2/2m \quad (2.5-4)$$

เมื่อพล็อตค่าพลังงานในรูปโมเมนตัมจะเป็นรูปพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 2.5-1 (ก) ซึ่งแสดงด้วยเส้นประ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในผลึกเป็นคาบ ค่านี้จะเปลี่ยนไปเนื่องจากผลจากการเป็นคาบนี้เอง ซึ่งผลนี้ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องที่โมเมนตัมบางจุดบนกราฟ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E และโมเมนตัมแสดงดังรูปที่ 2.5-1 (ข) ซึ่งแสดงด้วยเส้นทึบ กราฟดังกล่าวจะเป็นกรณีเฉพาะในหนึ่งมิติเท่านั้น



รูปที่ 2.5-1 (ก) พลังงาน E เป็นฟังก์ชันของโมเมนตัม p สำหรับหลักการพื้นฐาน (เส้นประ) และเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น k ด้วยธรรมชาติของอนุภาค (ข) ส่วนที่แสดงค่าที่เป็นไปได้ของแถบความนำ แถบต้องห้ามและแถบวาเลนซ์

ในวิชากลศาสตร์ควอนตัมมักแสดงค่าโมเมนตัมด้วยเลขคลื่น (wave number) k ซึ่งมีความสัมพันธ์

ดังนี้

$$p = \hbar k/2\pi \quad (2.5-5)$$

เมื่อ \hbar เป็นค่าคงที่ของพลังค์ จากรูปที่ 2.5-1 (ก) จะเห็นว่าเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นที่จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = n\pi/a \quad , n = -1, -2, \dots \text{ และ } n = +1, +2, \dots \quad (2.5-6)$$

เมื่อ a เป็นค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) กรณีที่ค่ามากๆ จากสมการ (2.5-6) เส้นประกับเส้นทึบจะเริ่มทับกันซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนเหล่านี้ประพฤติตนเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ตามเมื่อค่า k เข้าใกล้ $n\pi/a$ พลังงานส่วนนั้นจะเป็นพลังงานต้องห้าม ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเรโซแนนซ์ของผลึก

การเกิดเป็นคาบของแถบต้องห้ามนั้น เกิดจากรวมกันของอิเล็กตรอนที่มีความเป็นคลื่นเคลื่อนที่ไปมาในผลึก มีค่า k ใดๆ อิเล็กตรอนจะถูกกระเจิงโดยคาบของผลึก และอาจจะมีการสะท้อนกลับ

ถ้าพิจารณาบริเวณช่วงกลางของกราฟรูปที่ 2.5-1 (ข) จะเห็นว่าไม่ว่าค่า k จะเป็นเท่าใด จะเกิดแถบพลังงานยินยอม (allowed band) ขึ้นสองที่ ระหว่างแถบทั้งสองนี้เรียกว่า แถบต้องห้าม ในสารกึ่งตัวนำ แถบที่อยู่ด้านล่างจะเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งเกือบจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม ส่วนแถบบนเรียกว่า แถบความนำ (conduction band) ซึ่งแทบจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E และ k ที่เป็นไปตามรูปที่ 2.5-1 (ข) นั้นเป็นเพียงความสัมพันธ์ในหนึ่งมิติเท่านั้น ในสารกึ่งตัวนำแบบสามมิติเช่นซิลิกอนนั้นจะเป็นไปแบบยุ่งยากมากกว่านี้ การคำนวณโดยละเอียดเพื่อหาโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นสิ่งที่ยับยั้งมานาน การแก้ปัญหาเพื่อให้เข้าใจต้องยึดความจริงที่ว่าผลึกนั้นจะมีความสมมาตรสูง ที่ทิศทางความสมมาตรหนึ่งๆ ก็จะหาคำตอบได้ ในขณะที่ทิศทางอื่นๆ สมมติว่าพลังงานจะเปลี่ยนไปอย่างราบรื่น ได้มีการคำนวณแถบพลังงานของซิลิกอนในทิศทาง $[100]$ ถึง $[111]$ ในรูปที่ 2.5-2(ก) และ 2.5-2(ข) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างแถบพลังงานซิลิกอน ซึ่งจะอธิบายปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีฟได้ การศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานที่เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น จะแสดงด้วยจุดต่ำสุดของแถบความนำในทิศทาง $[100]$ จะเห็นว่าไม่เท่ากับศูนย์ จากความสมมาตรของผลึกซิลิกอนจะพบว่าจุดต่ำสุดของพลังงานที่ทิศทาง $[100]$, $[\bar{1}00]$, $[010]$, $[0\bar{1}0]$, $[001]$ และ $[00\bar{1}]$ รูปแบบนี้เรียกว่า one-band many-valley model

ในสภาวะปกติจุดที่มีพลังงานต่ำสุดของแถบความนำมีค่าเท่ากับ 1.1 eV เหนือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนในแถบความนำนั้นส่วนมากมาจากอะตอมผู้ให้ แต่บางส่วนจะมาจากการกระตุ้นด้วยความร้อนขึ้นมาจากแถบวาเลนซ์

จากรูปที่ 2.5-2 จะเห็นว่าพลังงาน E รอบๆ จุดต่ำสุดจะเป็นฟังก์ชันของ k ในทิศทาง $[100]$ อย่างไรก็ตามที่น่าสนใจว่าที่ทิศทาง $[010]$ และ $[001]$ นั้นพลังงาน E รอบๆ จุดต่ำสุดจะเป็นฟังก์ชันของ k ใดๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้ แต่ผลการคำนวณจะไม่เขียนเป็นกราฟได้ง่ายๆ แบบรูปที่ 2.5-2 ในการที่จะทราบถึงโครงสร้างพลังงานในสามมิติ มักจะพล็อตเป็นผิวพลังงานที่เท่ากันใน k -space ดังในรูปที่ 2.5-3 เป็นไดอะแกรมของแถบความนำในซิลิกอน จะเห็นว่าพื้นผิวสามอันเป็นรูปทรงรี ซึ่งแกนยาวจะไปตามแกนหลักของผลึก การที่เป็นรูปทรงรีนี้เองเป็นสาเหตุในการเกิดปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีฟในซิลิกอน

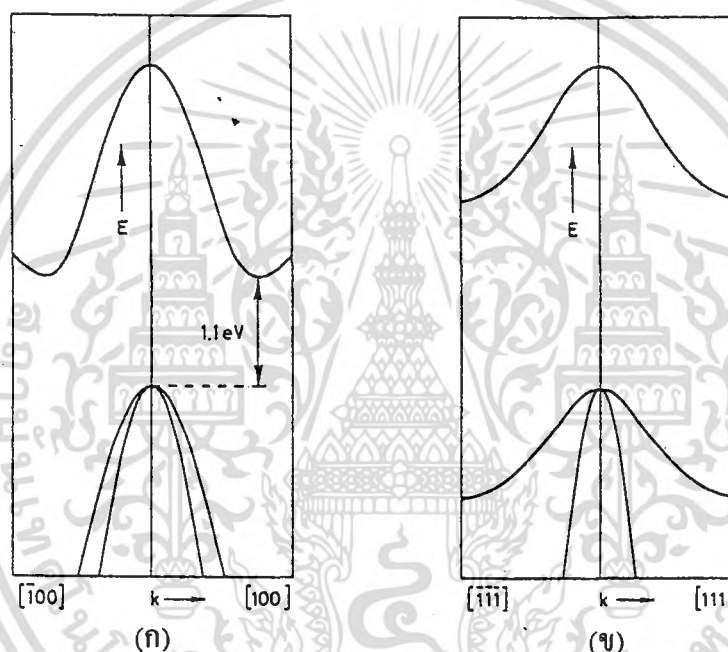
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจะอธิบายได้ต้องกลับไปที่สมการที่ 2.5-2 ในสมการนี้พลังงานจะขึ้นกับมวลและโมเมนตัมของอนุภาค ถ้าทราบพลังงาน E และโมเมนตัม p ก็สามารคว่านมวลด้วยการดิฟเฟอเรนเชียลสองครั้งตามสมการ

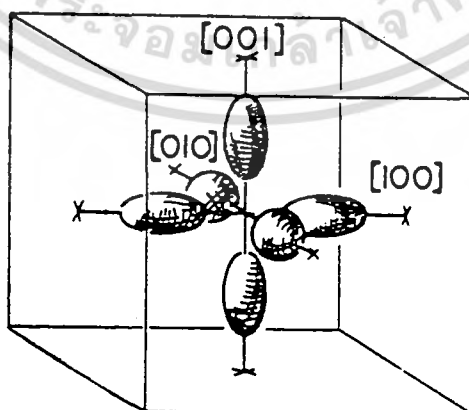
$$m^* = \frac{1}{(d^2 E / dp^2)} \quad (2.5-7)$$

ในวิชาทศศาสตร์ควอนตัมก็จะเขียนมวลในรูปเลขคลื่นดังนี้

$$m^* = \frac{h^2}{4\pi^2} \frac{1}{(d^2 E / dk^2)} \quad (2.5-8)$$



รูปที่ 2.5-2 โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน (ก) ทิศทาง [100] (ข) ทิศทาง [111]



รูปที่ 2.5-3 constant-energy ellipsoids ใน k-space ใกล้จุดต่ำสุดในแถบความนำของซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความรู้ตรงนี้ จะคำนวณมวลยังผลของอิเล็กตรอนในจุดต่ำสุดทั้งหก จะพบสิ่งที่น่าสนใจอย่างหนึ่งว่ามวลของอิเล็กตรอนจะไม่เท่ากันเลขในทิศทางต่างๆ กัน ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปตามทิศทาง [010] หรือ [001] ทรงรีในทิศทาง [100] จะต่ำลง อิเล็กตรอนในทิศทางนี้จะมีมวลยังผลสูงขึ้น มวลยังผลนี้จะขึ้นกับทิศทางการเคลื่อนที่ของมันว่าจะไปในทิศทางไหนของผลึก ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปตามทิศทาง [100] บางอิเล็กตรอนที่อยู่ตรงจุดต่ำสุดในทิศทาง [010] และ [001] จะเคลื่อนที่เข้ามายังทิศทาง [100] แต่จะมีมวลน้อยกว่า (ดูรูปที่ 2.5-1) โดยทั่วไปการนำไฟฟ้าตามแกนหลักหนึ่งๆ นั้นจะขึ้นกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งสองในสามเป็นอิเล็กตรอนที่มีมวลเบา และหนึ่งในสามเป็นอิเล็กตรอนที่มีมวลมากขึ้น การที่จะเข้าใจกระบวนการนำไฟฟ้าว่าขึ้นกับค่ามวลได้อย่างไร จะเริ่มจากความสัมพันธ์ของมวลยังผล m^* และความคล่องตัว (mobility(μ)) ของอิเล็กตรอนดังนี้^{[9][12]}

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} = \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right)^{-1} \quad (2.5-9)$$

เมื่อ τ เป็นเวลาเฉลี่ยของการชนเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแลตทิซ

μ_1 คือความคล่องตัวเนื่องจาก acoustic phonon

$$= \frac{\sqrt{8\pi q \hbar^4 c_{11}}}{3E_{ds} m^{*5/2} (KT)^{3/2}} \approx (m^*)^{-5/2} T^{-3/2} \quad (2.5-9.1)$$

C_{11} เป็นค่าคงที่ความยืดหยุ่นตามแนวยาวเฉลี่ยของสารกึ่งตัวนำ

E_{ds} เป็นการแทนที่ของขอบของแถบต่อการยืดหนึ่งหน่วย (unit delation) ของผลึก

μ_2 คือความคล่องตัวเนื่องจากสารเจือถูก ไอออนไนซ์

$$= \frac{64\sqrt{\pi} \epsilon_s^2 (2KT)^{3/2}}{N_i q^3 m^{*1/2}} \left\{ \ln \left[1 + \left(\frac{12\pi \epsilon_s KT}{q^2 N_i^{1/3}} \right)^2 \right] \right\}^{-1} \quad (2.5-9.2)$$

$$\approx (m^*)^{-1/2} N_i^{-1} T^{3/2}$$

N_i เป็นความหนาแน่นสารเจือที่ถูกไอออนไนซ์

ϵ_s เป็นค่า permittivity ของซิลิกอน

จะเห็นว่าถ้ามวลเบาว่าก็จะมี การเคลื่อนที่ได้ดีกว่า

สำหรับสารชนิดเอ็นสภาพความนำ (conduction) จะแสดงได้ดังนี้

$$\sigma = nq\mu \quad (2.5-10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการนำไฟฟ้าที่แท้จริงแล้วขึ้นกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสองชนิดคือมวลเบากับมวลหนักดังนี้

$$\sigma = (2/3)nq\mu_{\perp} + (1/3)nq\mu_{\parallel} \quad (2.5-11)$$

เมื่อ μ_{\perp} เป็นความคล่องตัวตามแกนสั้นของทรงรี

μ_{\parallel} เป็นความคล่องตัวตามแกนยาวของทรงรี

ค่าเฉลี่ย μ จะเป็นดังนี้

$$\mu = (2\mu_{\perp} + \mu_{\parallel})/3 \quad (2.5-12)$$

2.5.2 ปฏิกิริยาไอโซทรอปิกในซิลิกอนชนิดเอ็น^[2]

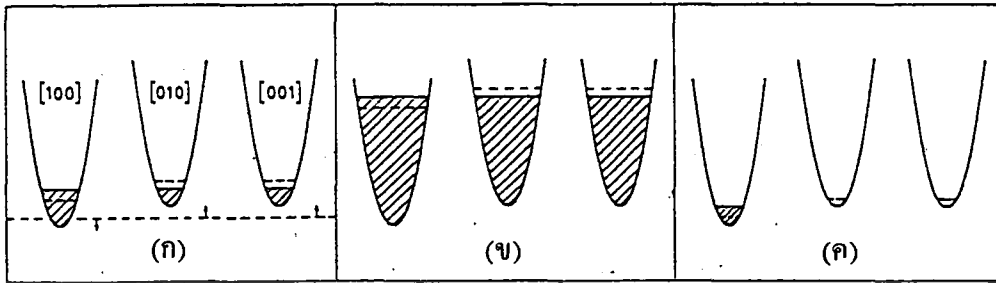
เพื่อที่จะเข้าใจปรากฏการณ์ไอโซทรอปิกในซิลิกอนชนิดเอ็น จำเป็นต้องศึกษาว่าโครงสร้างแถบพลังงานนั้นมีผลกระทบจากแรงภายนอกอย่างไร แถบต้องห้ามนั้นเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีธรรมชาติคล้ายคลื่นที่เป็นคาบภายในผลึก เมื่อมีแรงกดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) มากกระทำในทิศทาง [100] ระดับพลังงานต่ำสุดของทรงรีตามทิศทาง [100] จะต่ำลง แต่ระดับพลังงานต่ำสุดในอีกสองทิศทางจะสูงขึ้น อิเล็กตรอนจะมีการจัดเรียงตัวใหม่ไปตามจุดต่ำสุดทั้งหมด จะมีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในทิศทาง [100] ซึ่งได้มาจากจุดต่ำสุดของที่อื่น สมการที่ 2.5-12 จะใช้ไม่ได้อีก ค่าความคล่องตัวเฉลี่ยในทิศทาง [100] จะลดลงเมื่อมีแรงมากกระทำในทิศทางนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5-4 การกดในทิศทาง [100] จะไปลดช่องว่างของแถบที่สตามแกนนี้ทำให้เกิดความเครียดลบ (negative strain) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของผลึกในทิศทาง [100]

ค่าเฉลี่ยของความคล่องตัวหรือการนำไฟฟ้าในทิศทาง [100] จะลดลงเนื่องจากแรงอัดจากภายนอกทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น ค่าความเครียดจะเป็นลบ และการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานสัมพัทธ์จะเป็นบวก ซิลิกอนชนิดเอ็นจะให้ค่าแกจเฟคเตอร์เป็นลบซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

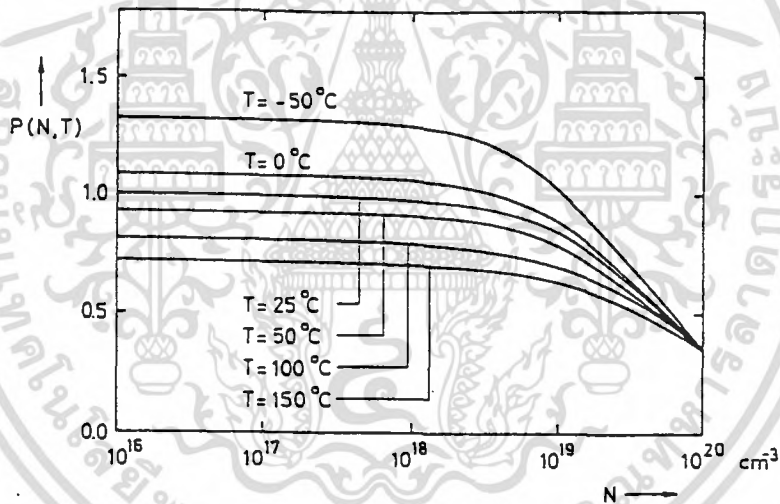
มีการทดลองสองประการแสดงไว้ ประการแรก ค่าแกจเฟคเตอร์ K จะขึ้นกับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ค่าแกจเฟคเตอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของอะตอมสารเจือเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5-5 ซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้คือ จากสมการที่ 2.5-1 ค่าแกจเฟคเตอร์เป็นค่าการหารการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความต้านทานต่อค่าความเครียด เมื่อเจือสารชนิดเอ็นที่เข้มข้นมาก อิเล็กตรอนจำนวนมากจะเข้าไปจับของสถานะพลังงานต่างๆ ไว้ เมื่อมีแรงอัดเข้ามาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานซึ่งขึ้นกับขนาดแรงที่อัดเท่านั้น อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่จากที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาซึ่งที่มีพลังงานต่ำกว่าจนกระทั่งถึงจุดสมดุลอีกครั้ง เมื่อมีอิเล็กตรอนอยู่จำนวนมากแล้วจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกแทนที่ก็จะน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดค่าแกจเฟคเตอร์น้อย (ดูรูปที่ 2.5-4(ข)) ในสารที่มีการเจือสารชนิดอื่นน้อยๆ (ดูรูปที่ 2.5-4(ค)) อิเล็กตรอนจำนวนมากที่ถูกแทนที่จะมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนทั้งหมดทำให้แกจเฟคเตอร์สูง



รูปที่ 2.5-4 (ก) การเปรียบเทียบในทิศทาง [100] ที่เวลลีย์ [100] พลังงานน้อยสุดเป็นส่วนที่ต่ำสุด และที่เวลลีย์ [010] และเวลลีย์ [001] ส่วนที่ต่ำสุดถูกยกขึ้น อิเล็กตรอนจะไหลจากเวลลีย์ [010] และ [001] ไปยังเวลลีย์ [100] (ข) และ(ค) แสดงการยึดครองของอิเล็กตรอนของแถบความนำเนื่องจากการไหลของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.5-5 เฟคเตอร์ $P(N, T)$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์เพียไซริชิตที่ที่อุณหภูมิห้อง ที่มีการคูณเพื่อให้ได้แกจเฟคเตอร์ที่อุณหภูมิ T และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (donor) N ในซิลิกอนชนิดอื่น ดังที่คำนวณโดย Kanda^[2]

การทดลองอีกอันหนึ่งพบว่าค่าแกจเฟคเตอร์จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ สารที่มีการเจือสารชนิดอื่นน้อยจะมีค่าแกจเฟคเตอร์สูงแต่ก็ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมากเช่นกัน ในสารที่มีการโคปสูงอิเล็กตรอนในแถบความนำจำนวนมากจะมาจากสารเจือ เมื่ออุณหภูมิมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้น และค่าแกจเฟคเตอร์ของอิเล็กตรอนจะไม่เปลี่ยนแปลง ในซิลิกอนที่มีการโคปน้อยอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ในแถบเอกซอร์นี้เป็นเอกซอร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

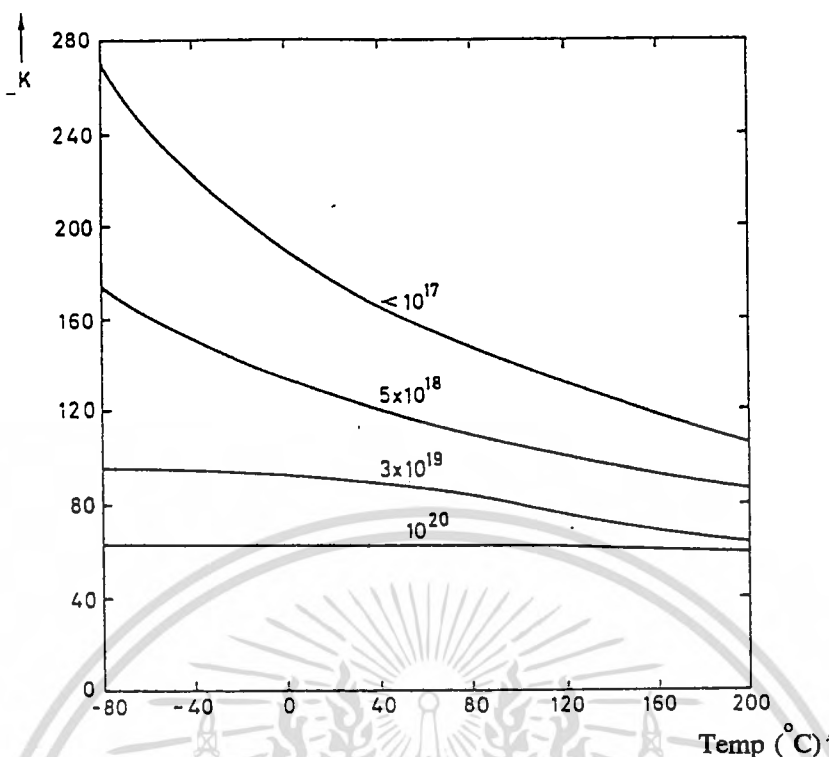
ความนำต้องได้มาจากการกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไป เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนในแถบความนำจึงเพิ่มสูงขึ้น ค่าแอกเฟคเตอร์จึงลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกแทนที่ลดลง

จากแบบจำลอง one-band many-valley นี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์เปียโซรีซิสที่ปได้สอดคล้องกับผลการทดลอง

2.5.3 ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสที่ปในซิลิกอนชนิดพี

จากผลการทดลองได้พบว่าค่าแอกเฟคเตอร์ในซิลิกอนชนิดพี จะมีค่าสูงกว่าในซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งก็เป็นเหตุผลหนึ่งที่มีจะมีการใช้สารชนิดนี้มากกว่า จากรูปที่ 2.5-2 จะเห็นว่ารูปร่างของแถบความนำจะต่างกับแถบวาเลนซ์มาก การที่จะอธิบายได้ต้องรู้ว่าแรงเค้นและแรงเครียดจะมีผลต่อโครงสร้างแถบพลังงานอย่างไร สิ่งหนึ่งที่รูปอธิบายต่างกับสารชนิดเอ็น ก็คือไม่มีรูปที่เขียนได้ชัดเจน จากรูปที่ 2.5-2 ในแถบวาเลนซ์นั้นจะมีความสัมพันธ์สองอย่างระหว่างพลังงานและเลขคลื่น จุดที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ $k=0$ และมีความสูงเท่ากัน สำหรับโฮลในความเป็นจริงแล้วจะมีความสัมพันธ์ที่สามเข้ามาเกี่ยวข้อง (แต่ไม่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5-2) จะอยู่ต่ำกว่าอีกสองอันเล็กน้อย และมีผลต่อปรากฏการณ์เปียโซรีซิสที่ปน้อยมาก ในแถบวาเลนซ์นี้อาจจะมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า two-and-one band model แถบทั้งสองจะมีมวลยังผลและความคล่องตัวไม่เท่ากัน ในทิศทาง $[100]$ จะเห็นความแตกต่างไม่ชัดเจนนัก แต่ในทิศทาง $[111]$ จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อเกิดแรงอัดเข้ามาโฮลจะเกิดการเรียงตัวใหม่ เมื่อความคล่องตัวของแถบทั้งสองไม่ต่างกันมากนัก การเปลี่ยนแปลงความต้านทานเนื่องจากการเรียงตัวใหม่จะไม่ชัดเจน ซึ่งจะพบในทิศทาง $[100]$ อย่างไรก็ตามในทิศทาง $[111]$ ผลนี้จะเกิดสูงสุด ค่าแอกเฟคเตอร์ของซิลิกอนชนิดพีจะมีค่าเป็นบวก นั้นหมายความว่าเมื่อมีความเครียดบวก (การยืดตัว) จะทำให้แถบที่มีค่ามวลเบาสุดหรือค่าความคล่องตัวสูงจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแถบที่มีความคล่องตัวต่ำ จากปรากฏการณ์ดังกล่าวเมื่อโฮลจำนวนมากขึ้นมีค่าความคล่องตัวลดลง ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะตรงกับผลการทดลองเรื่องเปียโซรีซิสที่ปนี้ จากรูปที่ 2.5-6 ได้แสดงไว้ว่าค่าแอกเฟคเตอร์ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นสารเจืออย่างไร ในสารชนิดพีก็เช่นกัน แอกเฟคเตอร์จะลดลงเมื่อความเข้มข้นสารเจือสูงขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งสองกรณีอธิบายได้จากหลักที่ว่า เมื่อโฮลจำนวนน้อยได้มีการกระจายตัวเองเข้าไปในแถบทั้งสองการเปลี่ยนแปลงย่อมจะมีมากขึ้น

สุดท้ายจากตารางที่ 2.5-1 ได้แสดงทั้งค่ามวลยังผลสำหรับสารชนิดเอ็นและพีไว้ด้วยกัน สำหรับวัสดุที่มีค่าความต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร จะสังเกตได้ว่าซิลิกอนชนิดเอ็นนั้นจะมีค่าแอกเฟคเตอร์สูงที่สุด ในทิศทางนั้นๆ และสารชนิดพีจะมีค่าต่ำสุด จากความจริงที่ว่ามวลยังผลจะแตกต่างกันไปตามแกนของทรงรีในซิลิกอนชนิดเอ็น และความแตกต่างในแถบพลังงานที่ต่างกันมากในสารชนิดพี เป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์เปียโซรีซิสที่ปได้



รูปที่ 2.5-6 เกจเฟกเตอร์ของซิลิกอนชนิดพี เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ

ตารางที่ 2.5-1 ความคล่องตัวและเกจเฟกเตอร์สำหรับซิลิกอน

m^*/m (ขนานกับแกนยาวของอิลิปซอรัย , ซิลิกอนชนิดเอ็น)	0.19
m^*/m (ขนานกับแกนสั้นของอิลิปซอรัย , ซิลิกอนชนิดพี)	0.98
m^*/m (โฮลเบา (light holes) , ซิลิกอนชนิดเอ็น)	0.16
m^*/m (โฮลหนัก (heavy holes) , ซิลิกอนชนิดพี)	0.52

ซิลิกอนชนิด	ทิศทาง	ค่าพิกต์ความต้านทาน (โอห์ม.เซนติเมตร)	K
p	[111]	1	173
p	[110]	1	121
p	[100]	1	5
n	[111]	1	-13
n	[110]	1	-89
n	[100]	1	-153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปและความเค้นในซิลิกอน

การเข้าใจฟิสิกส์พื้นฐานของปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีปในซิลิกอน เป็นสิ่งจำเป็นแต่ก็ยังไม่เพียงพอในการออกแบบตัวรับรู้แรงดันแบบซิลิกอน ในตอนต่อไปจะได้ทราบว่าค่าเกจเฟกเตอร์จะมีบทบาทสำคัญในการกำหนดลักษณะเฉพาะของวัสดุ

ค่าเกจเฟกเตอร์จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความต้านทานเมื่อได้รับความเค้น ซึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของขนาดของตัวต้านทาน ความเครียดนั้นเกิดจากการใส่ความเค้น (แรงกด) ลงไป ซึ่งจะเป็นจุดที่น่าสนใจกว่าค่าความเครียด ในตอนนี้จะพูดถึงเรื่องสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีป (piezoresistive coefficient) ซึ่งเป็นสิ่งที่บอกถึงการเปลี่ยนค่าสภาพต้านทานเมื่อได้รับความเค้น

ตัวรับรู้แรงดันแบบซิลิกอนส่วนใหญ่จะประกอบด้วยไดอะแฟรมบางๆ ซึ่งได้ทำการสร้างตัวต้านทานจากการแพร่สารเจือหรือจากการฝังไอออนลงไป หัวข้อที่สนใจกันมากในการออกแบบก็คือการเลือกทิศทางการวางตัวของผลึกเพื่อใช้สร้างเป็นไดอะแฟรม หรือการสร้างตัวต้านทาน การทราบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปจะช่วยมา

ตัวต้านทานที่แพร่ลงบนไดอะแฟรมจะเปลี่ยนค่าความต้านทานเมื่อได้รับแรงจากภายนอก โดยทั่วไปตัวต้านทานจะเป็นแบบที่มีความยาว ดังนั้นจะเกิดค่าความเค้นเกิดขึ้นสององค์ประกอบคือ ความเค้นขนาน σ_{\parallel} ความเค้นตั้งฉาก σ_{\perp} ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลง d' ของความต้านทาน ซึ่งจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของค่าสภาพต้านทานเฉพาะ d' (ตอนนี้จะไม่สนใจปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีปเนื่องจากโครงสร้างทางเรขาคณิต (geometrical piezoresistive effect) ในซิลิกอนเพราะถือว่าน้อยมาก) และการเขียนความเค้นจะมีองค์ประกอบดังนี้

$$d' = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_{\parallel} \sigma_{\parallel} + \pi_{\perp} \sigma_{\perp} \quad (2.6-1)$$

เมื่อ π_{\parallel} และ π_{\perp} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปแบบขนานและแบบตั้งฉากตามลำดับ สัมประสิทธิ์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับ การวางตัวต้านทาน เมื่อเทียบกับทิศทางของผลึก และชนิดของซิลิกอน จากกฎของโอห์ม จะได้ว่า

$$\xi = \rho J \quad (2.6-2)$$

เมื่อ ξ เป็นสนามไฟฟ้า และ J เป็นความหนาแน่นกระแส สำหรับวัสดุที่เป็นแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) แล้ว ξ และ J จะอยู่ในแนวขนาน และค่า ρ จะเท่ากันในทุกทิศทางของผลึก กรณีดังกล่าวจะจริงสำหรับผลึกที่มีความสมมาตรแบบลูกบาศก์เช่น เจอร์มาเนียมและซิลิกอน อย่างไรก็ตามเมื่อมีแรงกระทำค่า ρ และ d' จะขึ้นกับทิศทางของผลึก จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\xi_j}{\rho_o} = (1 + d'_{ij}) J_k \quad (2.6-3)$$

เมื่อ ρ_o เป็นสภาพต้านทานเมื่อยังไม่มีแรงกระทำ และ d'_{ij} เป็นเทนเซอร์ (tensor) ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและองค์ประกอบของกระแส

โดยการเขียนแบบเมตริกซ์จะได้สมการที่ 2.6-3 เป็นดังนี้คือ

$$\frac{1}{\rho_o} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d'_{11} & d'_{12} & d'_{13} \\ d'_{21} & d'_{22} & d'_{23} \\ d'_{31} & d'_{32} & d'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} \quad (2.6-3')$$

ในผลึกที่สมมาตรแบบลูกบาศก์ สัมประสิทธิ์บางตัวจะเท่ากัน และสามารถเขียนเมตริกซ์ให้ยุ่งยากน้อยลงโดยให้สัมประสิทธิ์ $11=1, 22=2, 33=3, 23=32=4, 13=31=5$ และ $12=21=6$ จึงเขียนเมตริกซ์นี้เป็น

$$\frac{1}{\rho_o} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d'_1 & d'_6 & d'_5 \\ d'_6 & d'_2 & d'_4 \\ d'_5 & d'_4 & d'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} \quad (2.6-4)$$

การเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของค่าสภาพต้านทานเมื่อมีความเค้นเชิงกลจะเขียนได้ดังนี้

$$d'_{ij} = \pi_{ijkl} \sigma'_{kl} \quad (2.6-5)$$

เนื่องจากทั้ง d' และ σ' ต่างก็เป็นเทนเซอร์ ดังนั้นสัมประสิทธิ์เปียโซรีซิสทีปเขียนได้ถึง 81 ค่า ถ้าพิจารณาอีกทีจะเห็นประโยชน์จากความสมมาตรในผลึกแบบลูกบาศก์ เมตริกซ์จะลดองค์ประกอบเหลือเพียงขนาด 6×6 เท่านั้น ซึ่งจะเหลือเพียงสัมประสิทธิ์อิสระ (independent coefficient) เพียง π_{11}, π_{12} และ π_{44} เท่านั้น

องค์ประกอบ σ'_1, σ'_2 และ σ'_3 เป็นความเค้นตั้งฉาก ส่วน σ'_4, σ'_5 และ σ'_6 เป็นความเค้นเฉือน สมการที่ 2.6-5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ d'_3 \\ d'_4 \\ d'_5 \\ d'_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \\ \sigma'_4 \\ \sigma'_5 \\ \sigma'_6 \end{bmatrix} \quad (2.5-6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารทั่วไปสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 2.6-1 เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีสที่ที่มีการคำนวณไว้แล้ว

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีสที่กับเกจเพคเตอร์ ดังตารางที่ 2.6-1 จะเห็นว่าค่า π_{11} จะเป็นสิ่งที่มีอิทธิพลต่อค่าเกจเพคเตอร์สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็น ในทิศทาง [100] และ π_{44} จะมีอิทธิพลต่อค่าเกจเพคเตอร์ในสารชนิดพีตามทิศทาง [111] การที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์แบบขนาน (π_{\parallel}) และแบบตั้งฉาก (π_{\perp}) สำหรับตัวต้านทานที่มีการวางในทิศทางใดๆ จะต้องมีการทรานส์ฟอร์มจากแกนผลึกหนึ่งไปอีกแบบหนึ่ง จากการเปลี่ยนแปลงจะได้^[10]

ตารางที่ 2.6-1 สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีสที่สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี

ซิลิกอนชนิด	ค่าพิคัดความต้านทาน (โอห์ม.เซนติเมตร)	π_{11}	π_{12}	π_{44}
		(10 ⁻¹² cm ² /dyne)		
n	11.7	-102.2	+53.4	-13.6
p	7.8	+6.6	-1.1	+138.1

$$\pi_{\parallel} = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \quad (2.6-7)$$

$$\pi_{\perp} = \pi_{12} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (2.6-8)$$

โดย l_1, m_1 และ n_1 เป็นโคเรคซันโคไซน์ (direction cosine) ระหว่างเวกเตอร์ที่ขนานกับแกนยาวของตัวต้านทาน (ซึ่งก็คือทิศทางกรไลของกระแส) และแกนของผลึก l_2, m_2 และ n_2 เป็นโคเรคซันโคไซน์ระหว่างเวกเตอร์ที่ขนานกับแกนสั้นของตัวต้านทาน และแกนของผลึกลูกบาศก์

สัมประสิทธิ์ π_{11}, π_{12} และ π_{44} มีค่าขึ้นกับชนิดของซิลิกอน โดย C.S Smith^[3] แสดงไว้ในตารางที่ 2.6-1 ซึ่งพบว่าในซิลิกอนชนิดพีค่าสัมประสิทธิ์ π_{44} มีค่ามาก เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ π_{11} และ π_{12} ส่วนในซิลิกอนชนิดเอ็นค่าสัมประสิทธิ์ π_{11} และ π_{12} มีค่ามาก เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ π_{44} ดังนั้นสามารถจะประมาณได้ว่า ในซิลิกอนชนิดเอ็นค่าสัมประสิทธิ์ $\pi_{11} = -2\pi_{12}$ และ $\pi_{44} = 0$ ในซิลิกอนชนิดพีค่าสัมประสิทธิ์ $\pi_{11} = \pi_{12} = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.6-7 และ 2.6-8 จะได้ว่าสำหรับตัวต้านทานชนิดเอ็นจะได้

$$\pi_{\parallel} = \pi_{11}[1 - 3(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2)] \quad (2.6-9a)$$

$$\pi_{\perp} = \pi_{11}\left[-\frac{1}{2} + \frac{3}{2}(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)\right] \quad (2.6-9b)$$

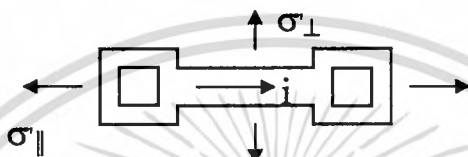
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวต้านทานชนิดพี

$$\pi_{\parallel} = 2\pi_{44} (l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \quad (2.6-10a)$$

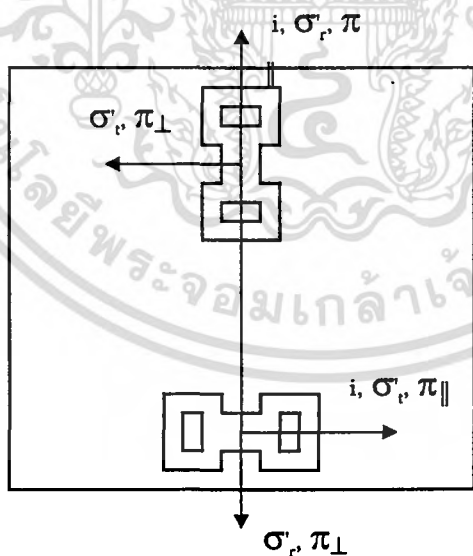
$$\pi_{\perp} = -\pi_{44} (l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (2.6-10b)$$

ต่อไปพิจารณาความเค้นที่เกิดในตัวต้านทานที่เกิดจากการแพร่ ที่มีค่าความต้านทาน R ที่ได้รับความเค้นในแนวขนาน (σ'_{\parallel}) และความเค้นตั้งฉาก (σ'_{\perp}) ดังแสดงในรูปที่ 2.6-1



รูปที่ 2.6-1 แสดงตัวต้านทานที่ได้รับความเค้นในแนวขนาน (σ'_{\parallel}) และความเค้นตั้งฉาก (σ'_{\perp})

ความต้านทานของตัวต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลง ΔR ดังสมการที่ 2.6-1 เมื่อสร้างตัวต้านทานในแนวสัมผัส (R_{\parallel}) และตัวต้านทานในแนวรัศมี (R_{\perp}) ซึ่งวางอยู่บนไดอะแฟรมสี่เหลี่ยมจตุรัส ที่ได้รับความเค้นในแนวรัศมี (σ'_{\perp}) และความเค้นในแนวสัมผัส (σ'_{\parallel}) ดังแสดงในรูปที่ 2.6-2



รูปที่ 2.6-2 แสดงตัวต้านทานภายในแนวสัมผัส (R_{\parallel}) และความต้านทานในแนวรัศมี (R_{\perp}) บน

ไดอะแฟรมสี่เหลี่ยมจตุรัส ที่มีความเค้นแนวสัมผัส (σ'_{\parallel}) และความเค้นแนวรัศมี (σ'_{\perp})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานทั้งสองเป็น

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i = \pi_{\parallel}\sigma'_i + \pi_{\perp}\sigma'_i \quad (2.6-11)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r = \pi_{\parallel}\sigma'_r + \pi_{\perp}\sigma'_i \quad (2.6-12)$$

2.7 การเลือกชนิด ระบายของฐานรองและการวางตัวของ MOISFET

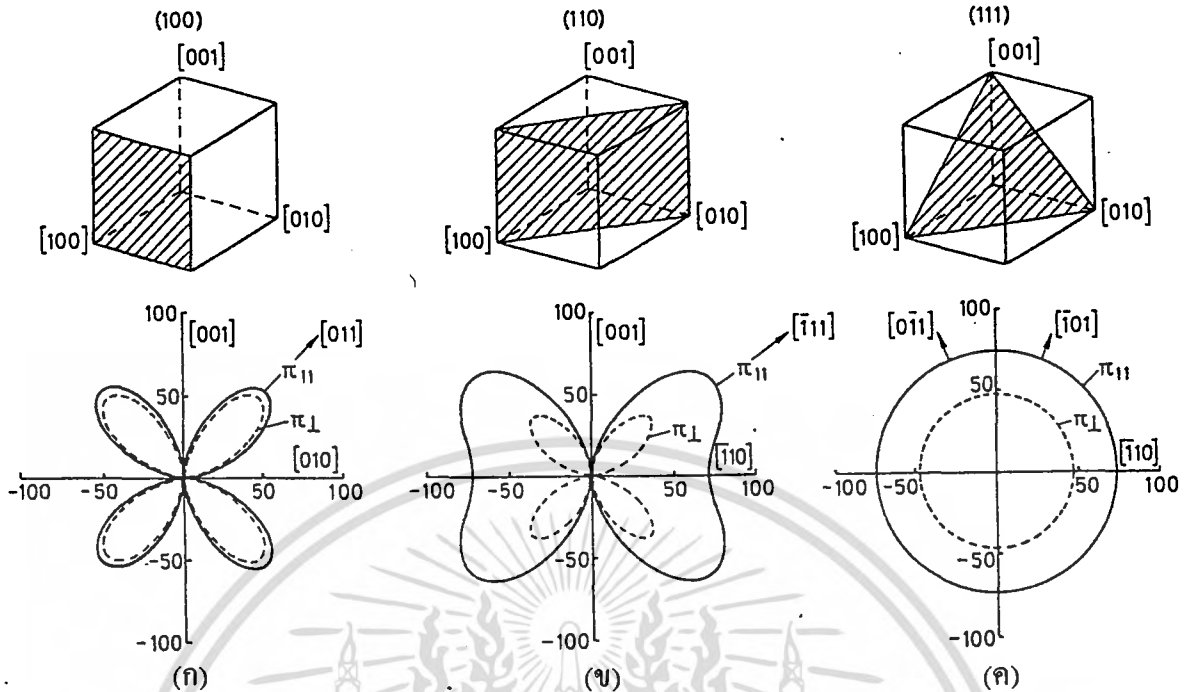
2.7.1 การเลือกชนิดและระบายของฐานรอง

Kanda^[2] ได้พล็อตค่าสัมประสิทธิ์ในระนาบต่างๆ ทั้งในผลึกชนิดเอ็นและพี ดังในรูปที่ 2.7-1 เป็นรูปที่พล็อตจากซิลิกอนชนิดพี ก่อนที่จะได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ นักออกแบบมักจะพิจารณาจากระนาบผลึกสามอันเพื่อเป็นประโยชน์ ก็คือระนาบ (100) (110) และ (111) โดยจะเลือกผลึกที่มีระนาบ (100) มากที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นตัวรับรู้แรงดันส่วนมากจะเป็นการแพร่ หรือฝัง ไอออนที่เป็นตัวต้านทานชนิดพีลงบนฐานรองอพิทาซีชนิดเอ็นที่ปลูกอยู่บนฐานรองชนิดพี

การเลือกระนาบผลึกและสภาพต้านทาน จะเลือกเพื่อให้เข้ากับกระบวนการสร้าง ด้วยเทคโนโลยีซิลิกอนมากที่สุด จะเลือกค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟทั้งแบบขนาน (π_{\parallel}) และแบบตั้งฉาก (π_{\perp}) ได้โดยดูจากรูปที่ 2.7-1 สำหรับระนาบ (100) ทั้ง π_{\parallel} และ π_{\perp} จะเท่ากัน เมื่อเลือกสร้างบนระนาบ (110) จะต้องสร้างตัวต้านทานที่ต่อกันแบบวีสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge) ให้วางสองตัวแรกตามทิศทาง [111] และอีกสองตัวตามทิศทาง [001] ตัวต้านทานสองตัวแรกจะตอบสนองต่อความเค้นตามยาว และเกิดปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟสูง แต่จะไม่ตอบสนองต่อความเค้นตามขวาง เนื่องจากสัมประสิทธิ์ในทิศทาง [001] เป็นศูนย์ ตัวต้านทานอีกคู่หนึ่งก็จะไม่ตอบสนองต่อความเค้นทั้งแนวขนานและแนวตั้งฉาก บางครั้งก็จะเลือกระนาบ (111) เนื่องจากสามารถวางตัวต้านทานของวงจรวีสโตนบริดจ์ไปในทางใดก็ได้จะไม่เป็นผลใดๆ แต่ในตัวรับรู้แรงดันแบบอื่นๆ ต้องคำนึงถึงการวางตัวตามทิศทางของผลึกเสมอ

2.7.2 การวางตัวของ MOISFET

ตัวตรวจจับแบบซิลิกอนที่ใช้วัสดุฐานเชิงกลส่วนมากจะอยู่บนโครงสร้างทางกล เช่น ไดอะแฟรม คานปลายเดี่ยว ส้อมเสียงและอื่นๆ ในหัวข้อนี้จะเสนอความสัมพันธ์ของการงอตัว



รูปที่ 2.7-1 สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปแบบขนาน (π_{\parallel}) และแบบตั้งฉาก (π_{\perp}) สำหรับซิลิกอน ชนิดพี (ก) ระนาบผลึก (100) (ข) (110) (ค) (111) ที่อุณหภูมิห้อง

2.7.2.1 คุณสมบัติความยืดหยุ่นของซิลิกอน

จากกฎของฮุก (Hooke's law) ความเค้น σ' และความเครียด ϵ' จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma' = E'\epsilon' \quad (2.7-1)$$

เมื่อ E' เป็น โมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของวัสดุ

ความเค้น ความเครียด และค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นจะขึ้นกับทิศทางของผลึก ค่าความเค้นและความเครียดจะเขียนเป็นเทนเซอร์ได้ โดยที่องค์ประกอบทุกอย่าง ในระบบผลึกที่สมมาตรแบบลูกบาศก์ เช่น ซิลิกอน สัมประสิทธิ์บางตัวจะเท่ากัน ดังนั้นองค์ประกอบที่เท่ากันจะเหลือเพียงหกตัวแปร โดยกำหนดดังนี้ $11=1$, $22=2$, $33=3$, $23=32=4$, $13=31=5$ และ $12=21=6$ ในระบบลูกบาศก์ บางสัมประสิทธิ์จะเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$\begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \\ \sigma'_4 \\ \sigma'_5 \\ \sigma'_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon'_1 \\ \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_3 \\ \varepsilon'_4 \\ \varepsilon'_5 \\ \varepsilon'_6 \end{bmatrix} \quad (2.7-2)$$

สำหรับซิลิกอน ตัวแปรอิสระสามตัวของสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น มีค่าดังนี้

$$c_{11} = 1.657 \times 10^{12} \text{ dyne/cm}^2$$

$$c_{12} = 0.639 \times 10^{12} \text{ dyne/cm}^2$$

$$c_{44} = 0.796 \times 10^{12} \text{ dyne/cm}^2$$

ค่าความเครียดสามารถเขียนในเทอมของความเค้นได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon'_1 \\ \varepsilon'_2 \\ \varepsilon'_3 \\ \varepsilon'_4 \\ \varepsilon'_5 \\ \varepsilon'_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \\ \sigma'_4 \\ \sigma'_5 \\ \sigma'_6 \end{bmatrix} \quad (2.7-3)$$

สำหรับซิลิกอน ตัวแปร s นี้เรียกว่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (compliance coefficient) มีค่าดังนี้

$$s_{11} = 0.768 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyne}$$

$$s_{12} = -0.214 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyne}$$

$$s_{44} = 1.256 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyne}$$

จะเห็นว่า $c_{44} = 1/s_{44}$ แม้ว่าซิลิกอนจะมีโครงสร้างสมมาตรแบบลูกบาศก์ แต่ก็จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความยืดหยุ่นในทิศทาง [111] จะเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของทิศทาง [100] และทำให้ลักษณะทางกลของซิลิกอนเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก

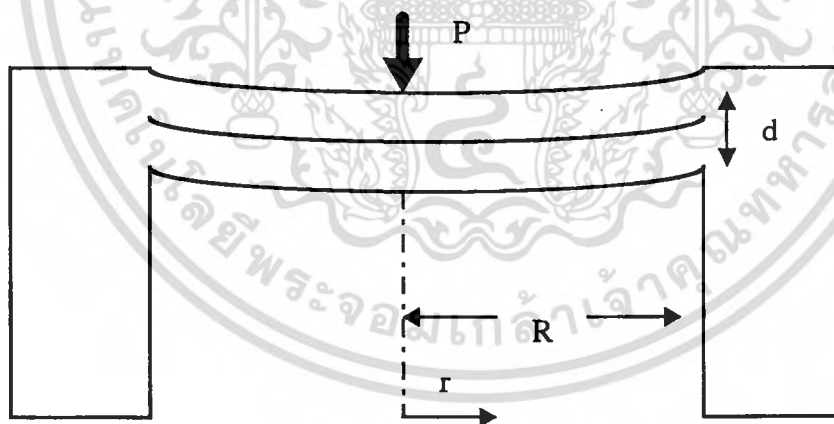
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.2 ไคอะแฟรม

ตัวตรวจจับแรงดันแบบซิลิกอนส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นไคอะแฟรม ซึ่งมีตัวต้านทานเพียโซรีซิสทีฟแพร่อยู่ ซึ่งโครงสร้างเกิดจากการกัดด้วยเคมี ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์แบบนี้จะดีหรือไม่ขึ้นกับตัวต้านทานเพียโซรีซิสทีฟ และขนาดของไคอะแฟรม ในหัวข้อนี้จะกล่าวโดยย่อถึงตัวแปรเชิงกลที่สำคัญของไคอะแฟรม

ตัวต้านทานเพียโซรีซิสทีฟสามารถที่จะแพร่เข้าไปในผลึกที่วางตัวต่างกัน ตรงตำแหน่งไหนก็ได้ บนไคอะแฟรม และทิศทางของผลึกใดๆ ก็ได้ ในทางการค้าเมื่อจะพิจารณาควรเปรียบเทียบคุณภาพทุกอย่างทั้งข้อดีและข้อเสียซึ่งมีหลายประการ ในการเลือกค่าที่เหมาะสมนั้นควรทราบแบบแผนของความเค้นซึ่งเกิดจากความแตกต่างของแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ บนผิวไคอะแฟรมให้ดีเสียก่อน สภาพต้านทานเป็นฟังก์ชันของความเค้นรัศมี ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟตามยาว (longitudinal piezoresistive effect) และยังเป็นฟังก์ชันของความเค้นสัมผัส (tangential stress component) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟตามขวาง (transverse effect)

เมื่อพิจารณาไคอะแฟรมสี่เหลี่ยมจตุรัสที่ได้รับแรงดัน ก็จะมีการงอตัวดังแสดงในรูปที่ 2.7-2 ขณะที่มีการงอตัวเล็กน้อยก็ยังสามารถใช้การประมาณเพื่อให้เป็นเชิงเส้นได้ นั่นคือการงอตัวนั้นจะถูกตัดก็ต่อเมื่อไคอะแฟรมจะต้องไม่ยืดตัว



รูปที่ 2.7-2 การโค้งงอของไคอะแฟรมเนื่องจากความแตกต่างของความดัน

เมื่อไดอะแฟรมเกิดการงอตัวก็จะทำให้เกิดความแตกต่างของความเค้น (differential stress) $\sigma'_r - \sigma'_t$ ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ กับขนาดของไดอะแฟรมดังสมการ^[19]

$$\sigma'_r - \sigma'_t = \sigma'(x,y)(2R/d)^2 P \quad (2.7-4)$$

เมื่อ σ'_r เป็นความเค้นในแนวรัศมี

σ'_t เป็นความเค้นในแนวสัมผัส

R เป็นความกว้างครึ่งหนึ่งของไดอะแฟรม

d เป็นความหนาของไดอะแฟรม

P เป็นความดันที่กระทำกับ ไดอะแฟรม

r เป็นระยะจากจุดศูนย์กลาง ไดอะแฟรม

x เป็นระยะ r ในแนวแกน x

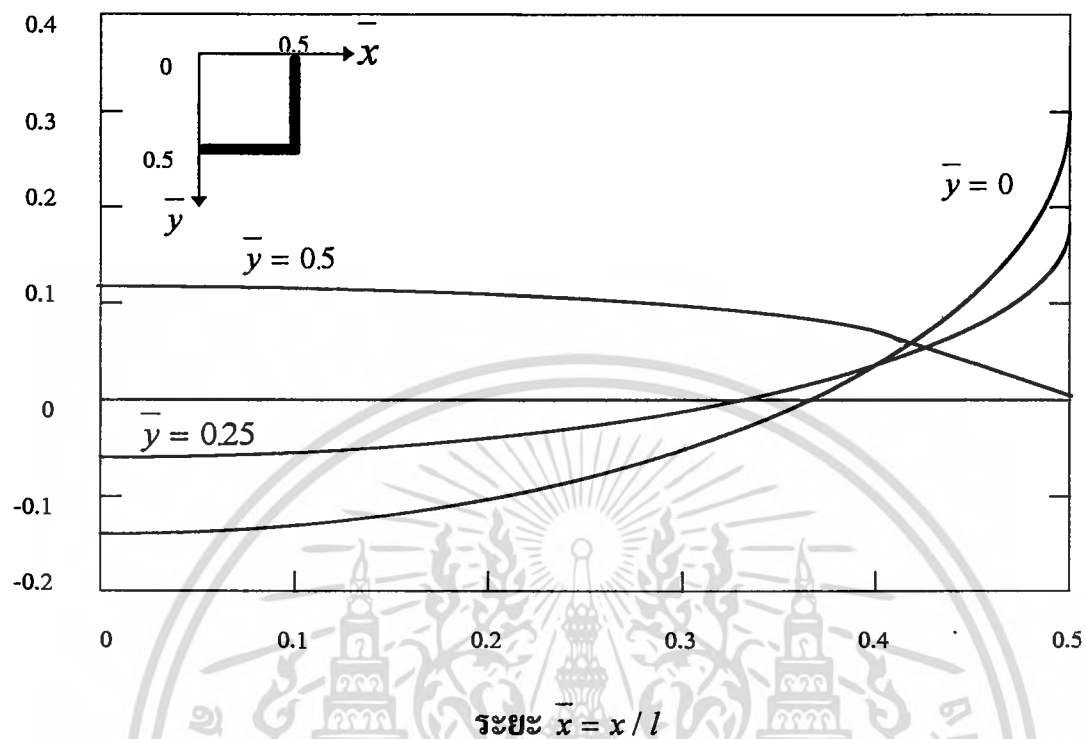
y เป็นระยะ r ในแนวแกน y

$$\frac{x}{R} = x / 2R$$

$$\frac{y}{R} = y / 2R$$

เมื่อการงอตัวของไดอะแฟรมมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความหนาของไดอะแฟรม ความเค้นโดเมนชั้นเลตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งต่างๆ บนไดอะแฟรม ดังแสดงในรูปที่ 2.7-3 ซึ่งเป็นความเค้นโดเมนชั้นเลตใน 1 ควอดแรน (quadrant) ของไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขอบในตัว (built - in)

ความเค้นใดเมนชั้นเลส



รูปที่ 2.7-3 แสดงการกระจายของความเค้นใดเมนชั้นเลสใน 1 ควอดเรนของโคอะเฟรมที่มีขอบในตัว^[19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

กระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET จะประกอบด้วยลำดับขั้นตอนดังนี้

- ก) การออกแบบและการผลิตกระจกต้นแบบ
- ข) กระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก
- ค) กระบวนการแอสเซมบลีและการเก็บบรรจุ

การออกแบบจะต้องพิจารณาจากโครงสร้างและทฤษฎีของ MOISFET โดยเริ่มต้นจากการกำหนดคุณสมบัติของ MOISFET แล้วนำมาออกแบบโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติของชิปฐานรอง การกำหนดขนาดและการวางตัวของไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสบนชิปฐานรอง การกำหนดขนาดของช่องทางเดินกระแสของ MOISFET ตำแหน่ง การวางตัวบนไดอะแฟรม และทิศทางการไหลของกระแสของ MOISFET เมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรม และการกำหนดขนาดและตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า (aluminium pad) ลวดลายต้นแบบจะนำไปใช้ในการผลิตเป็นกระจกมาร์ก (photographic masks) โดยการถ่ายย่บางส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึกต่อไป กระบวนการสร้างจะเริ่มจากการเลือกชนิดความหนา และพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกฐานรองซิลิกอน หลังจากนั้นจะนำแผ่นผลึกเข้าไปในกระบวนการสร้างที่เป็นลำดับขั้นตอนที่แน่นอน เช่น การทำความสะอาดแผ่นผลึกเริ่มแรก กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ กระบวนการกัดฐานรองเพื่อสร้างไดอะแฟรม กระบวนการแพร่สารเจือ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี กระบวนการแพร่ทองคำ และกระบวนการเมทัลไลเซชัน เป็นต้น ซึ่งเมื่อจบขั้นตอนต่างๆ เหล่านี้จะได้ ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET อยู่บนแผ่นผลึกจำนวนมาก ต่อจากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของ MOISFET ที่ทำการสร้างขึ้นบนไดอะแฟรมก่อนที่จะนำไปตัดแยก เมื่อทำการทดสอบเรียบร้อยแล้ว ก็ตัดแยกออกเป็นชิ้นๆ ซึ่งเรียกว่าชิปหรือตาย (chip or die) แล้วนำไปทำการเก็บบรรจุเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับความดันต่อไป

3.1 การออกแบบไดอะแฟรม

โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET จะประกอบด้วยไดอะแฟรมบางรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งไดอะแฟรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของซิลิกอน ซึ่งเกิดจากการกัดฐานรองซิลิกอนระนาบ (100) ในสารละลายซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก^[11] โดยผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) ดังแสดงในรูปที่ 3.1-1 ต้นแบบของไดอะแฟรมเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) หลุมที่เกิดจากการกัดจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยจะต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมจตุรัสขนานหรือตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับทิศทาง [110] ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

$$W_b = W_0 - 2l \cot 54.7^\circ$$

$$\approx W_0 - \sqrt{2}l \quad (3.1-1)$$

W_0 คือขนาดของต้นแบบ

W_b คือขนาดของไดอะแฟรมหลังการกัด

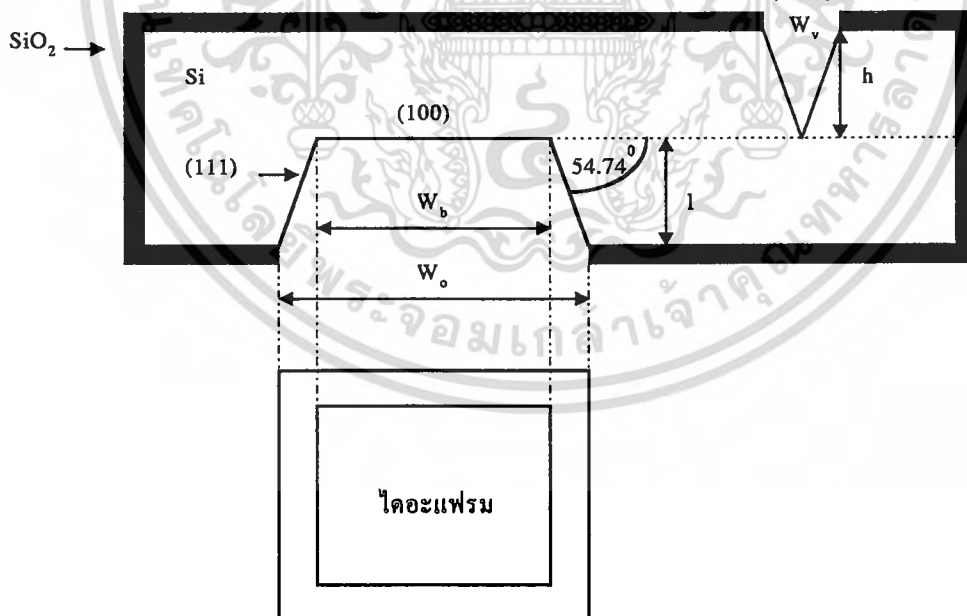
l คือความลึกของไดอะแฟรม

ในการควบคุมความหนาไดอะแฟรมจะใช้เทคนิคร่องตัววี และใช้แสงเป็นมอนิเตอร์ โดยจะสามารถคำนวณความลึกของร่องตัววีดังสมการต่อไปนี้

$$W_v = \sqrt{2}h \quad (3.1-2)$$

W_v คือขนาดของต้นแบบ

h คือความลึกของร่องตัววี



รูปที่ 3.1-1 แสดงรายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแฟรม ของทรานซิสเตอร์ความ

ต้นแบบ MOISFET บนฐานรองซิลิกอนระนาบ (100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ต้องการแปรค่าความหนาของไดอะแฟรมให้มีความหนา 20, 30, 40, 50 และ 60 ไมโครเมตร โดยต้องการให้ขนาดของช่องไดอะแฟรมหลังการกัดมีขนาด 1000x1000 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขนาดไดอะแฟรมต้นแบบ (W_0) เมื่อใช้แผ่นฐานรองหนา 400 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 3.1-1

ตารางที่ 3.1-1 การออกแบบขนาดของช่องไดอะแฟรม

ความหนาไดอะแฟรม (h) (μm)	ขนาดต้นแบบ (W_0) (μm)	ขนาดร่องตัววี (W_v) (μm)
20	1532	28
30	1518	42
40	1504	56
50	1490	70
60	1476	84

3.2 การออกแบบ MOISFET

ในการออกแบบ MOISFET บนไดอะแฟรมนั้น จะทำการออกแบบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานเป็นตัวรับรู้แรงดัน การออกแบบเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของ MOISFET บนไดอะแฟรม และทำการออกแบบเพื่อหาทิศทางการวางตัวของ MOISFET ที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน โดยจะทำการศึกษาทั้ง NMOISFET และ PMOISFET ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบจะเป็นดังต่อไปนี้

3.2.1 การออกแบบเพื่อหาขนาดของ MOISFET ที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานเป็นตัวรับรู้แรงดัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการหาขนาดของ MOISFET ที่ดีที่สุดในการใช้งานเป็นตัวรับรู้แรงดัน โดยการแปรค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) ของช่องทางเดินกระแสแสดงในรูปที่ 3.2-1 เป็นดังตารางที่ 3.2-1

โดยเมื่อแปรค่า W และ L ของช่องทางเดินกระแสจะทำให้กระแสคร่อมมีค่าเปลี่ยนไปดังสมการที่ 2.3-2 และ 2.3-3

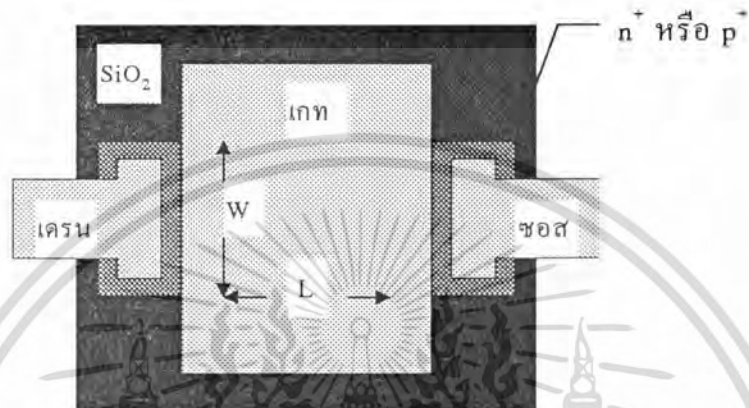
ช่วงไม่อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{DS} = \left(\frac{\beta}{2}\right)[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad ; \quad V_{DS} < V_{GS} - V_T \quad (2.3-2)$$

ช่วงอิ่มตัว

$$I_{DS} = \left(\frac{\beta}{2}\right)[V_{GS} - V_T]^2 \quad ; \quad V_{DS} > V_{GS} - V_T \quad (2.3-3)$$



รูปที่ 3.2-1 ภาพด้านบนของ MOISFET

ตารางที่ 3.2-1 การแปรค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) ของช่องทางเดินกระแสของ MOISFET

W (μm)	L (μm)
60	20
100	20
200	20
400	20
60	40
100	40
200	40
400	40
60	60
100	60
200	60
400	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกแบบเพื่อหาทิศทางในการวางตัวของ MOISFET ที่เหมาะสมในการใช้งาน

ในการวาง MOISFET บนไดอะแฟรมที่มีทิศทางการไหลของกระแสต่างกัน จะทำให้เมื่อมีความเค้นมากระทำจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของกระแสเปลี่ยนไป เนื่องจากค่าความคล่องตัวเปลี่ยนไป ดังนั้นในการออกแบบ จะทำการออกแบบให้มีทิศทางการไหลของกระแสตรง มีทิศทางขนานกับขอบของไดอะแฟรม และมีทิศทางตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมดังรูปที่ 2.6.2 จะได้การเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานที่ช่องทางเดินกระแสในแนวรัศมี และแนวสัมผัสดังสมการที่ 2.6-11 และ 2.6-12

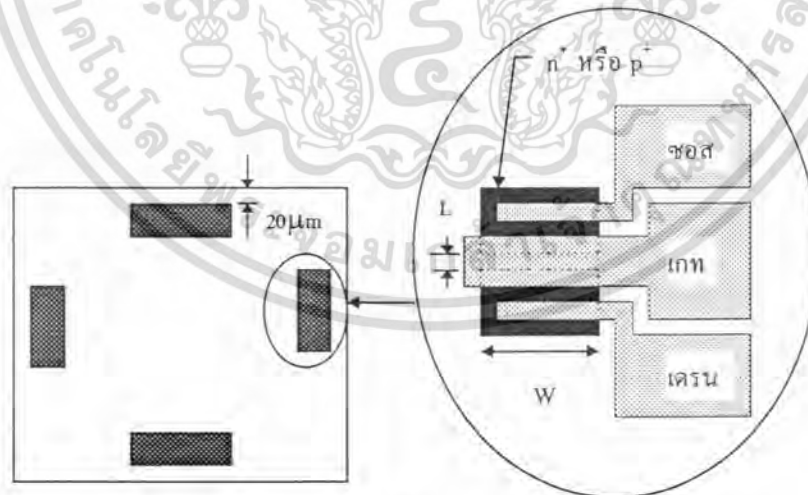
การเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานของช่องทางเดินกระแสในแนวสัมผัส

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \pi_{\parallel} \sigma'_t + \pi_{\perp} \sigma'_r \quad (2.6-11)$$

การเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานของช่องทางเดินกระแสในแนวรัศมี

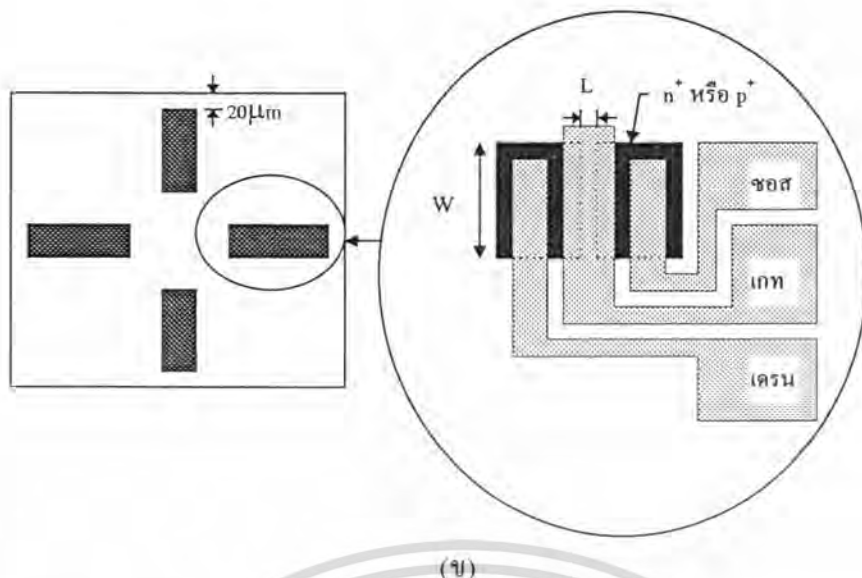
$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r = \pi_{\parallel} \sigma'_r + \pi_{\perp} \sigma'_t \quad (2.6-12)$$

ในการออกแบบจะทำการวาง MOISFET ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) ของช่องทางเดินกระแสดังตารางที่ 3.2-2 การออกแบบจะแสดงในรูปที่ 3.2-2



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2-2 การวาง MOISFET บนไดอะแฟรม (ก) กระจกใสลอนานกับขอบของไดอะแฟรม
(ข) กระจกใสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

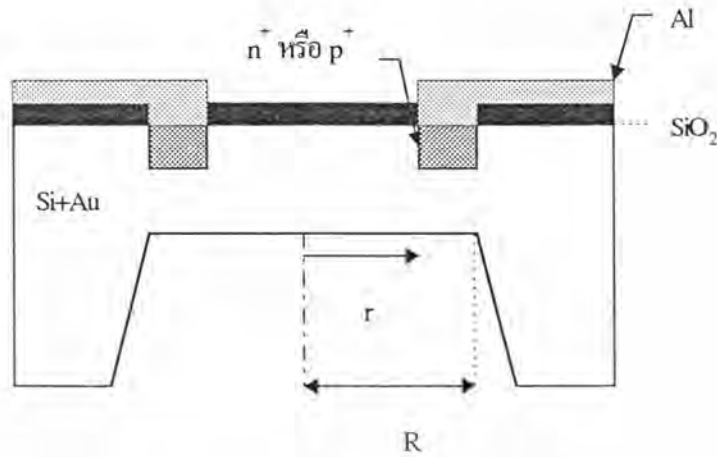
3.2.3 การออกแบบเพื่อหาตำแหน่งที่ดีที่สุดของ MOISFET บนไดอะแฟรม

การวาง MOISFET บนไดอะแฟรมที่ตำแหน่งต่างๆ นั้น เมื่อมีความเค้นมากระทำจะทำให้เกิดความเค้นในเนวรัศมี และแนวสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน ดังสมการที่ 2.7-4 ดังนั้นตำแหน่งในการวาง MOISFET บนไดอะแฟรมจึงมีผลต่อความไวของทรานซิสเตอร์ความเค้นแบบ MOISFET ที่สร้างขึ้น

$$\sigma_x, -\sigma_y = \sigma(x,y)(2R/d)^2 P \quad (2.7-4)$$

ดังนั้นในการออกแบบจะทำการวาง MOISFET ให้ห่างจากศูนย์กลางไดอะแฟรม (r) มีค่าต่างๆ กันดังแสดงในรูปที่ 3.2-3 ทั้ง MOISFET ที่กระจกใสลอนาน และตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมโดยมีขนาดช่องทางเดินกระแสเป็นไปดังตารางที่ 3.2-2 ในการสร้างนั้นใช้ขนาดของไดอะแฟรม 1000x1000 ตารางไมโครเมตร ดังนั้น R ในสมการที่ 2.7-4 และ 2.7-5 เป็น 500 ไมโครเมตร และแปรค่า r ดังตารางที่ 3.2-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2-3 แสดงภาพตัดขวางของ MOISFET บนโคอะแฟรมที่มีการแปรค่าระยะห่างจากศูนย์กลางโคอะแฟรม

ตารางที่ 3.2-2 แสดงค่าระยะห่างจากศูนย์กลางโคอะแฟรม (r) ที่ใช้ในการทดลอง

r	r/R
0	0
100	0.2
200	0.4
300	0.6
400	0.8

โดยที่เมื่อ $r=0$ จะทำการออกแบบให้ MOISFET มีขนาดช่องทางเดินกระแสเป็นดังตารางที่ 3.2-3

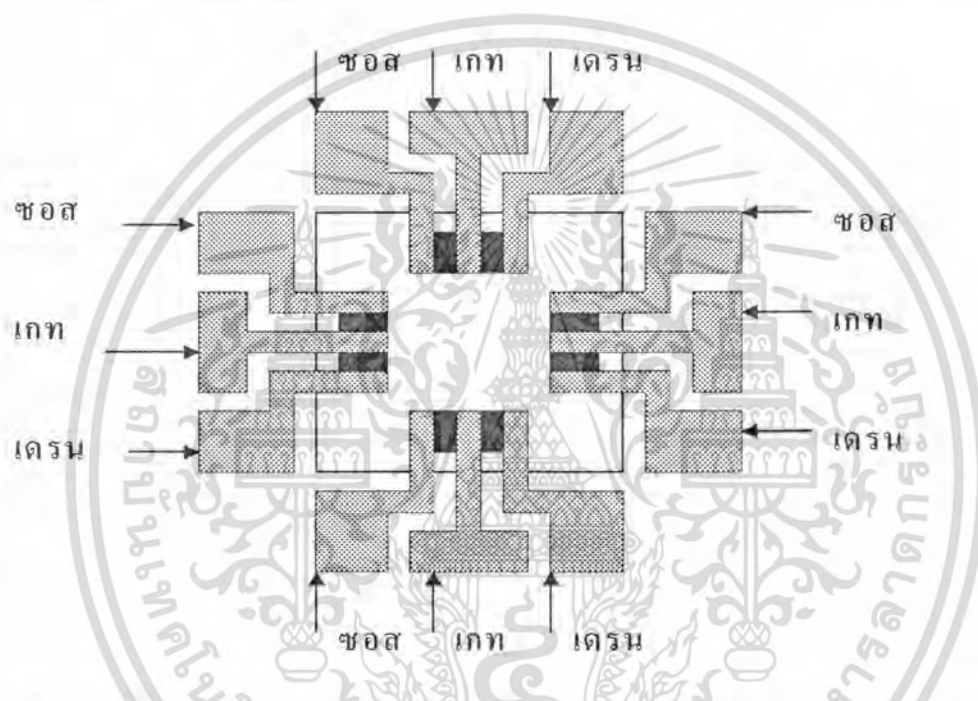
ตารางที่ 3.2-3 ขนาดช่องทางเดินกระแสของ MOISFET เมื่อ $r=0$

W (μm)	L (μm)
60	20
100	20
60	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

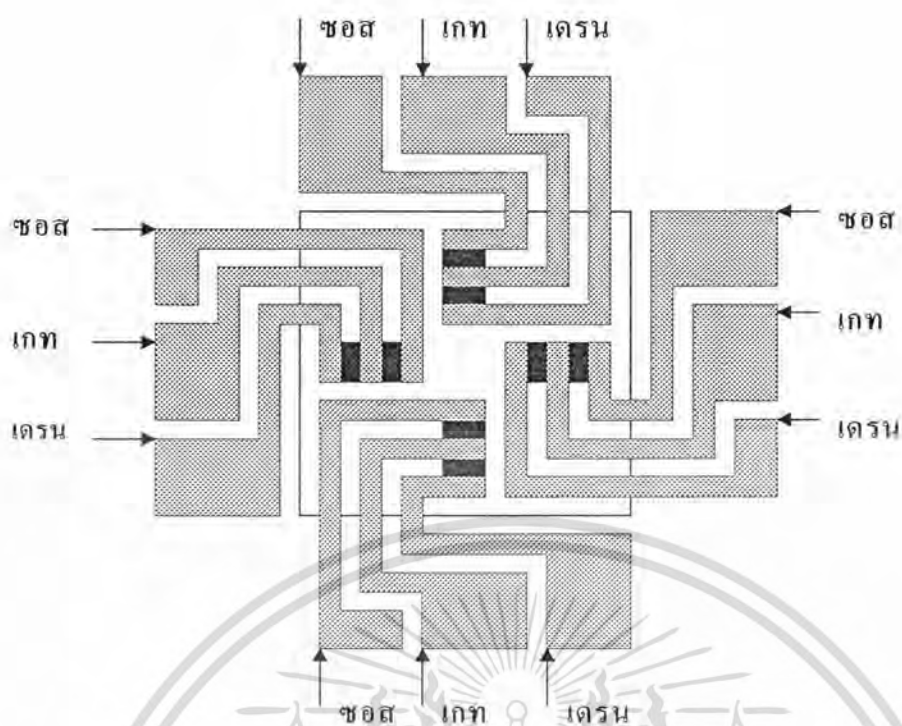
3.3 ต้นแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET

ต้นแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ประกอบด้วยชิปฐานรองสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3×3 ตารางเซนติเมตร หนา 400 ไมโครเมตร ไดอะแฟรมเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1000×1000 ตารางไมโครเมตร หนา 20, 30, 40, 50 และ 60 ไมโครเมตร ต้นแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ได้ออกแบบโครงสร้างแบ่งเป็น 4 แบบ คือต้นแบบที่กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3-1 ต้นแบบที่กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$ ดังรูปที่ 3.3-2 ต้นแบบที่กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r = 0$ ดังรูปที่ 3.3-3 และต้นแบบที่กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r = 0$ ดังรูปที่ 3.3-4

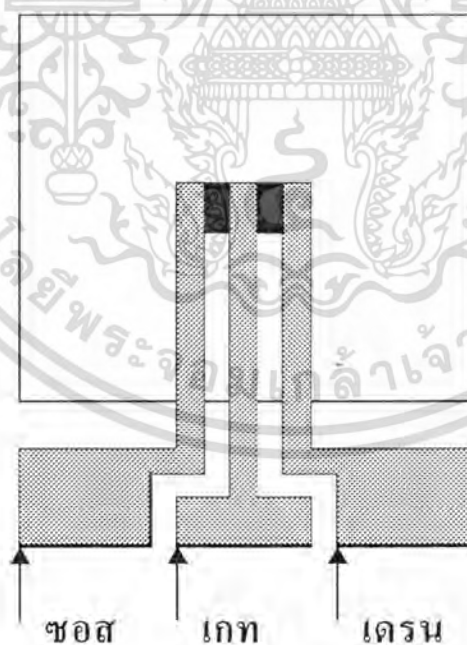


รูปที่ 3.3-1 ต้นแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

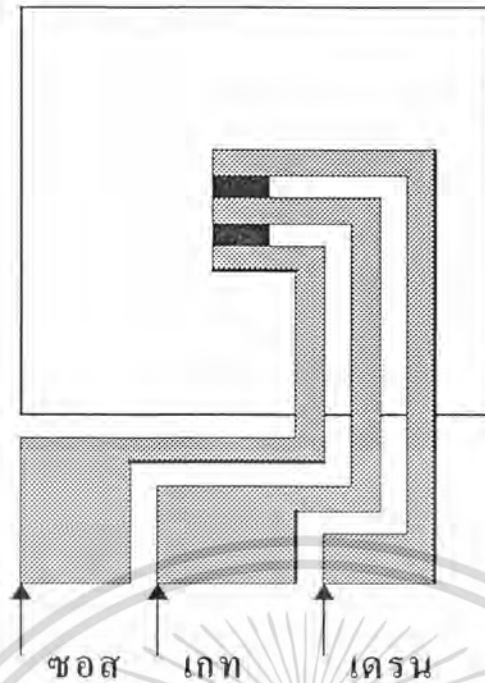


รูปที่ 3.3-2 ดัชนีแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$



รูปที่ 3.3-3 ดัชนีแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3-4 ดัชนีแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r = 0$

3.4 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET

ในกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET บนไดอะแฟรมนั้น จะมีขั้นตอนการผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ และขั้นตอนการสร้างบนแผ่นผลึก

3.4.1 การผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ

หลังจากที่ได้ดัชนีแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET แล้ว ดัชนีแบบนี้จะถูกนำมาเขียนบนกระดาษกราฟขนาด 0.8×1 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4-1 เพื่อใช้เป็นแบบในการตัดแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาร์ซีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดดัชนีแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตนั้นจะใช้ไมโครคัตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร ในกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET จะใช้มาส์กต้นแบบทั้งหมด 6 มาส์ก ดังแสดงในรูปที่ 3.4-2(ก-จ) ซึ่งเป็นมาส์กบนแผ่นไมลาร์ที่ตัดเสร็จแล้ว ซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่างๆ ดังนี้

มาส์กที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม

มาส์กที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอนสำหรับ PMOSFET

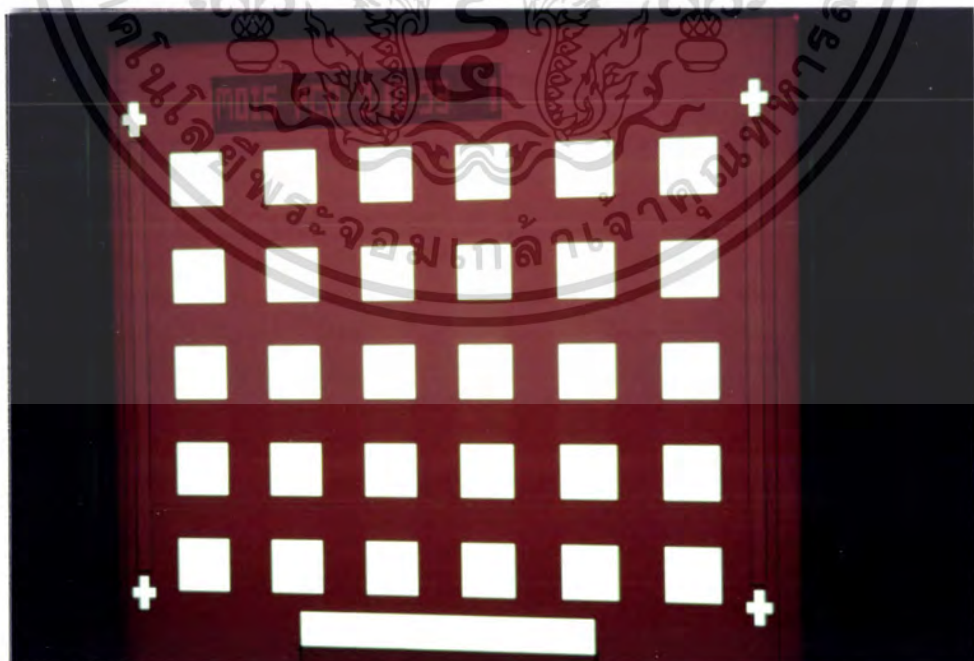
มาส์กที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัสสำหรับ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

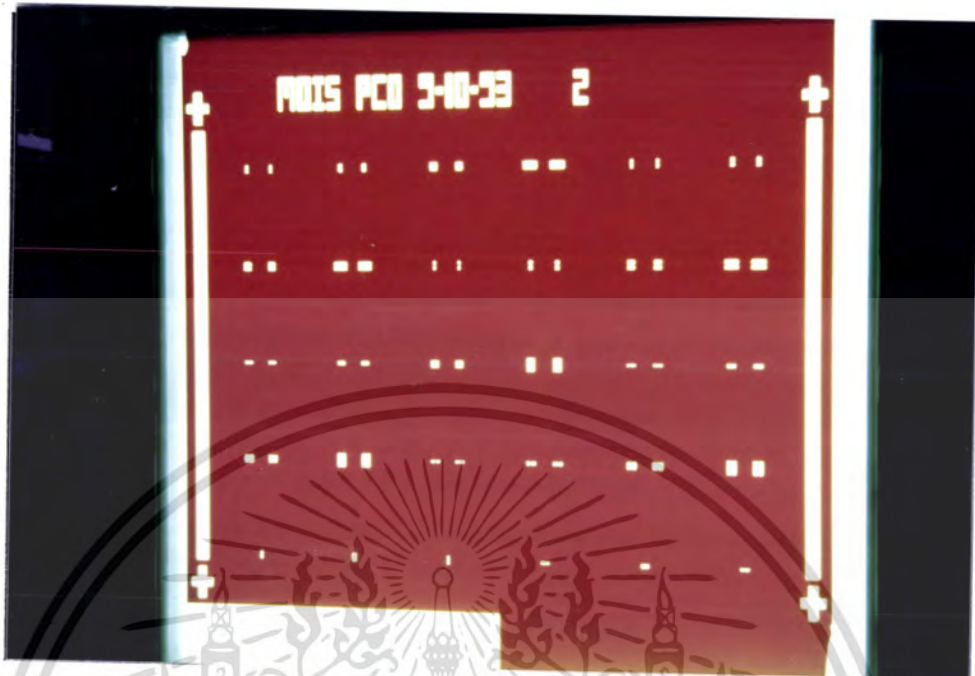
- มาตราที่ 4 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างออกไซด์ที่เกต
 มาตราที่ 5 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอลูมิเนียม
 มาตราที่ 6 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอลูมิเนียม



รูปที่ 3.4-1 แสดงต้นแบบของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET บนกระดาษกราฟ

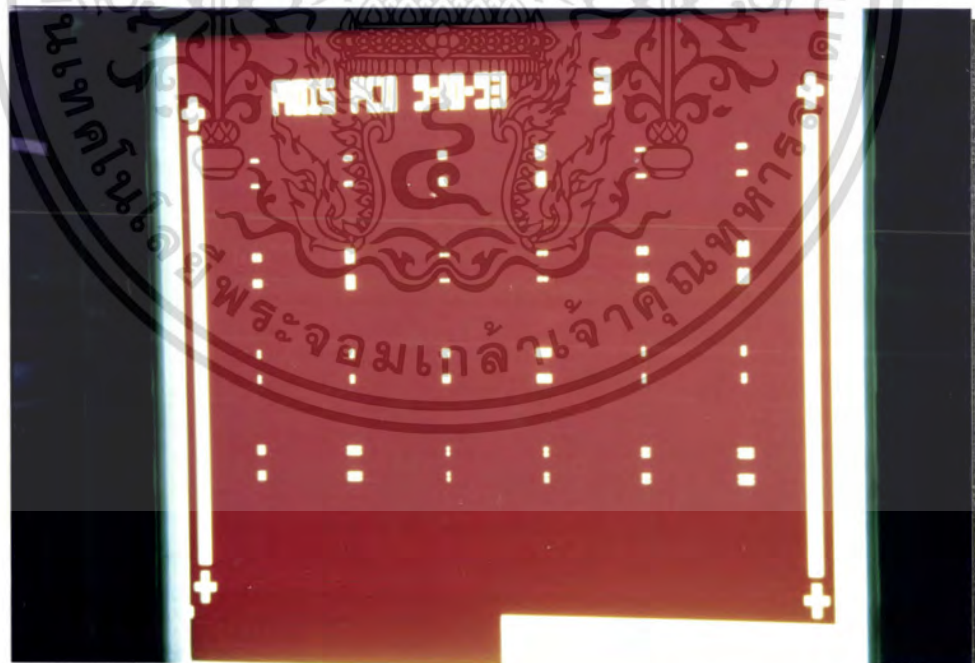


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะที่ออกลิขสิทธิ์เท่านั้น ไม่เอะเออะไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.4-2 (ก) แสดงต้นแบบมาตราที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4-2 (ข) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอนสำหรับ

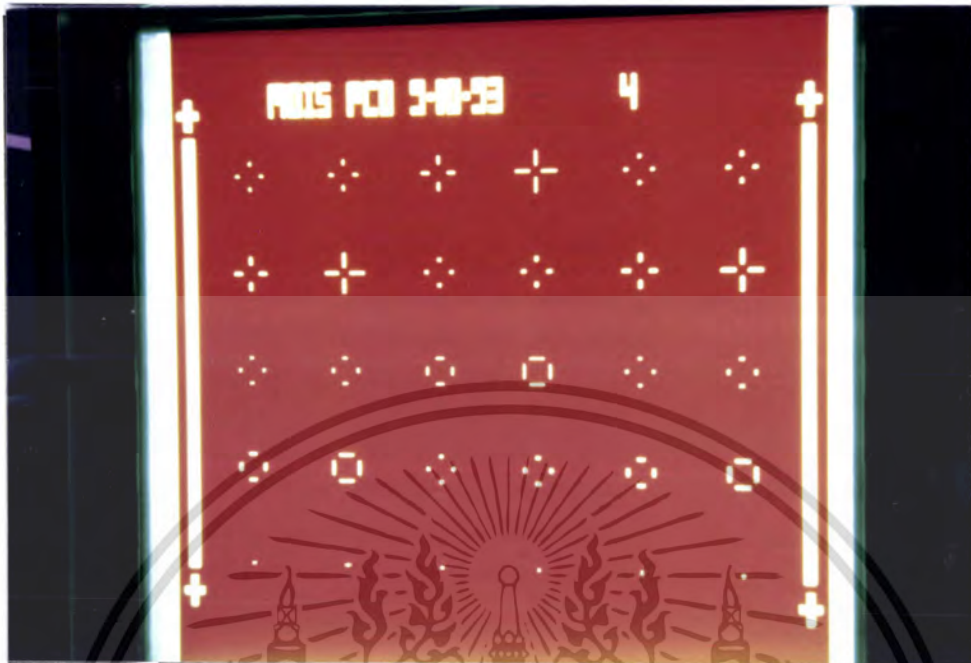
PMOSFET



รูปที่ 3.4-2 (ค) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัสสำหรับ

NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

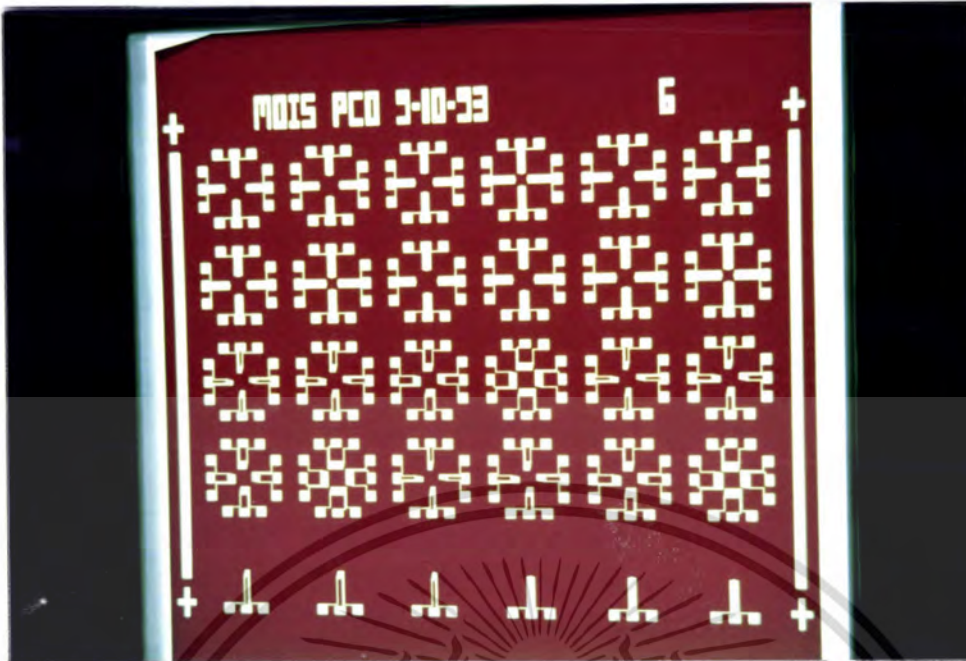


รูปที่ 3.4-2 (ง) แสดงต้นแบบมาสก์ 4 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างออกไซด์ที่เกต



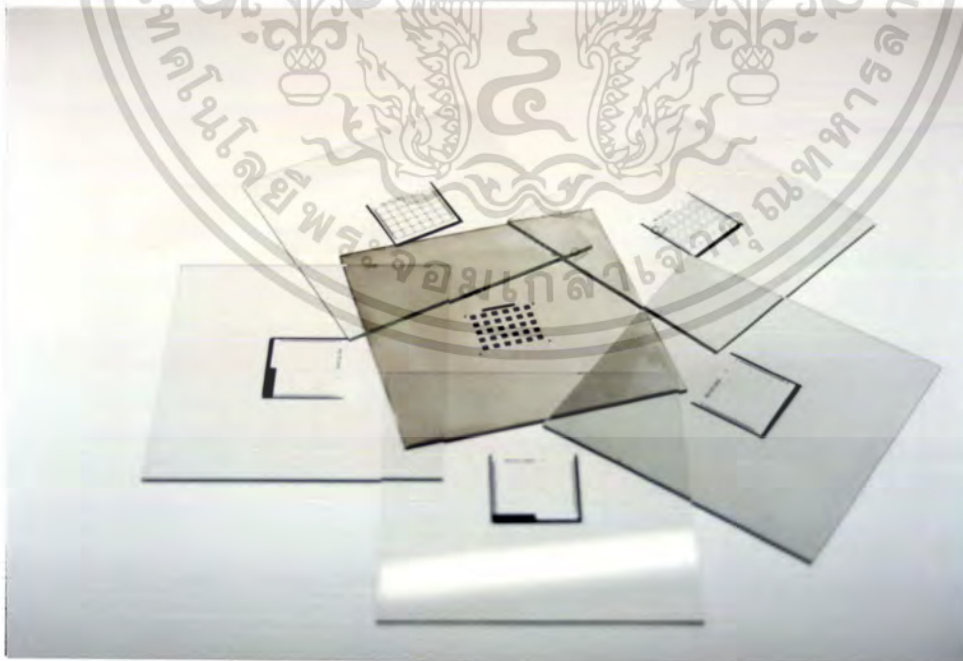
รูปที่ 3.4-2 (จ) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 5 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสสอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4-2 (จ) แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 6 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอคูมิเนียม

เมื่อได้ต้นแบบบนแผ่นไมลาร์ซีทดังแสดงในรูปที่ 3.4-2 แล้ว ก็นำต้นแบบนั้นมาย่อส่วนลง 50 เท่า ลงบนกระจก ด้วยกล้องถ่ายภาพยอส่วนที่เรียกว่า step-and-repeat camera ซึ่งจะได้ลวดลายบนแผ่นฟิล์มกระจกเรียบขนาด 3x3 ตารางนิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.4-3 เพื่อเป็นโฟโตมาสก์ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



รูปที่ 3.4-3 แสดงภาพถ่ายของกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นโฟโตมาสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ขั้นตอนการสร้างบนแผ่นผลึก

ในการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET บนแผ่นผลึกนั้นก็จะแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง และลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

3.4.2.1 การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET

การสร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET อาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แต่เนื่องจากทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET มีไดอะแฟรมบางส่วนประกอบ จึงทำให้เกิดความยุ่งยากในการสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ ดังนั้นจึงต้องกำหนดเทคนิคต่างๆ ให้เหมาะสมกับกระบวนการสร้างซึ่งสามารถกำหนดได้ดังนี้

1. การเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น
2. การกำหนดความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เริ่มแรก
3. ใช้เทคนิคการกัดเนื้อซิลิกอน เพื่อสร้างเป็นไดอะแฟรม
4. การแพร่สารเจือชนิดพี
5. การแพร่สารเจือชนิดเอ็น
6. การสร้างขั้วสัมผัส
7. การเก็บบรรจุ

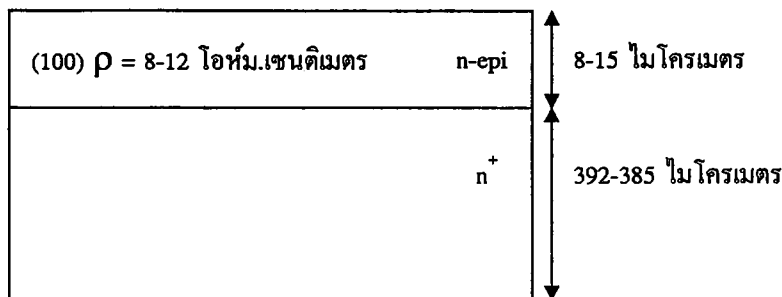
3.4.2.2 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง^[19]

กระบวนการสร้างจะเริ่มจากการกำหนดแผ่นผลึกซิลิกอน ไปจนกระทั่งถึงการสร้างเป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์ โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (Starting wafer)
 - ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวแบบอพิทาเซียล (epitaxial) ที่ผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา
 - ชนิดเอ็น หนา (100)
 - ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นอพิ $\rho = 8-12$ โอห์ม-เซนติเมตร
 - ค่าความหนาชั้นอพิ 8-15 ไมโครเมตร
 - ค่าความหนาของแผ่นผลึก 400 ไมโครเมตร

โดยภาพตัดขวางแสดงดังรูปที่ 3.4-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4-4 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกเริ่มแรก

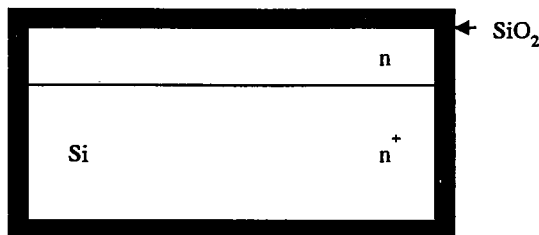
2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มใน ไตร โคล โรเอททีลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

เพื่อการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 5000 อังสตรอม จึงทำการออกซิเดชัน โดยนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที เมื่อจบขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงในรูปที่ 3.4-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4-5 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิกอน เพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ด้านหลัง สำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจกมาสก์ที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการอบแห้ง แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยต้นแบบกระจกมาสก์ I สำหรับรายละเอียดของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที ที่ด้านหลัง
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาสก์ที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลตออกมาแหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี $\lambda=5000$ อังสตรอม เป็นเวลา 10 วินาที ที่ด้านหลัง
- การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้งๆ ละ 1 นาที จุ่มในน้ำยาทำความสะอาด (Isopropyl) 2 ครั้งๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ทาด้านหน้าแผ่นผลึกด้วย Waycoat
- อบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที

5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่าสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การลอกชั้นสารไวแสง

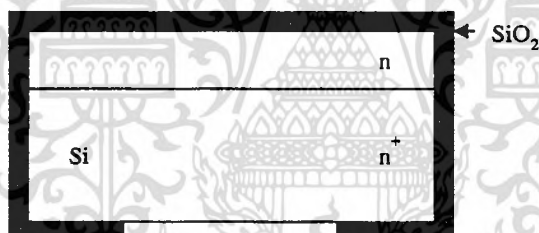
สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโคลโรเอทที่ลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงในรูปที่ 3.4-6



รูปที่ 3.4-6 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

8. กระบวนการกัดเป็นไดอะเฟรมบาง [ภาคผนวก ง]

ใช้น้ำยาส่วนผสมของ Ethylene diamine : Pyrocatechol : DI water (EPD) ในอัตราส่วน 50:8:16

ในขณะที่กัดจะใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กัดให้ได้ไดอะเฟรมตามขนาดที่ต้องการ

9. การลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

ทำเหมือนข้อ 5

10. ทำความสะอาดผิวผลึก

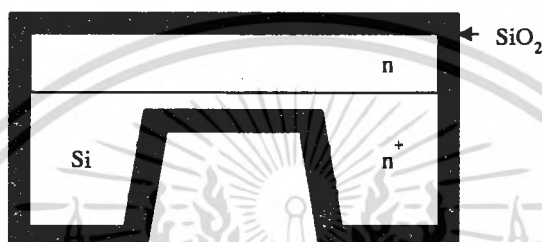
ทำเหมือนข้อ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

เมื่อได้โคอะแพรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ได้ความหนาประมาณ 5000 อังสตรอมที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
 - ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตรต่อนาที
 - ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
- เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงในรูปที่ 3.4-7



รูปที่ 3.4-7 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี II

ใช้กระจกมาสก์ II ถ่ายลงที่ด้านหน้า โดยมีขั้นตอนเหมือนข้อ 4

13. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

14. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

15. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

16. กระบวนการ P⁺ deposition

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือโบรอนด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ BN (M-26) ที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียส ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- ทำการ Activation 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตรต่อนาที
- ทำการ Stabilize 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการ Predeposition 40 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตรต่อ นาที เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วต้องมีอะตอมสารเจือประมาณ 10^{15} - 10^{16} อะตอมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร

17. การลอกชั้น Boron glass

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

18. การทำความสะอาดผิวผลึก

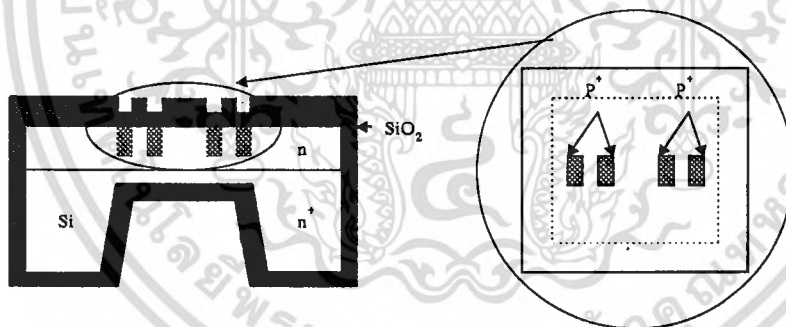
เหมือนข้อ 7

19. กระบวนการ p^+ drive-in

ทำการขับไล่อะตอมสารเจือโบรอน พร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ที่มีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที โดยมีขั้นตอนของกระบวนการดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้ง 20 นาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 20 นาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 20 นาที

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังรูปที่ 3.4-8



รูปที่ 3.4-8 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 19

20. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี III

ใช้กระจกมาสก์ที่ III ถ่ายลงที่ด้านหน้า โดยมีขั้นตอนเหมือนข้อ 4

21. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

22. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

24. กระบวนการ N^+ deposition

เป็นการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ SiP_2O_7 (PH1000) ที่อุณหภูมิ 1040 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.8 ลิตรต่อนาที เมื่อผ่านชั้นตอนนี้แล้วควรมีอะตอมสารเจือประมาณ 10^{15} - 10^{16} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

25. การลอกชั้น Phosphorous glass

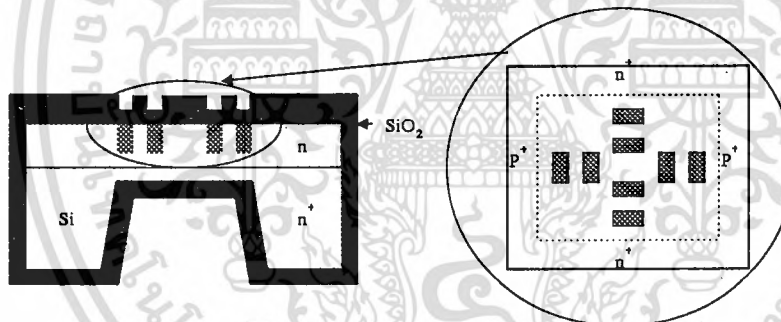
- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% นาน 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

26. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

27. กระบวนการ n^+ drive-in

ทำการขับลึกฟอสฟอรัสพร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ โดยทำเหมือนข้อ 19 เมื่อผ่านชั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังรูปที่ 3.4-9



รูปที่ 3.4-9 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 27

28. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี IV

ใช้กระจกมาสก์ IV เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์ บริเวณส่วนเกทออกเพื่อทำการสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ใหม่ รายละเอียดเหมือนกับชั้นตอนที่ 4

29. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

30. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

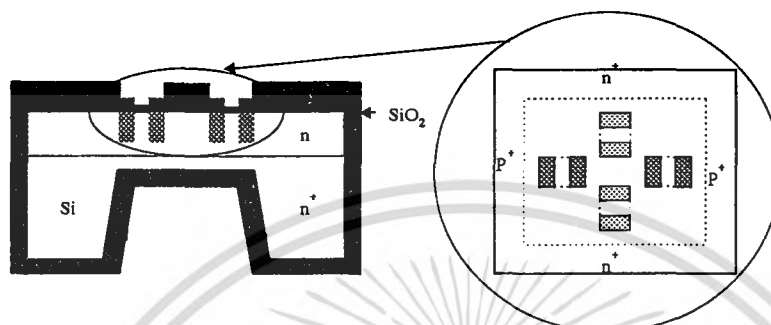
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

32. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับส่วนเกต

ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณส่วนเกต โดยใช้การออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที โดยมีอัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที จะได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 700 อังสตรอม เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังรูปที่ 3.4-10



รูปที่ 3.4-10 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 32

33. ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหลัง

ทำเหมือนข้อ 5

34. การเคลือบทองคำ (Au) ในสุญญากาศ

โดยใช้เครื่องเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นของทองคำที่ด้านหลัง

35. กระบวนการ Au drive-in

ทำการขับลึกอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 90 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1.2 ลิตรต่อนาที แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว จะทำให้ฐานรองที่ใช้เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ

36. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี V

ใช้กระจกมาสก์ที่ V เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกที่บริเวณที่จะทำส่วนสัมผัสของขั้วไฟฟ้า รายละเอียดเหมือนข้อ 4

37. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

38. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

39. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

40. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร

41. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี VI

ใช้กระจกมาส์กที่ VI เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของอะลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก ชั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาส์กที่ VI ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

42. การกัดชั้นอลูมิเนียม

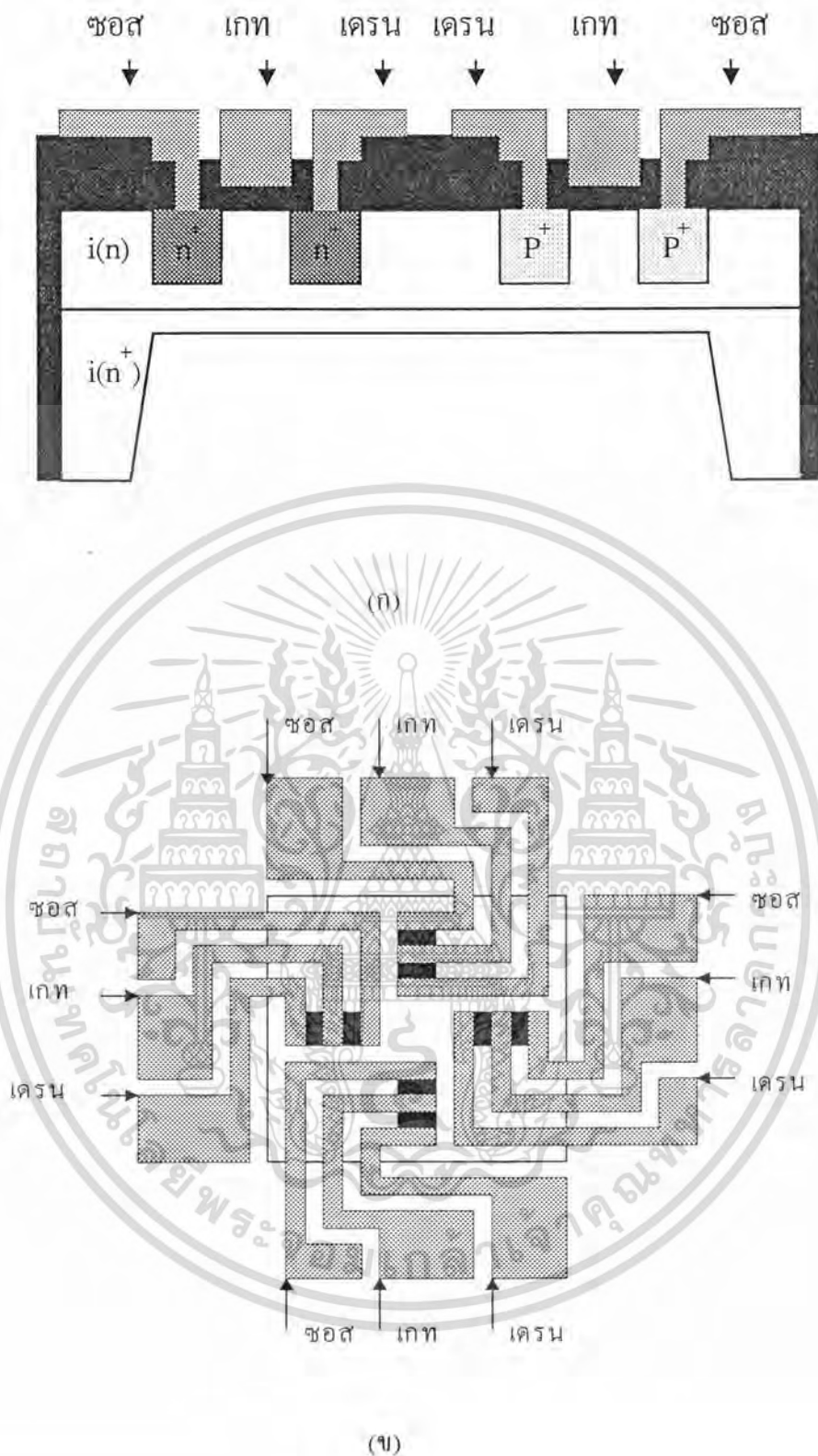
สารละลายที่ใช้กัดชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลายนี้ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 นาที

43 การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

44. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิกอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังรูปที่ 3.4-11 และจะได้ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วดังรูปที่ 3.4-12



รูปที่ 3.4-11 แสดงภาพของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 44 (ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4-12(ก) แสดงภาพถ่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $r > 0$ ที่สร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.4-12(ข) แสดงภาพถ่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหลตั้งฉากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4-12(ค) แสดงภาพถ่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อ $t=0$ ที่สร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.4-12(ง) แสดงภาพถ่ายของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่กระแสไหลตั้งฉากเอกสารนึ้เป็นเอกสารที่ส่งคลื่นเสียงสำหรับก้าวเชิงงานเพื่อกำารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบสงน่อยท่า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 กระบวนการแอสเซมบลีและการเก็บบรรจุ

เมื่อเสร็จสิ้นการสร้างบนแผ่นผลึกแล้ว ก่อนที่จะนำแผ่นผลึกไปเข้ากระบวนการแอสเซมบลี (Assembly Processing) และการเก็บบรรจุ (Packaging) จะมีการตรวจสอบลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MOISFET บนไดอะแฟรมเบื้องต้นก่อน ด้วยการวัดค่ากระแสและแรงดัน ด้วยเครื่องมือซึ่งประกอบด้วยส่วนของเข็มโพรบสำหรับแตะที่ขั้วไฟฟ้าของ MOISFET ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่อง Hewlett packard รุ่น 4061A semiconductor / componet Test System หลังจากนั้นจะนำแผ่นผลึกเข้ากระบวนการต่างๆ ตามลำดับดังนี้

3.5.1 การตัดแยกชิป (Chip separation)

เป็นขั้นตอนการนำแผ่นผลึกที่ผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นแล้ว มาตัดแยกเป็นชิ้นเล็กๆ เรียกว่าชิปหรือคาย (chip or die) เพื่อทำการเก็บบรรจุในขั้นสุดท้าย วิธีการตัดแยกชิปจะใช้ที่ตัดแผ่นที่มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กที่มีเพชรอยู่ที่ปลาย ตัดให้เป็นร่องก่อน แล้วจึงนำไปหักแบ่งออกเป็นชิ้นๆ

3.5.2 การติดชิปบนฐานรอง (chip-attach or chip bonding)

เป็นขั้นตอนการนำชิปมาติดบนตัวถังโลหะ TO-5 ด้วยการหลอมเหลวของทองบนฐานรองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นปล่อยให้เย็น ชิปก็จะติดกับฐานรอง ต่อจากนั้นทำการหยอดด้วยอีพอกซีตามขอบของชิปกับฐานรองอีกทีหนึ่ง

3.5.3 การต่อสายลวด (wire bonding)

เป็นขั้นตอนการต่อสายลวดอลูมิเนียมจากขั้วไฟฟ้าของ MOISFET บนชิปไปยังขาโลหะของฐานรอง ด้วยเครื่องบดคันที่ใช้คลื่นอุลตราโซนิค (Ultrasonic bonding)

เมื่อผ่านขั้นตอนเหล่านี้แล้ว ชิปก็จะถูกติดอยู่บนตัวถังโลหะแบบ TO-5 พร้อมทั้งต่อสายระหว่างขั้วไฟฟ้าของ MOISFET กับขาโลหะของฐานรอง ดังแสดงในรูปที่ 3.5-1 หลังจากนั้นจึงนำไปทำการเก็บบรรจุเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติต่อไป

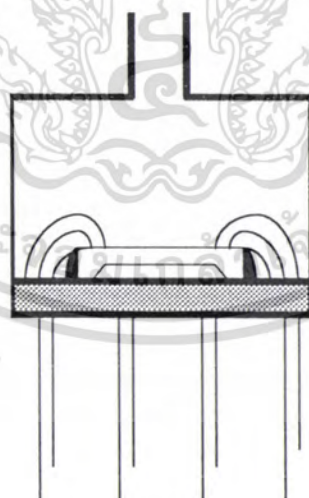
3.5.4 การเก็บบรรจุ

เป็นขั้นตอนการปิดฝาของตัวถังโลหะแบบ TO-5 ด้วยฝาปิดที่ทำการเจาะรูตรงกลาง สำหรับให้ความดันเข้าออก เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ สามารถแสดงด้วยภาพตัดขวางดังรูปที่ 3.5-2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนงานวิชาการใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างฝาปิดกับตัวถังจะใช้กาวอีพอกซีติดเพื่อป้องกันอากาศรั่ว ตัวทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่เสร็จสมบูรณ์ที่พร้อมจะนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ มีลักษณะดังรูปที่ 3.5-3

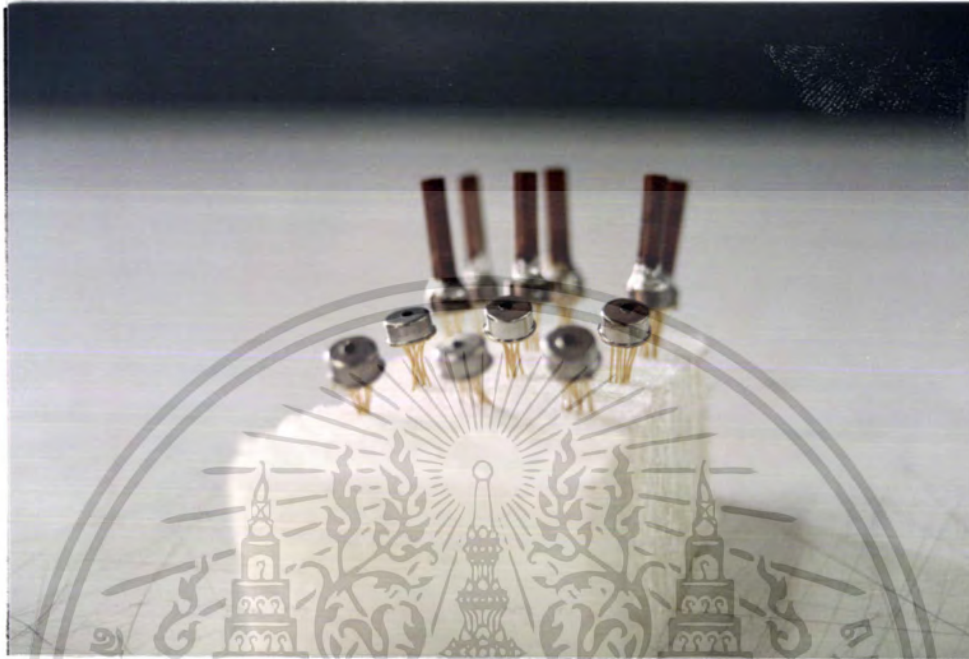


รูปที่ 3.5-1 แสดงภาพถ่ายชิปทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ติดอยู่บนตัวถังโลหะแบบ TO-5 พร้อมทั้งต่อสายระหว่างขั้วไฟฟ้าของ MOISFET กับขาโลหะของฐานรอง



รูปที่ 3.5-2 ภาพตัดขวางแสดงการเก็บบรรจุทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ด้วยตัวถังโลหะแบบ TO-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5-3 แสดงภาพถ่ายตัวทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่เก็บบรรจุเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

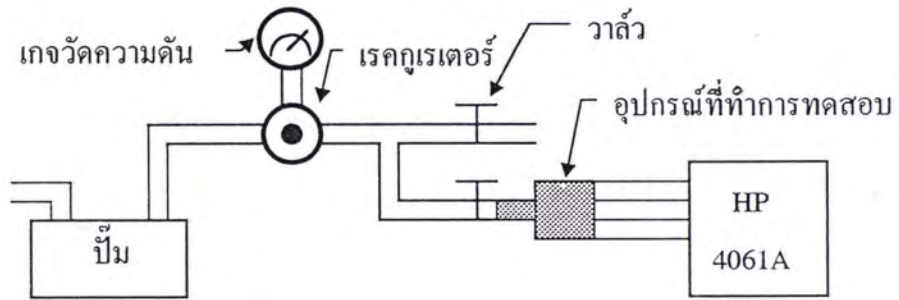
จากการออกแบบ MOISFET บนไดอะแฟรม และดำเนินการสร้างด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐานดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของ MOISFET เมื่อได้รับแรงดัน ซึ่งในการทดสอบนี้จะใช้เครื่องทดสอบค่ากระแสและแรงดันของ Hewlett packard รุ่น 4061A semiconductor / component test system ดังแสดงในรูปที่ 4.1-1



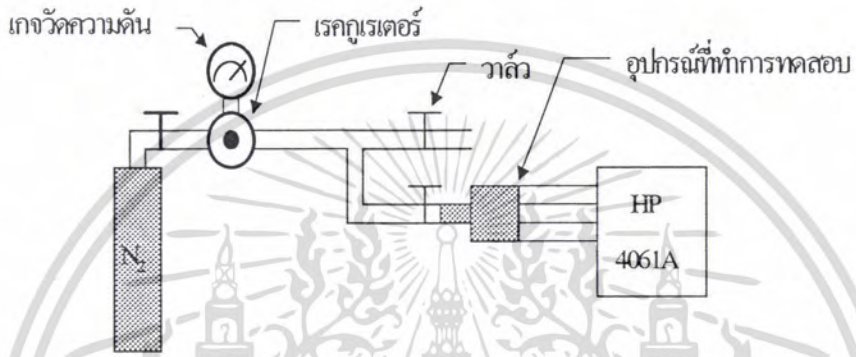
รูปที่ 4.1-1 ภาพถ่ายแสดงการทดสอบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ Hewlett packard

ในการทดลองหาคุณสมบัติต่างๆ ของ MOISFET ที่ความแตกต่างความดันต่างๆ กัน จะใช้ชุดทดสอบที่กำเนิดความแตกต่างของความดันดังแผนผังในรูปที่ 4.1-2 และภาพถ่ายดังในรูปที่ 4.1-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1-2 แผนผังของชุดทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของ MOISFET บนไดอะแฟรมกับความดัน
 (ก) เมื่อความแตกต่างความดันเป็นลบ (ข) เมื่อความแตกต่างความดันเป็นบวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.1-3 ภาพถ่ายแสดงชุดทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของ MOISFET บนไดอะแฟรมกับความดันที่ใช้ในการทดลอง (ก) เมื่อความแตกต่างความดันเป็นลบ (ข) เมื่อความแตกต่างความดันเป็นบวก

4.1 หาค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดันต่างๆ^[4]

จากสมการกระแสของ MOISFET ดังสมการที่ 2.3-2 และ 2.3-3

ช่วงไม่อิ่มตัว

$$I_{DS} = \left(\frac{\beta}{2}\right)[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad ; \quad V_{DS} < V_{GS} - V_T \quad (2.3-2)$$

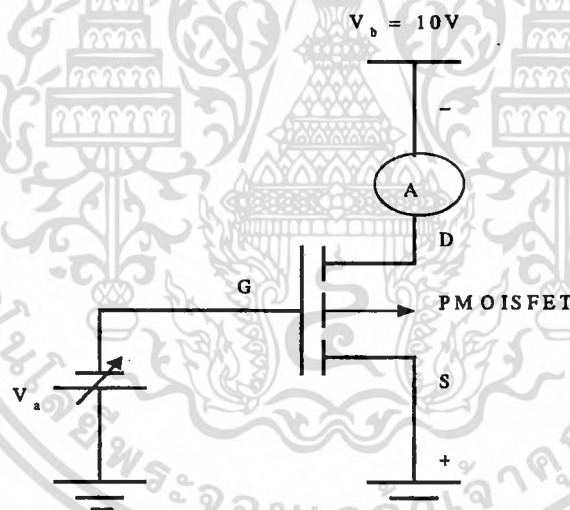
ช่วงอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยเพื่อการศึกษาและเทคโนโลยีขั้นสูง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าเมื่อไม่มีความแตกต่างของความดันระหว่างด้านบนแผ่นกับด้านล่างแผ่นเกิดขึ้น ค่า V_T ที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะมีผลต่อค่ากระแส I_{DS} คือถ้า V_T มีค่ามากค่า I_{DS} ก็จะมีค่าน้อย และในทำนองกลับกัน ดังนั้นถ้าในขณะที่มีความแตกต่างความดันเกิดขึ้น ถ้าค่า V_T เปลี่ยนไปค่า I_{DS} ก็ จะเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นจึงทำการทดสอบค่า V_T ที่ความดันต่าง โดยจะใช้ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOSFET ที่มีความหนา โดอะแพรม 20 ไมโครเมตร และอยู่ห่างจากขอบของโดอะแพรม 20 ไมโครเมตร แล้วทำการเปลี่ยนแปลง ค่าความแตกต่างความดันกับความดันบรรยากาศ (ΔP) จาก -760 ถึง 760 ทอร์ โดยจะเปลี่ยนแปลงทีละ 150 ทอร์ ดังการทดลองต่อไปนี้

4.1.1 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOSFET ที่ความดันต่างๆ

ในการทดลองนี้จะออกแบบตัว PMOSFET บนโดอะแพรมดังรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2 และทำการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOSFET โดยมีวงจรสมมูลซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 2 ชุด (V_a และ V_b) และเครื่องวัดกระแส (AMP Meter) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1-4



รูปที่ 4.1-4 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันขีดเริ่มของ PMOSFET

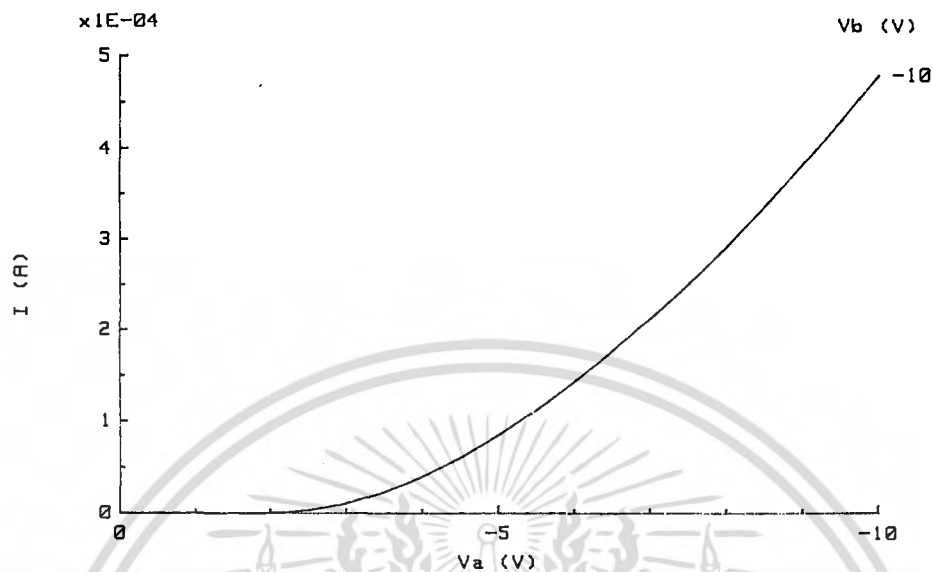
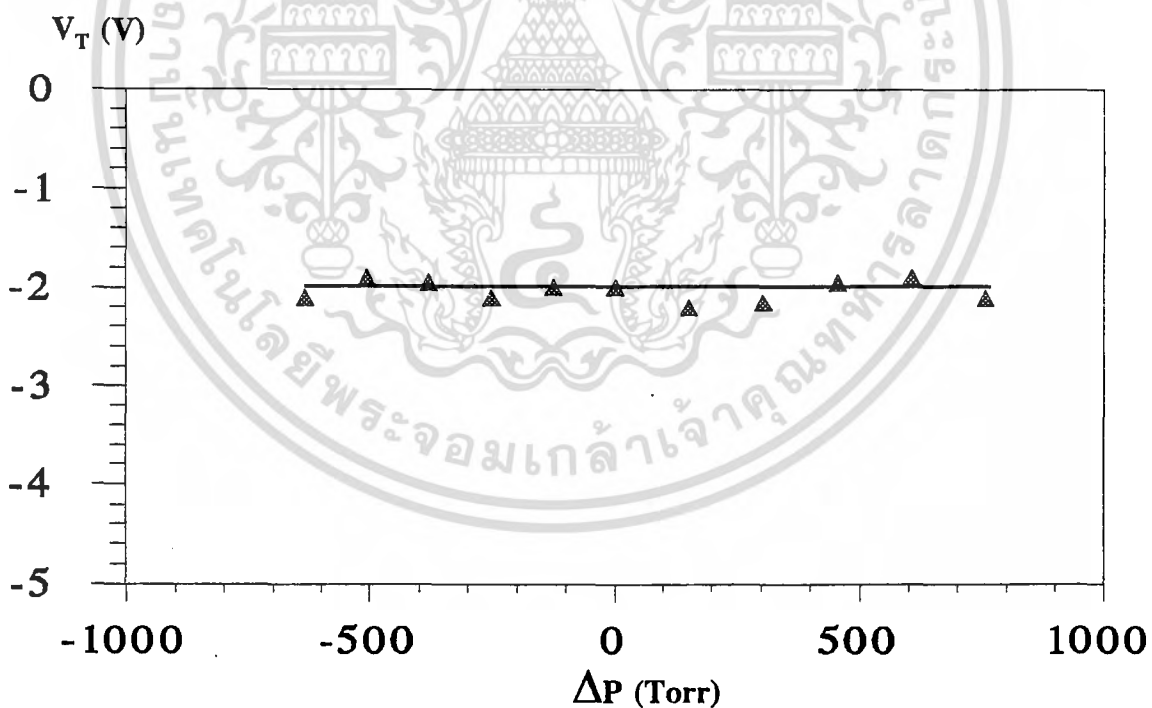
เมื่อต่อวงจรดังรูปที่ 4.1-4 เสร็จแล้วก็ทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ขั้วเกตของ PMOSFET จาก 0 โวลต์ ไปจนถึง -10 โวลต์ เครื่องจะทำการบันทึกค่ากระแสที่ไหลผ่าน PMOSFET ที่แรงดันต่างๆ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1-5 แล้วเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างของความดันจากจากความดันบรรยากาศแล้วนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_T กับความแตกต่างของความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) ดังรูปที่ 4.1-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I-V CHARACTERISTICS

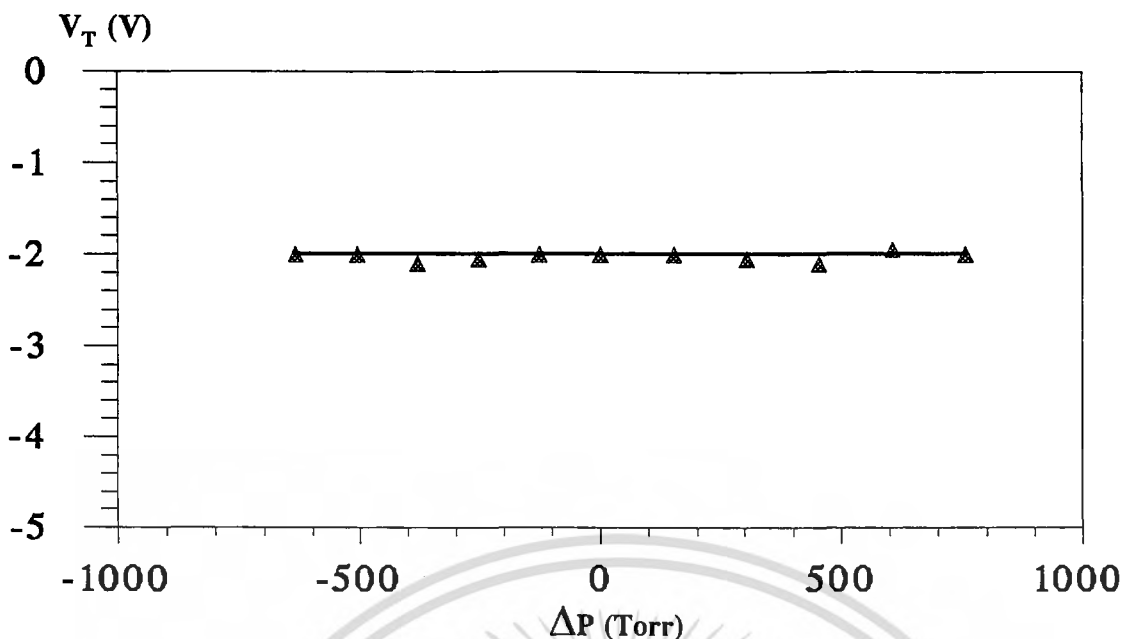
HP 4061A

SAMPLE= B5-P-1T-0-VT

รูปที่ 4.1-5 ตัวอย่างผลการวัดค่า V_T ของ PMOSFET บนโคอะเฟรม

(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของโคอะเฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



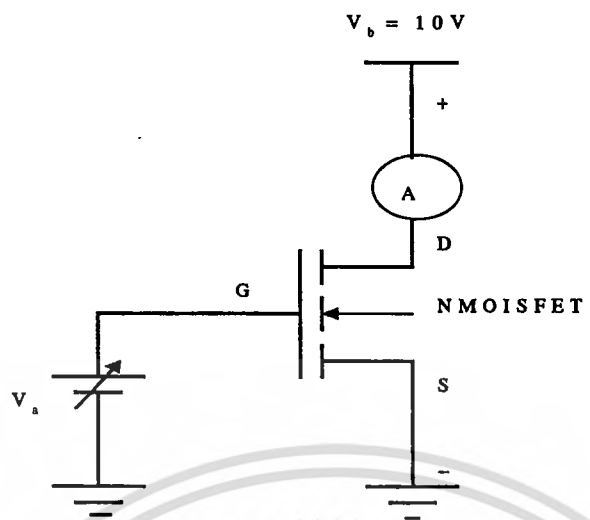
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของ ไดอะแฟรม

รูปที่ 4.1-6 แสดงผลการทดลองวัดค่า V_T กับความแตกต่างความดันของ PMOISFET

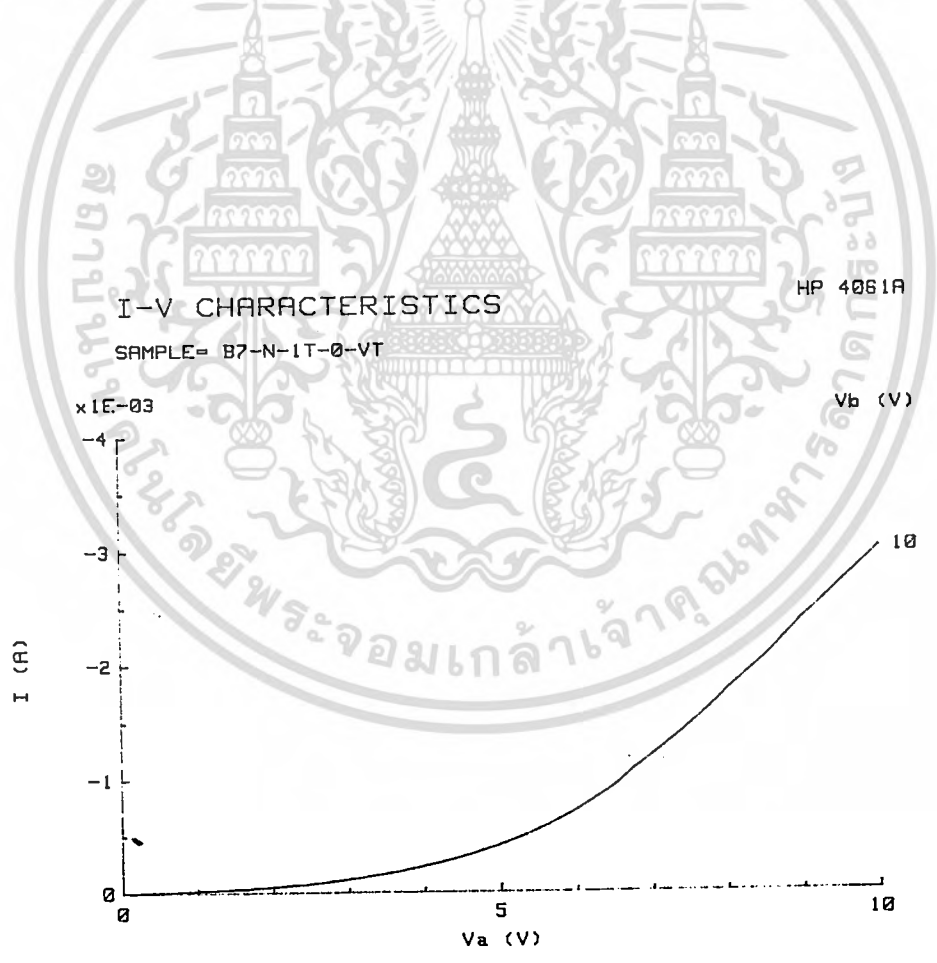
4.1.2 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ

ในการทดลองนี้จะออกแบบตัว NMOISFET บนไดอะแฟรมดังรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2 โดยต่อวงจรวัดดังแสดงในรูปที่ 4.1-7

การทดสอบจะแปรค่าแรงดันที่เกตของ NMOISFET จาก 0 โวลต์ ไปจนถึง 10 โวลต์ เครื่องจะทำการบันทึกค่ากระแสที่ไหลผ่าน NMOISFET ที่แรงดันต่างๆ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1-8 และเมื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_T กับความแตกต่างของความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1-9

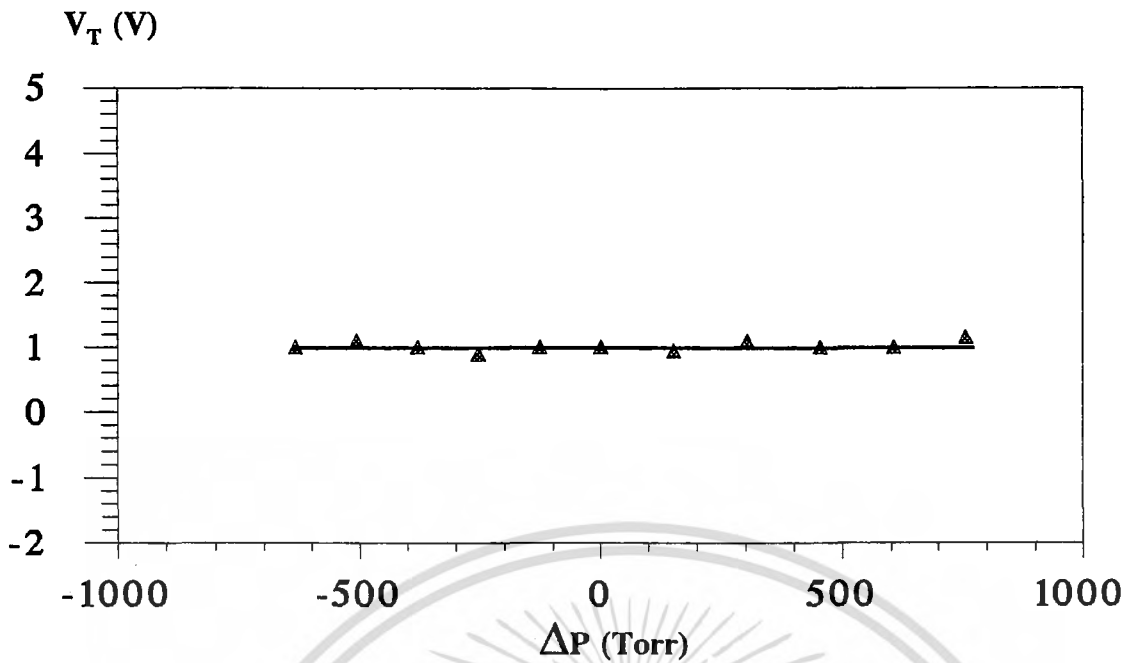


รูปที่ 4.1-7 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันขีดเริ่มของ NMOISFET

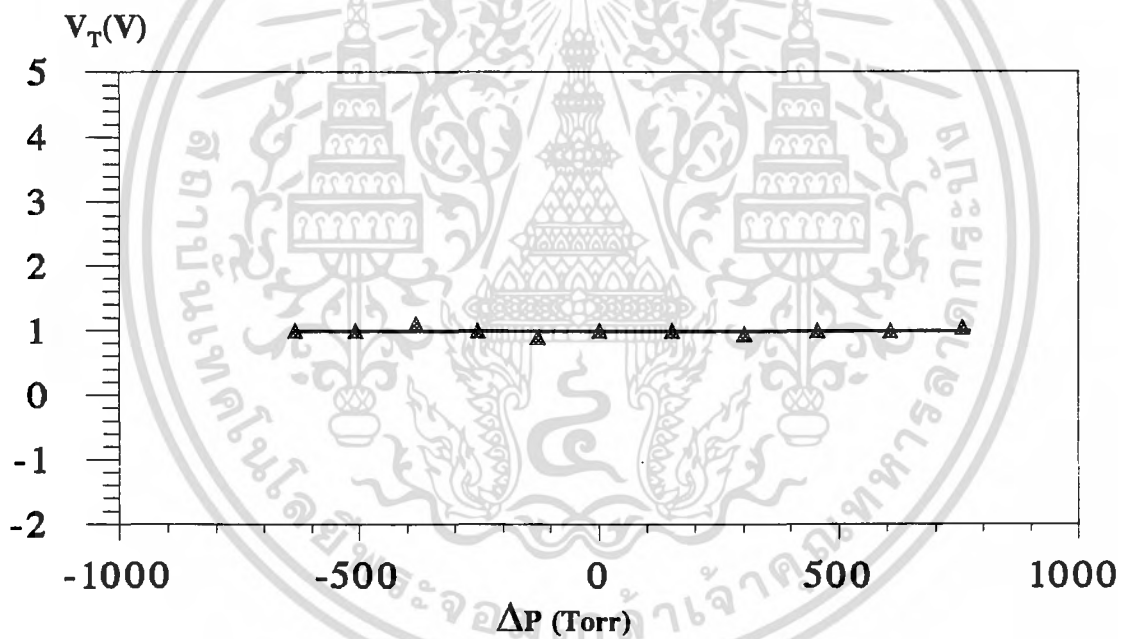


รูปที่ 4.1-8 ตัวอย่างผลการวัดค่า V_T ของ NMOISFET บนไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.1-9 แสดงผลการทดลองวัดค่า V_T กับความแตกต่างความดันของ NMOISFET

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความแตกต่างของความดันเปลี่ยนไป ค่า V_T ของ MOISFET บน ไดอะแฟรมจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนสามารถประมาณได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 หาค่าแรงดันพังทลาย (V_{BV}) ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ

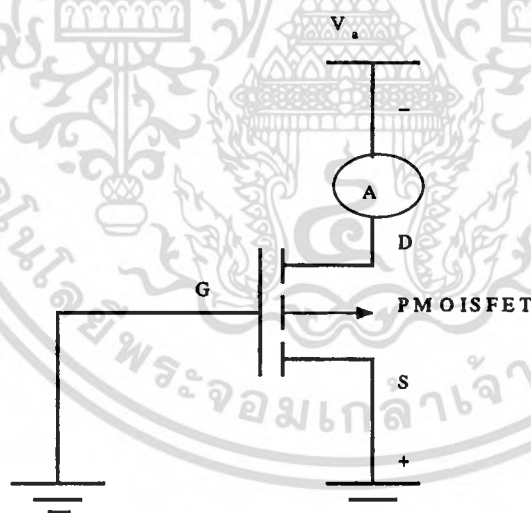
MOISFET ที่ความดันต่างๆ

แรงดันพังทลายของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ ไป เป็นการแสดงถึงความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดในการประยุกต์ใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อเกิดแรงดันพังทลายขึ้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ จนไม่สามารถควบคุมได้และจะเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ได้ ดังนั้นจึงทำการทดสอบค่าแรงดันพังทลาย ว่าเมื่อความแตกต่างของความดันเปลี่ยนไป ค่าแรงดันพังทลายจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ โดยจะใช้ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่มีความหนาของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร และอยู่ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างความดันกับความดันบรรยากาศ (ΔP) จาก -760 ถึง 760 ทอร์ โดยจะเปลี่ยนแปลงทีละ 150 ทอร์ ดัง การทดลองต่อไปนี้

4.2.1 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าแรงดันพังทลายของ

ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ความดันต่างๆ

ในการทดลองนี้จะออกแบบตัว MOISFET บนไดอะแฟรมดังรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2 โดยต่อวงจรวัดดังแสดงในรูปที่ 4.2-1



รูปที่ 4.2-1 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันพังทลายของ PMOISFET

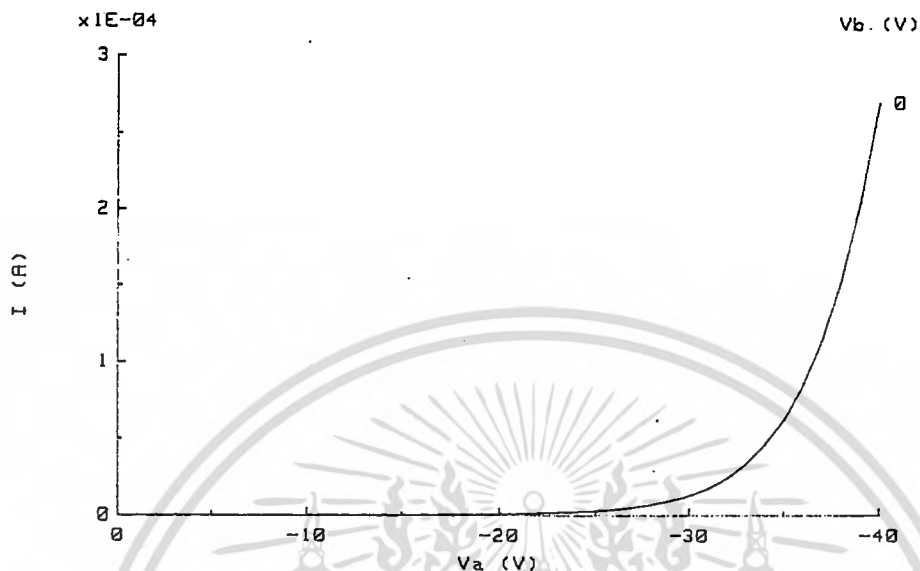
การทดสอบจะแปรค่า V_s จาก 0 โวลต์ ไปจนถึง -40 โวลต์ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2-2 และเมื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{BV} กับความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

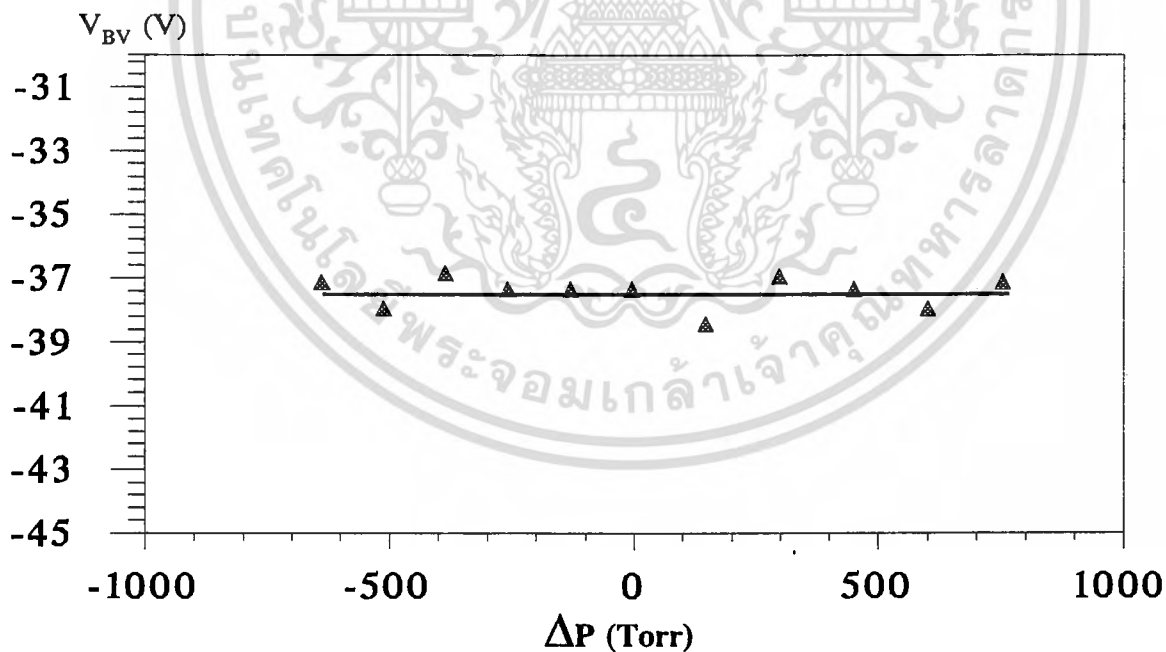
I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= A8-P-1D-1-BD

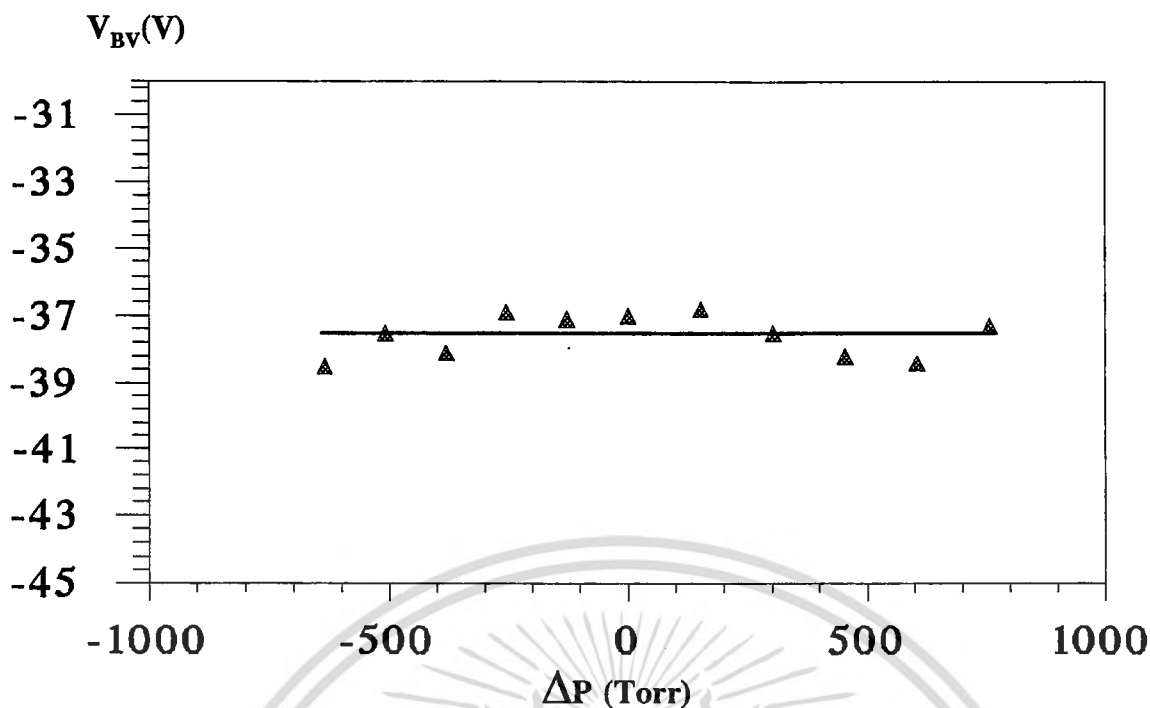


รูปที่ 4.2-2 ตัวอย่างผลการวัดค่าแรงดันฟังก์ทลของ PMOSFET บนไดอะแฟรม



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



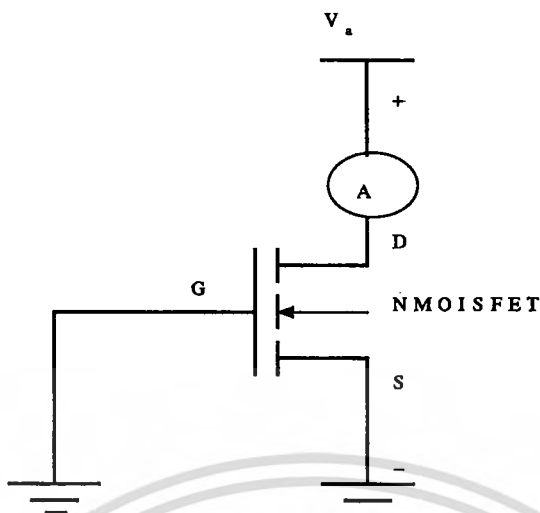
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.2-3 แสดงผลการทดลองวัดค่าแรงดันพื้นทั้งทลากับความแตกต่างความดันของ PMOISFET

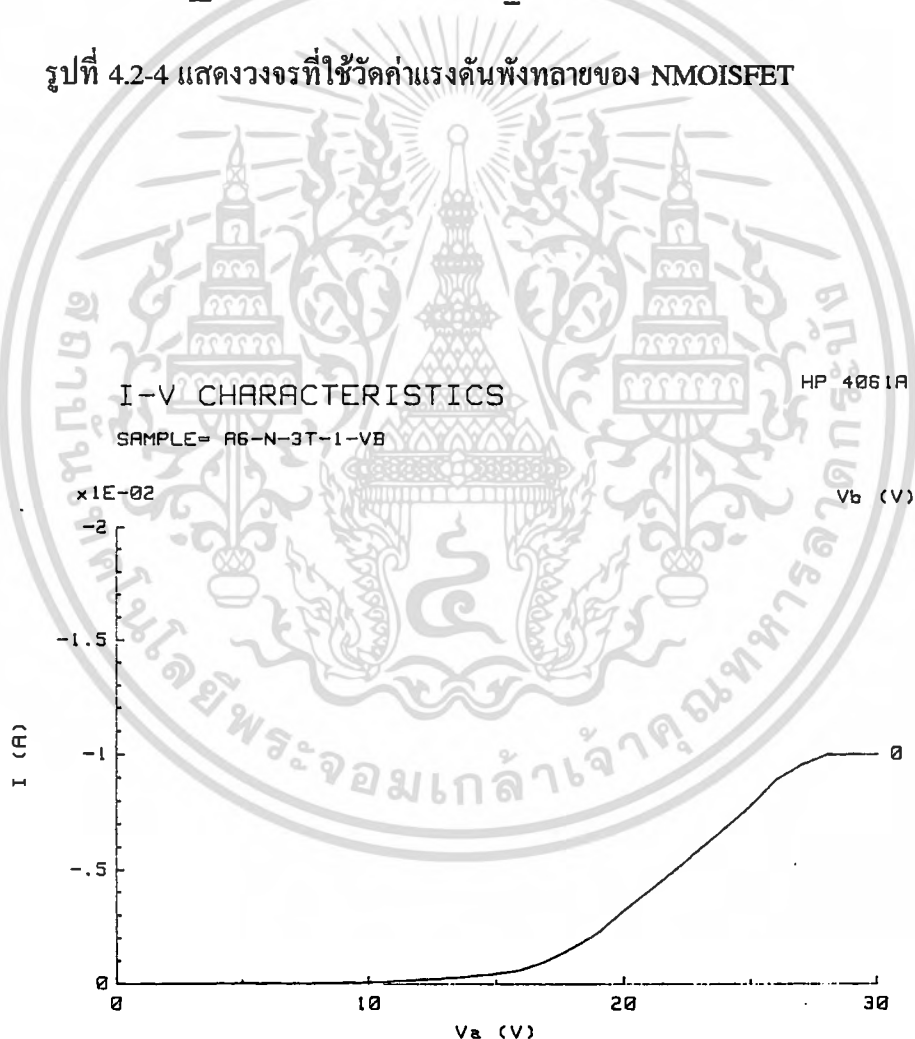
4.2.2 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าแรงดันพื้นทั้งทลยาของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่าง

ในการทดลองนี้จะออกแบบตัว NMOISFET บนไดอะแฟรมดังรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2 โดยต้องวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.2-4

การทดลองจะแปรค่า V_g จาก 0 โวลต์ไปจนถึง 30 โวลต์ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2-5 และเมื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{BV} กับความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2-6

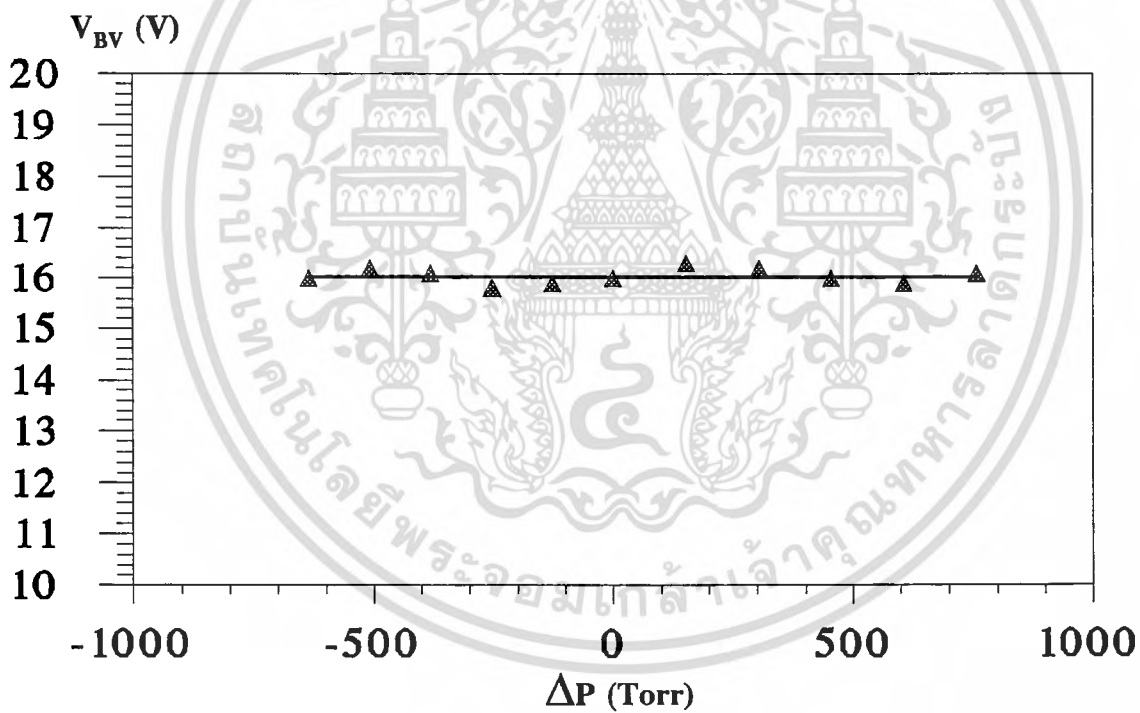
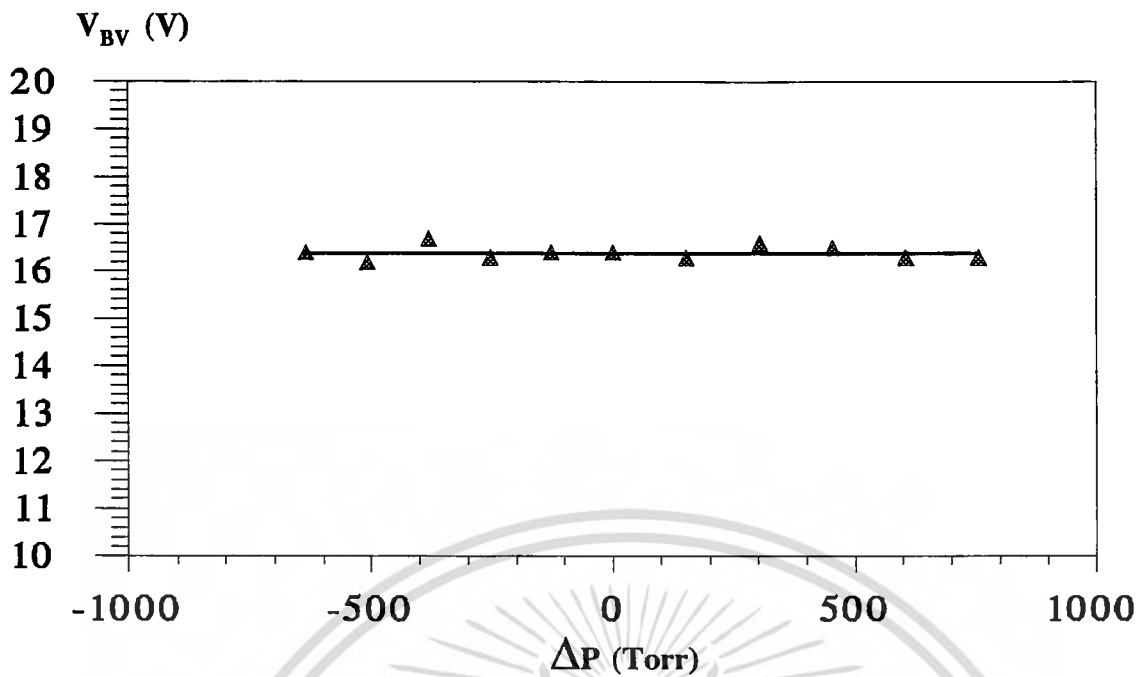


รูปที่ 4.2-4 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันพื้นทลยของ NMOISFET



รูปที่ 4.2-5 ตัวอย่างผลการวัดค่าแรงดันพื้นทลยของ NMOISFET บนไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2-6 แสดงผลการทดลองวัดค่าแรงดันพ้งหลายกับความแตกต่างความดันของ NMOISFET

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความแตกต่างของความดันเปลี่ยนไป ค่าแรงดันพ้งหลายจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนสามารถประมาณได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 หาค่า k' ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดันต่าง ๆ

ในสมการกระแสของ MOISFET ดังสมการที่ 2.3-2 และ 2.3-3 เมื่อแทน $\beta = k'(W/L)$ ลงไปจะได้ดังสมการต่อไปนี้

ช่วงไม่อิ่มตัว

$$I_{DS} = \frac{k'(W/L)}{2} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad ; V_{DS} < V_{GS} - V_T \quad (4.3-1)$$

ช่วงอิ่มตัว

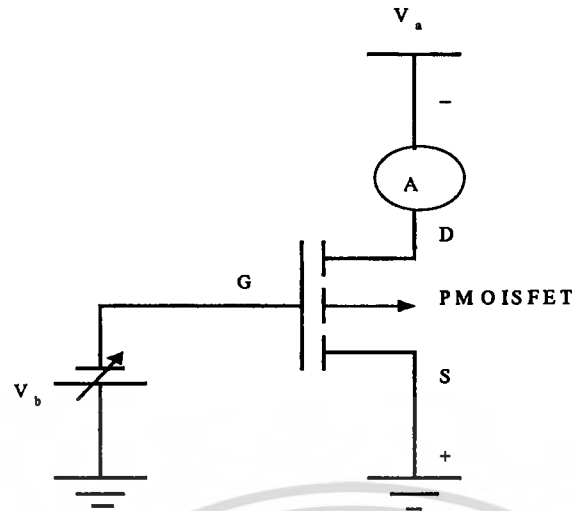
$$I_{DS} = \frac{k'(W/L)}{2} [V_{GS} - V_T]^2 \quad ; V_{DS} < V_{GS} - V_T \quad (4.3-2)$$

จากสมการ 4.3-1 และ 4.3-2 จะเห็นว่าถ้าให้ V_{GS} , V_{DS} เป็นค่าคงที่ และจากหัวข้อ 4.1 พบว่าค่า V_T ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความแตกต่างของความดันจากความดันบรรยากาศเปลี่ยนไป ส่วนค่า W/L นั้นมีค่าคงที่เนื่องจากการให้ความดันนั้น ให้ไม่มากจนถึงทำให้ไดอะแฟรมเกิดการยืดตัว ดังนั้นถ้ากระแส I_{DS} ที่ได้ ออกมามีค่าเปลี่ยนไปเมื่อมีความแตกต่างของความดันจากความดันบรรยากาศเกิดขึ้น ก็แสดงว่าความแตกต่างของความดันจากความดันบรรยากาศทำให้ค่า k' เปลี่ยนไป การหาค่า k' ก็ทำได้โดยวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ MOISFET บนไดอะแฟรม แล้วพิจารณาในช่วงอิ่มตัว แทนค่าต่างๆ ลงไปในสมการที่ 4.3-2 ก็จะได้ค่า k' ออกมา โดยจะพิจารณาที่ $V_{GS}=5$ สำหรับทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET และที่ $V_{GS}=5$ สำหรับทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET โดยใช้ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่มีความหนาของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร และอยู่ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) จาก -760 ถึง 760 ทอร์ โดยจะเปลี่ยนแปลงทีละ 150 ทอร์ ดังการทดลองต่อไปนี้

4.3.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่า k' ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ความดันต่างๆ

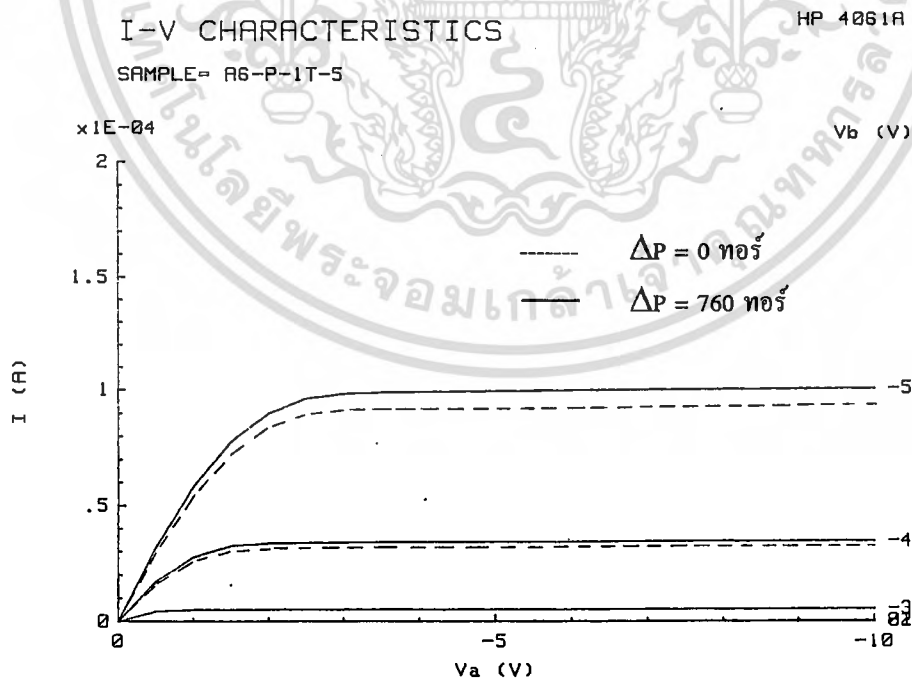
ในการทดลองนี้จะทำการออกแบบตัว PMOISFET ดังรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2 แล้วทำการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดัน โดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.3-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3-1 แสดงวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOSFET

การทดสอบจะแปรค่า V_b จาก 0 ถึง -5 โวลต์ และแปรค่า V_a จาก 0 ถึง -10 โวลต์ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3-2 และเมื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่าง k' ($\Delta k'$) กับความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3-3 โดยการคำนวณค่า k' จากคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOSFET



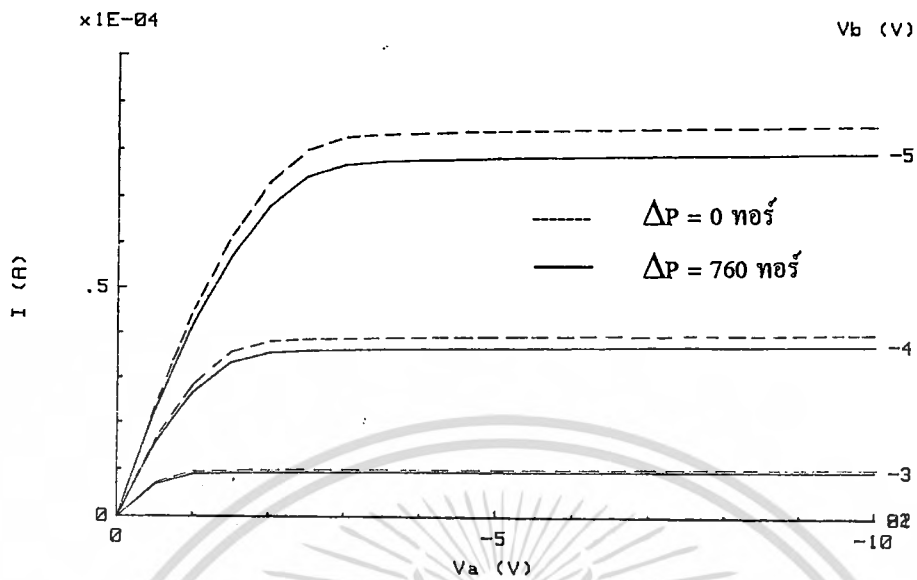
(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I-V CHARACTERISTICS

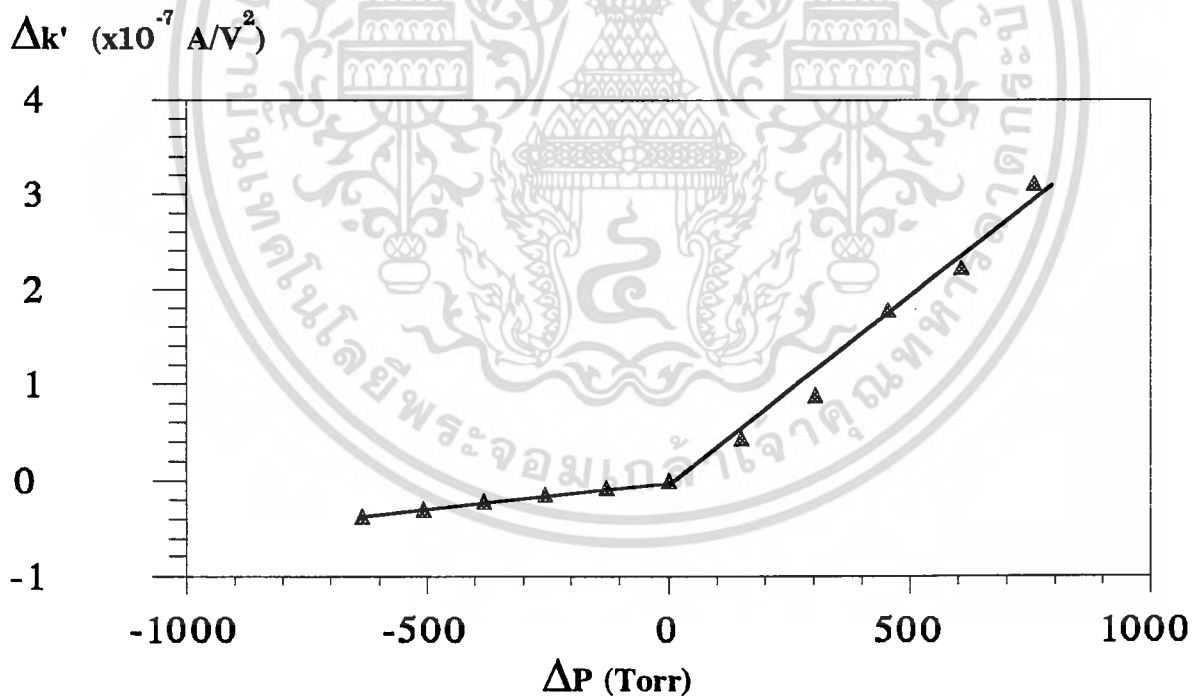
HP 4061A

SAMPLE= B5-P-1T-5



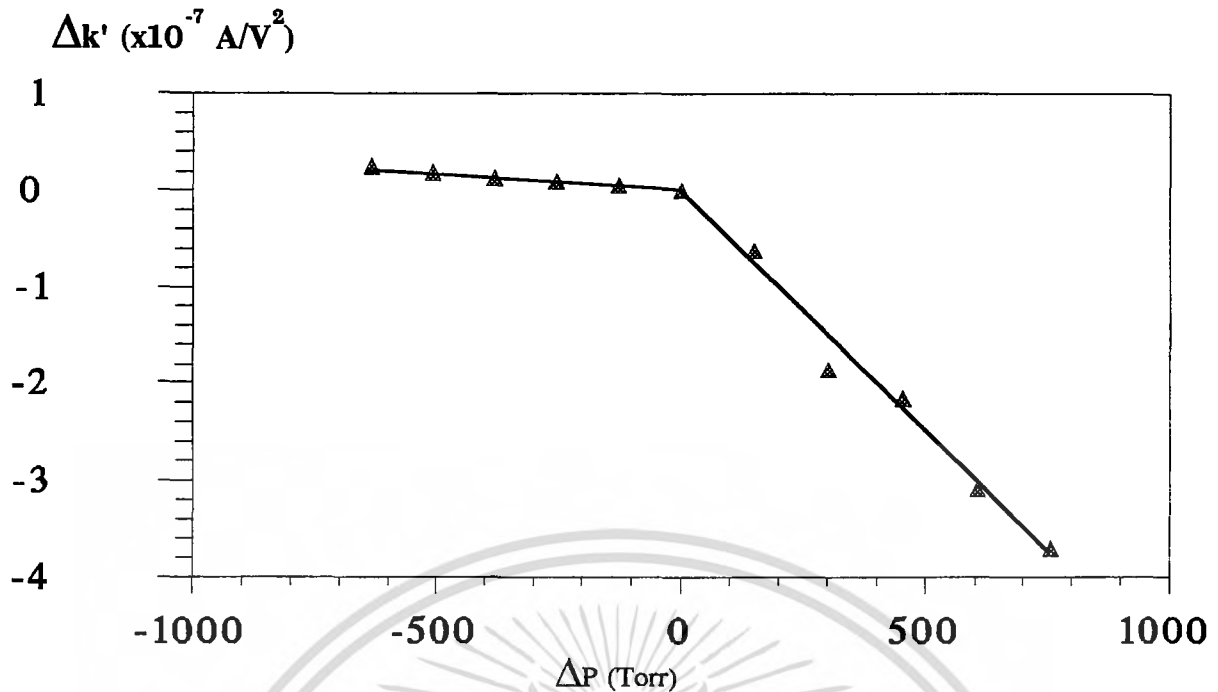
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.3-2 ตัวอย่างผลการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOSFET



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

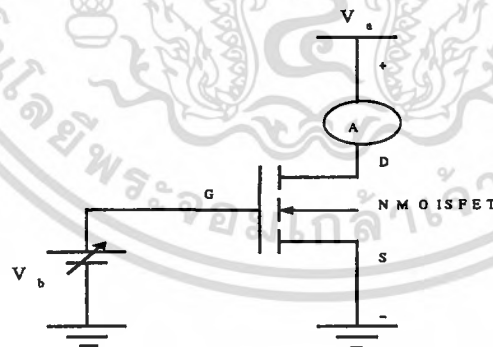


(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของโคอะแฟรม

รูปที่ 4.3-3 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของ k' กับความแตกต่างความดันของ PMOISFET

4.3.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่า k' ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทำการออกแบบตัว NMOISFET ดังรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2 แล้วทำการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันโดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.3-4



รูปที่ 4.3-4 แสดงวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET

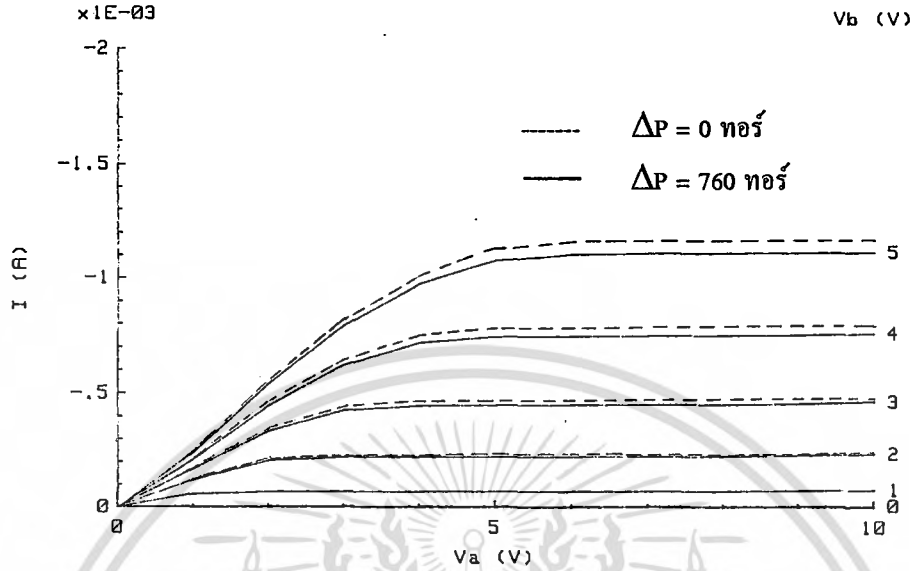
การทดสอบจะแปรค่า V_b จาก 0 ถึง 5 โวลต์ และแปรค่า V_d จาก 0 ถึง 10 โวลต์ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3-5 และเมื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่าง k' ($\Delta k'$) กับความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3-6 โดยการคำนวณค่า k' จากคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= A6-N-1T

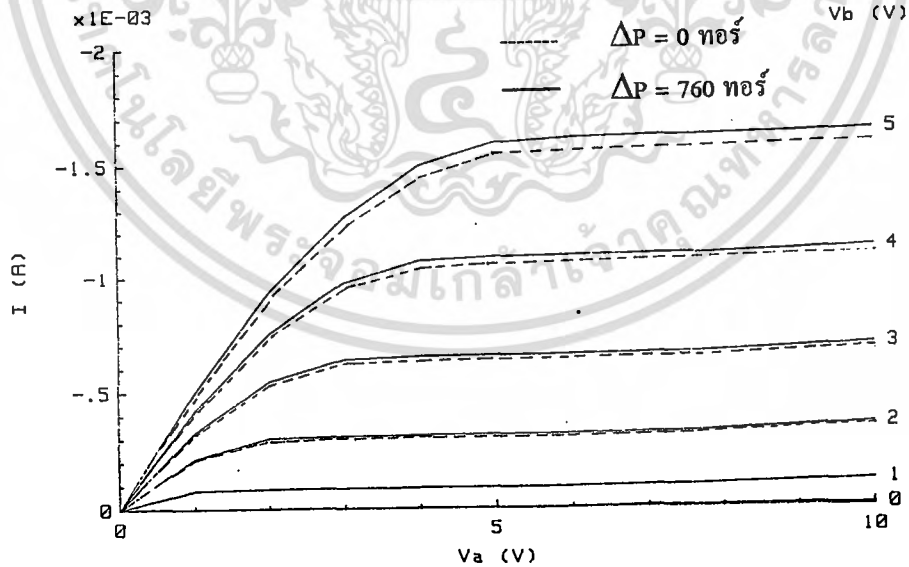


(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

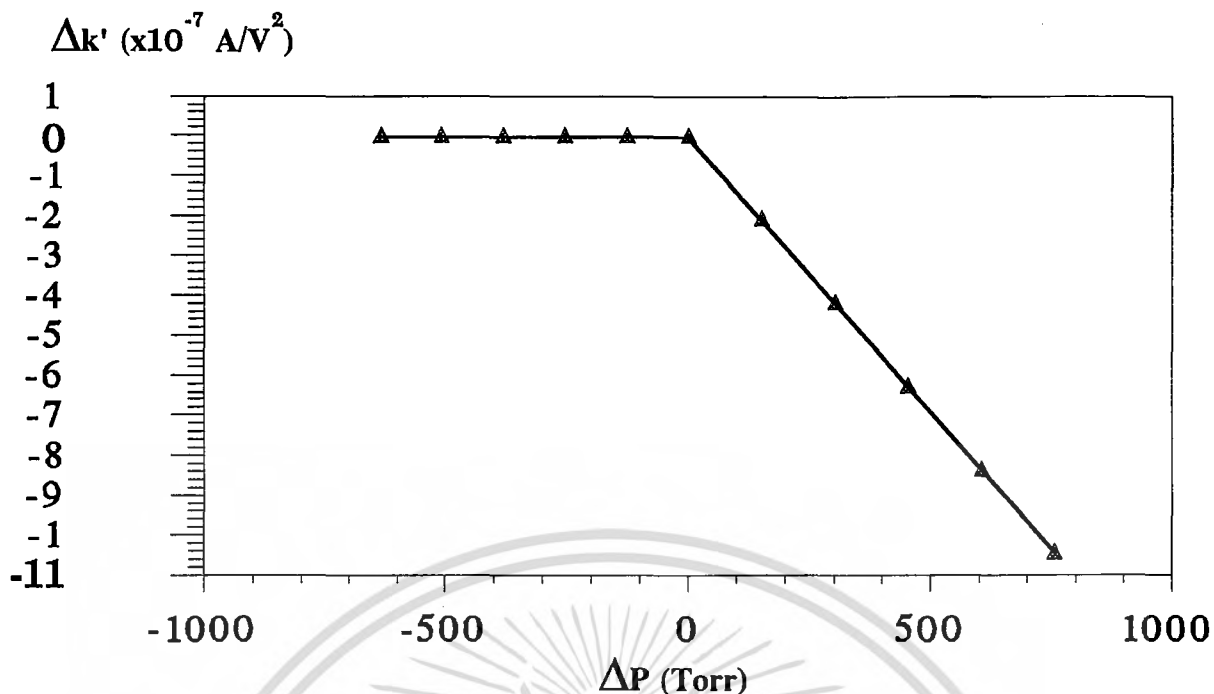
SAMPLE= B1-N-1T



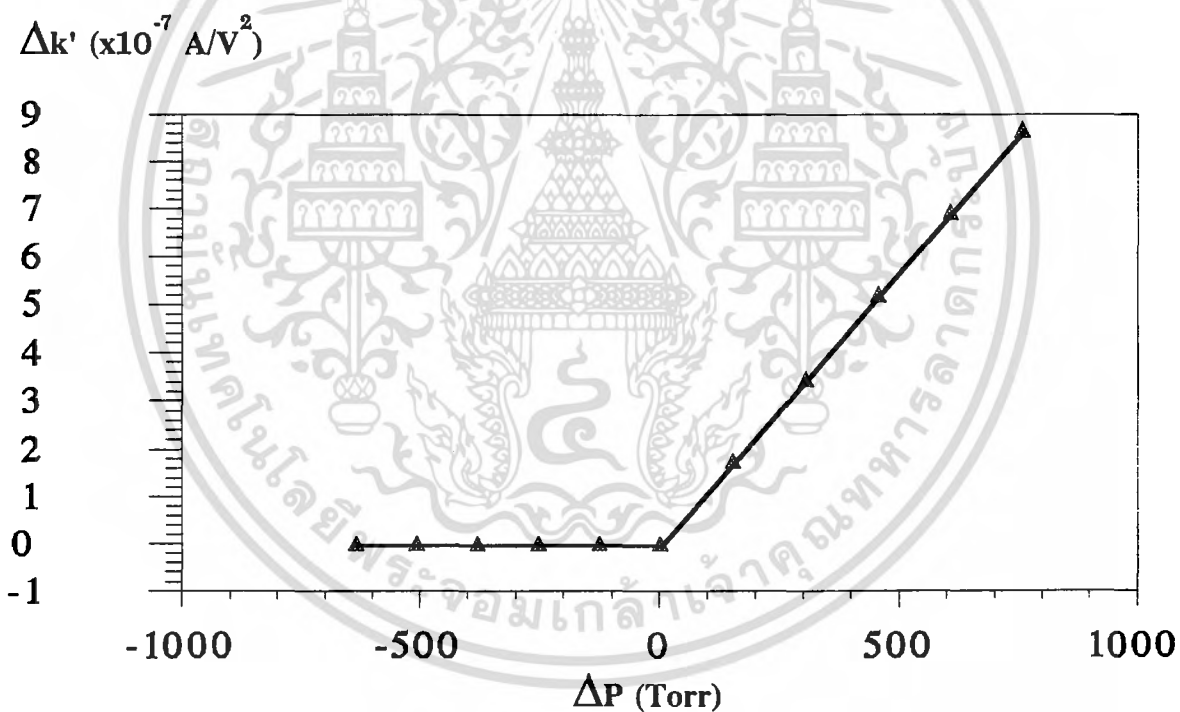
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.3-5 ตัวอย่างผลการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



(ข) กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.3-6 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของ k' กับความแตกต่างความดันของ NMOISFET

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไปค่า k' ของ MOISFET ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 หาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกทของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดันต่างๆ

จากสมการกระแสของ MOISFET ดังสมการที่ 4.3-1 และ 4.3-2 พบว่าเมื่อ k' เปลี่ยนแปลงจะทำให้ I_{DS} เปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่ว่า k' มีค่าดังนี้

$$k' = \mu_{Au} \cdot C_{ox} \quad (4.4-1)$$

ดังนั้นค่าที่อาจทำให้ k' เปลี่ยนแปลง เมื่อเกิดความแตกต่างของความดันได้ ก็คือค่า μ_{Au} และ C_{ox} จากแบบจำลองทางฟิสิกส์ของ MOISFET ดังรูปที่ 2.4-3 พบว่าค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกท (C_{ox}) มีค่าดังนี้

$$C_{ox} = C_s + C_c + C_d \quad (4.4-2)$$

โดย C_s และ C_d มีค่าน้อยมากเพราะส่วนที่ซ้อนทับที่ออกแบบไว้มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงได้

$$C_{ox} = C_c \quad (4.4-3)$$

ดังนั้นวงจรสมมูลย์ของ MOISFET ที่มี C_{ox} เป็นดังรูปที่ 4.4-1



ก. PMOSFET

ข. NMOSFET

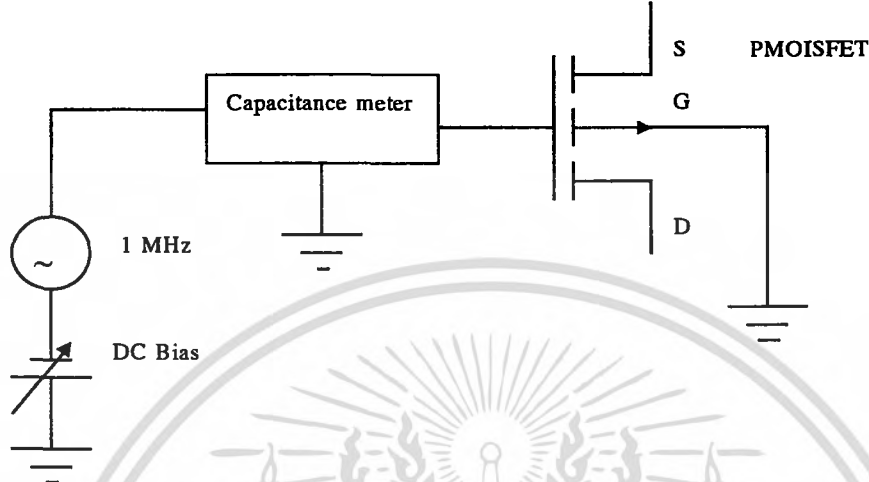
รูปที่ 4.4-1 แสดงวงจรสมมูลย์ของ MOISFET ที่มี C_{ox} แฝงอยู่

ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการทดลองหาค่า C_{ox} เมื่อมีความแตกต่างของความดันเกิดขึ้น โดยจะใช้ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่มีความหนาของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร และอยู่ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างความดันกับความดันบรรยากาศ (ΔP) จาก -760 ถึง 760 ทอร์ โดยจะเปลี่ยนแปลงทีละ 150 ทอร์ ดังการทดลองต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

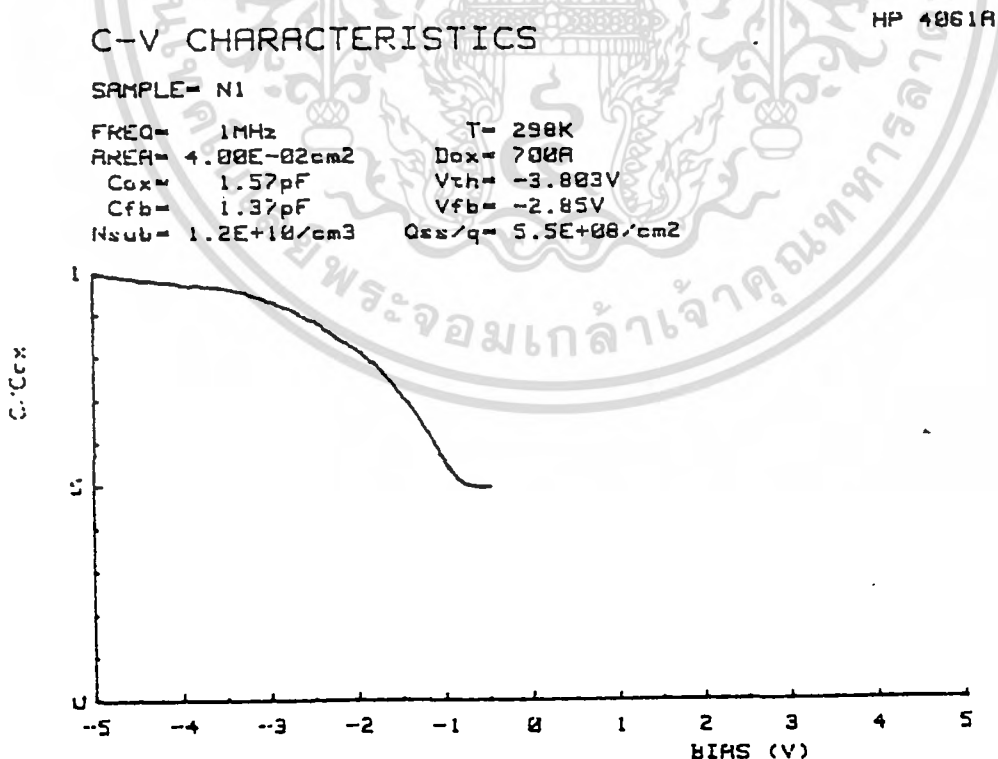
4.4.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOSFET ที่ความดันต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทำการออกแบบตัว PMOSFET ดังรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2 แล้วทำการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกต (C_{ox}) โดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.4-2



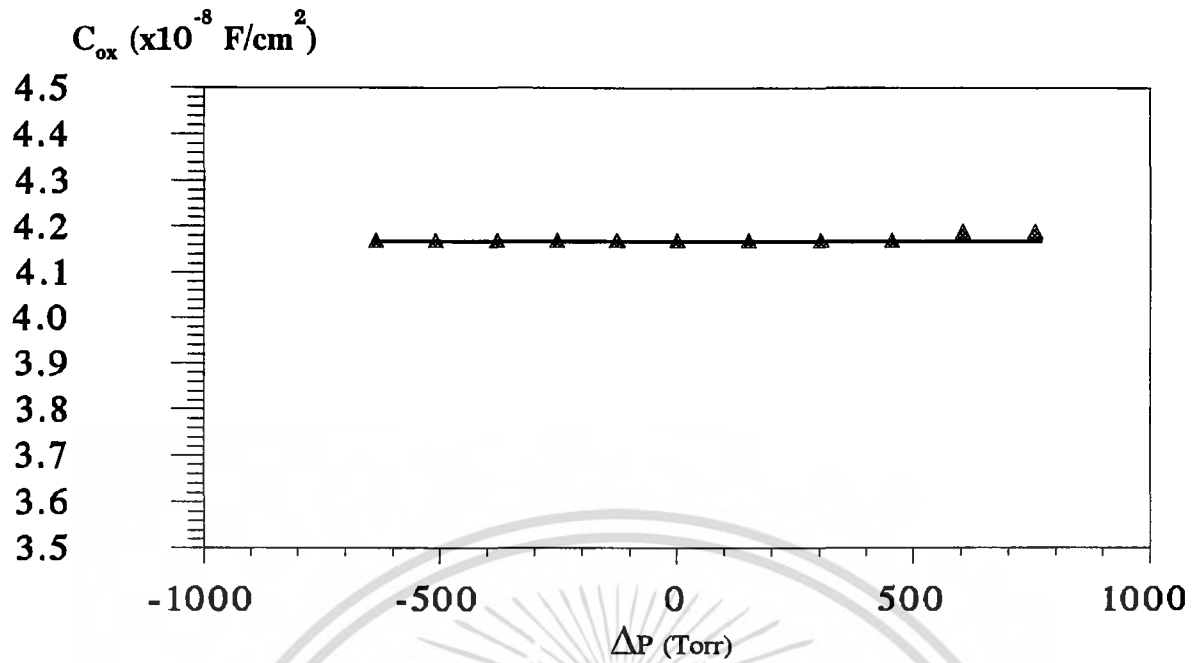
รูปที่ 4.4-2 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ PMOSFET

การทดสอบจะแปรค่าแรงดัน DC ที่ไบอัสจาก 0 ถึง -5 โวลต์ แล้วทำการวัดค่าตัวเก็บประจุออกมา ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4-3 และเมื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุที่เกต (C_{ox}) กับความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4-4

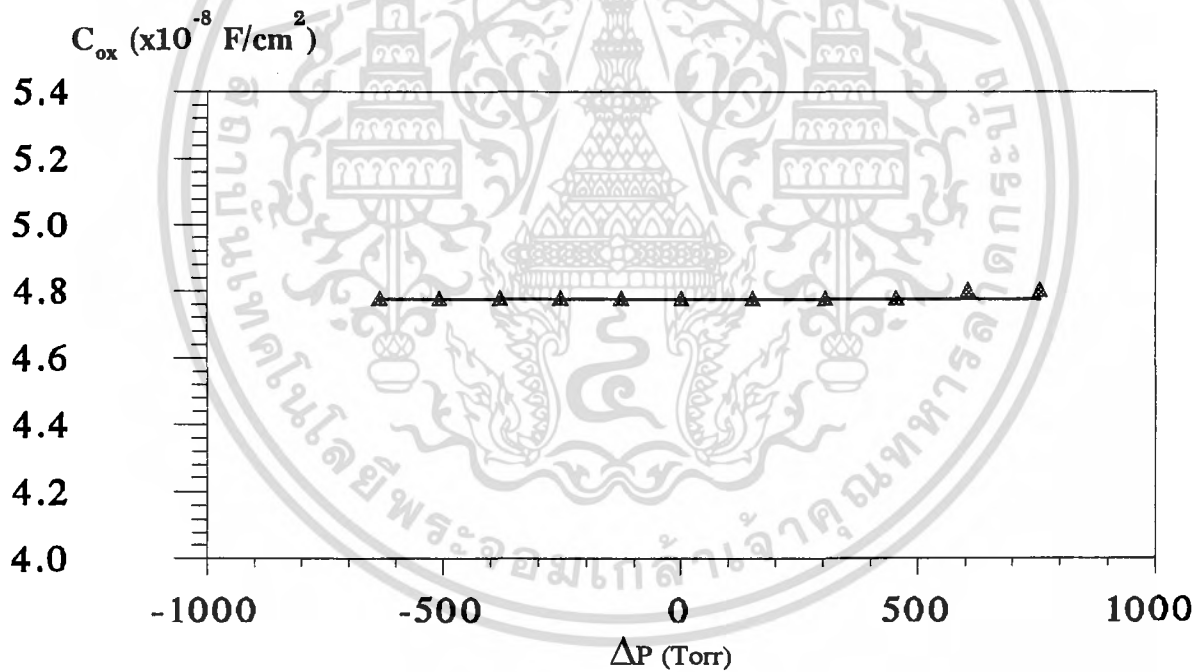


รูปที่ 4.4-3 ตัวอย่างผลการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ PMOSFET บนไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของโคอะแฟรม



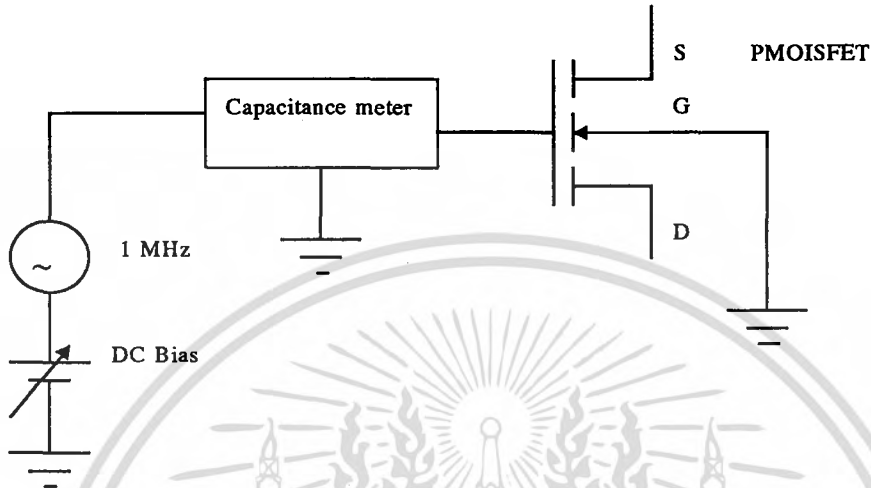
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของโคอะแฟรม

รูปที่ 4.4-4 แสดงผลการทดลองวัดค่าตัวเก็บประจุกับความแตกต่างความดันของ PMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกทของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทำการออกแบบตัว NMOISFET ดังรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2 แล้วทำการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกท (C_{ox}) โดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.4-5



รูปที่ 4.4-5 แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกทของ NMOISFET

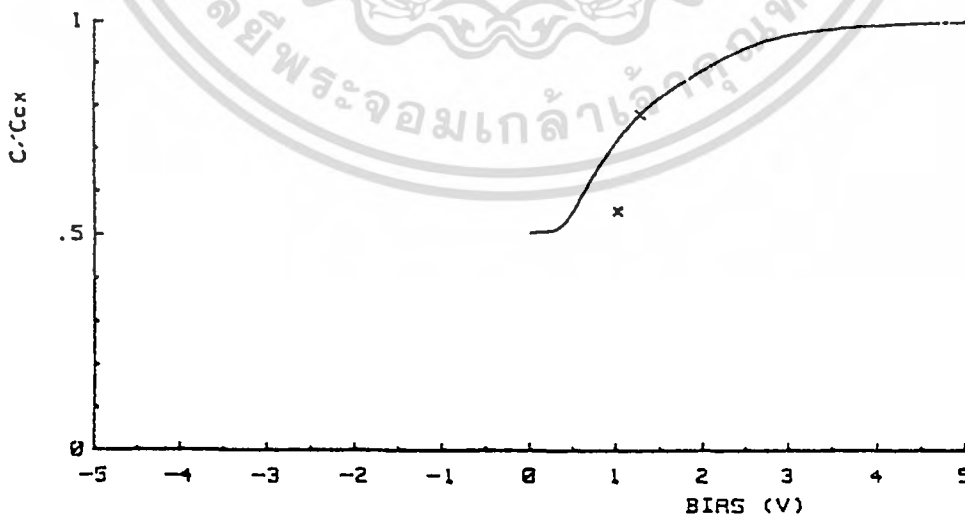
การทดสอบจะแปรค่าแรงดัน DC ที่ไบอัสจาก 0 ถึง 5 โวลต์ แล้วทำการวัดค่าตัวเก็บประจุออกมา ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4-6 และเมื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุที่เกท (C_{ox}) กับความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4-7

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061E

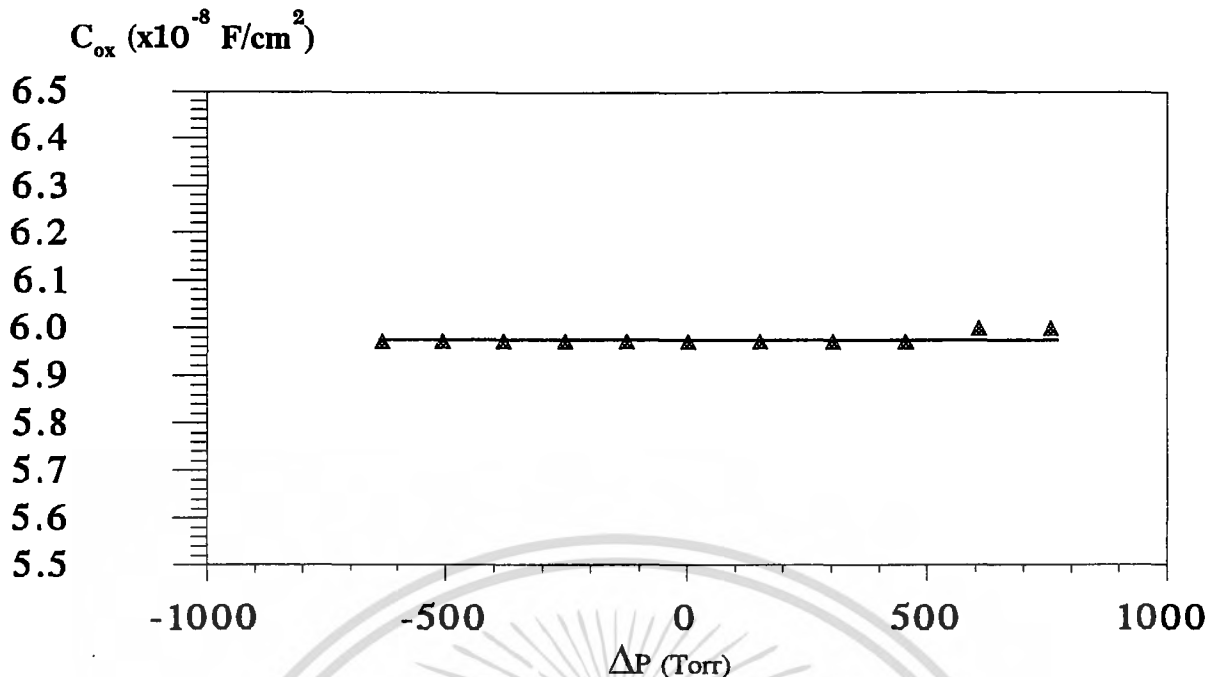
SAMPLE=N1

FREQ=	1MHz	T=	298K
AREA=	4.00E-02cm ²	Dox=	700Å
Cox=	3.10pF	Vch=	1.022V
Cfb=	2.42pF	Vfb=	1.28V
Nsub=	1.2E+18/cm ³	Qss/q=	9.1E+08/cm ²

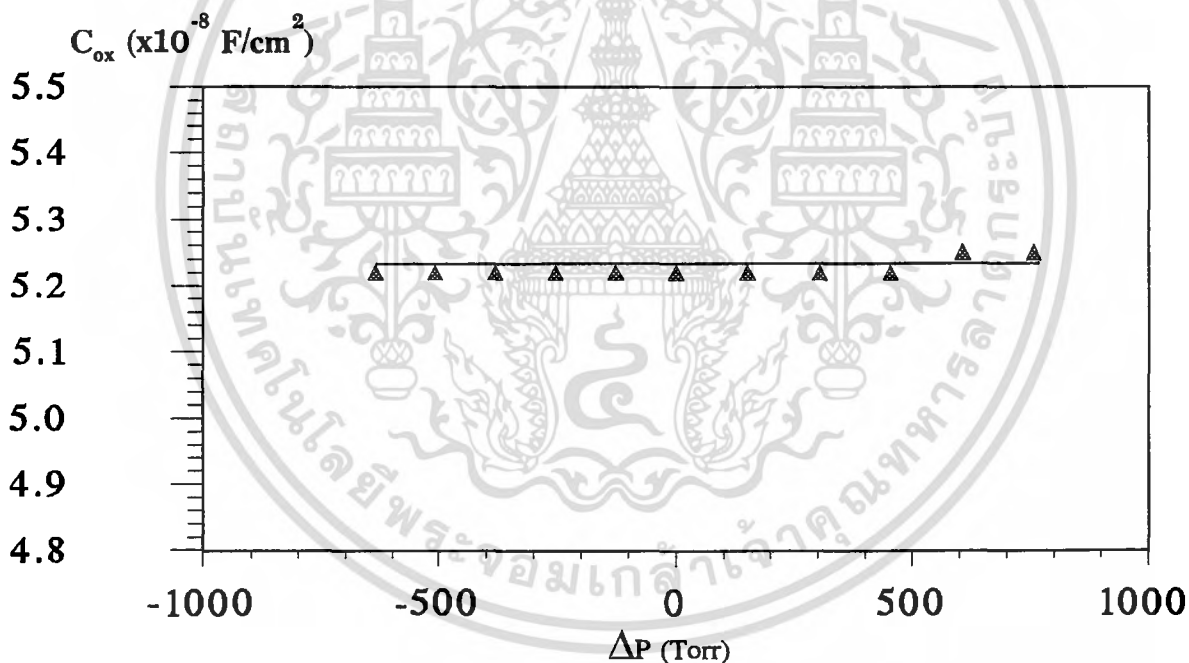


รูปที่ 4.4-6 ตัวอย่างผลการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกทของ NMOISFET บน ไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อกระแสไหลนานานกับขอบของไดอะแฟรม



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.4-7 แสดงผลการทดลองวัดค่าตัวเก็บประจุกับความแตกต่างความดันของ NMOISFET

จากผลการทดลองพบว่าค่า C_{ox} มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อมีความแตกต่างของความดันเกิดขึ้นจนสามารถประมาณได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 หาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความหนา ไดอะแฟรมต่างๆ

จากหัวข้อที่ 2.7.2.2 พบว่าความเค้นบนไดอะแฟรมในแนวรัศมีและความเค้นตั้งฉากเป็นดังสมการ
ที่ 2.7-4

$$\sigma_r - \sigma_t = \sigma'(x,y)(2R/d)^2 P \quad (2.7-4)$$

ดังนั้นถ้าความหนา d ของไดอะแฟรมเปลี่ยนไปก็จะทำให้ค่า σ_r และ σ_t เปลี่ยนไปด้วย ในการ
สร้างทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ให้มีค่าความไวสูงนั้นก็ขึ้นกับค่าความหนาของไดอะแฟรม
ด้วย

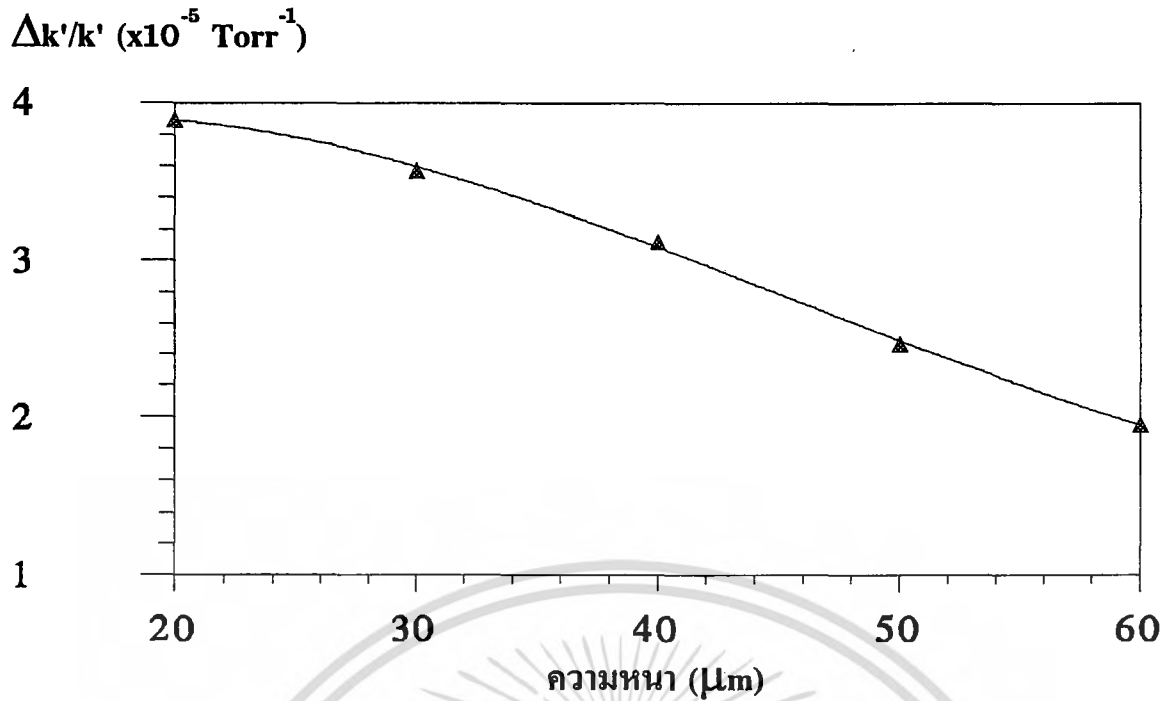
4.5.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดัน แบบ PMOISFET ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทำการสร้าง PMOISFET บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 20, 30, 40, 50 และ 60
ไมโครเมตร อยู่ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร ดังการออกแบบในรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2
เมื่อสร้างเสร็จแล้วก็ทำการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOISFET ที่สร้างขึ้นที่ความแตกต่าง
ความดันจากความดันบรรยากาศ 760 ทอร์ แล้วคำนวณค่า k' จากกราฟที่ได้ (วงจรถ่ายที่วัดแสดงดังในรูปที่
4.3-1 และตัวอย่างผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.3-2) หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความ
หนาของไดอะแฟรมกับการเปลี่ยนแปลงค่าความไว ($\Delta k'/k'$) ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4.5-1

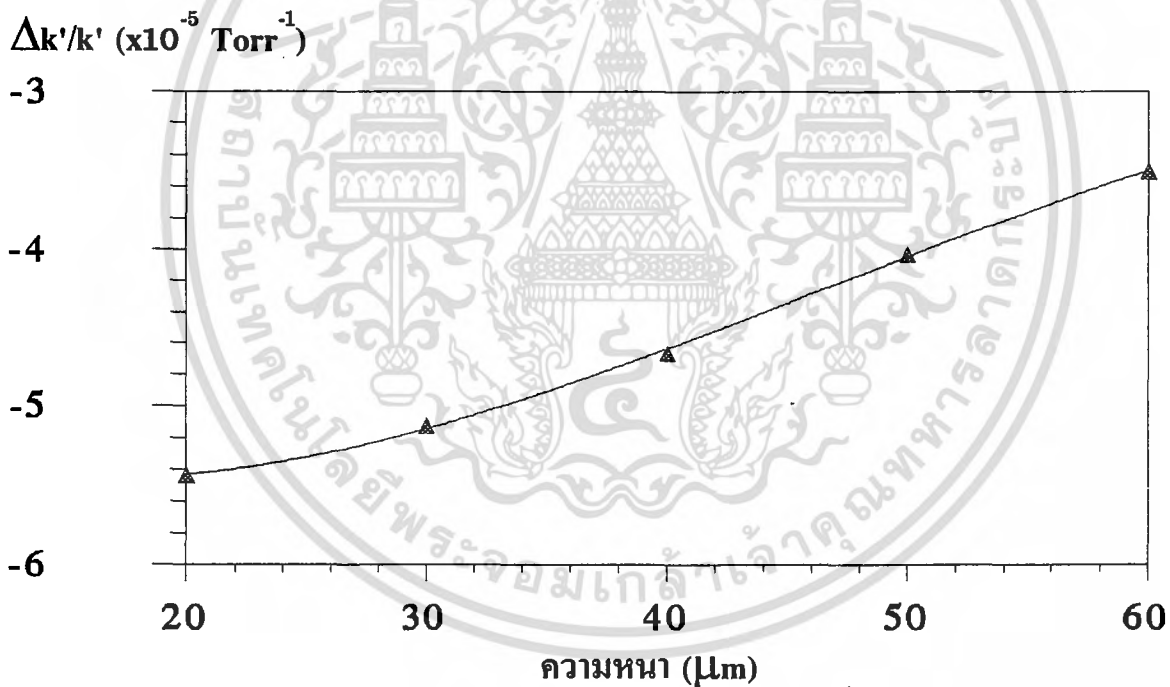
4.5.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ ความดันแบบ NMOISFET ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างๆ

ในการทดลองนั้นจะทำการสร้าง NMOISFET บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 20, 30, 40, 50 และ
60 ไมโครเมตร อยู่ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร ดังการออกแบบในรูปที่ 3.3-1 และ 3.3-2
เมื่อสร้างเสร็จแล้วก็ทำการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET ที่สร้างขึ้นที่ความดันต่าง
ต่างจากความดันบรรยากาศ 760 ทอร์ แล้วคำนวณค่า k' จากกราฟที่ได้ (วงจรถ่ายที่วัดแสดงดังในรูปที่ 4.3-
4 และตัวอย่างผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.3-5) หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา
ของไดอะแฟรมกับการเปลี่ยนแปลงค่าความไว ($\Delta k'/k'$) ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4.5-2

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อไดอะแฟรมหนาขึ้นความไวจะมีค่าลดลง



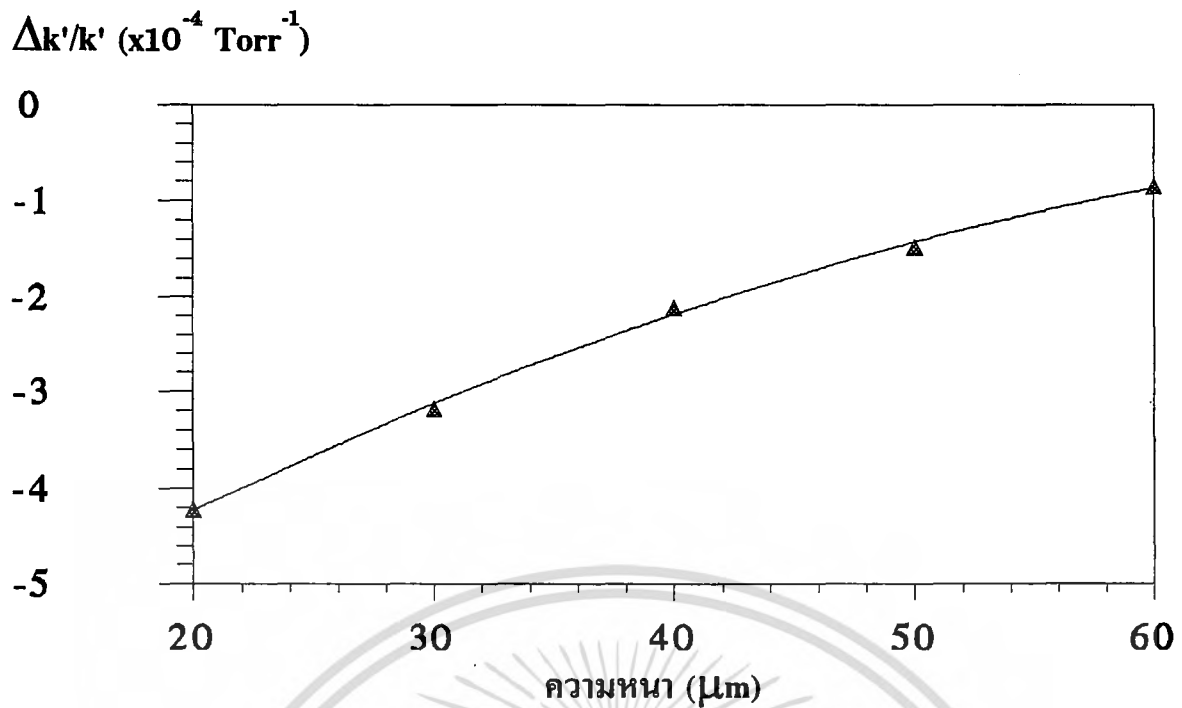
(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



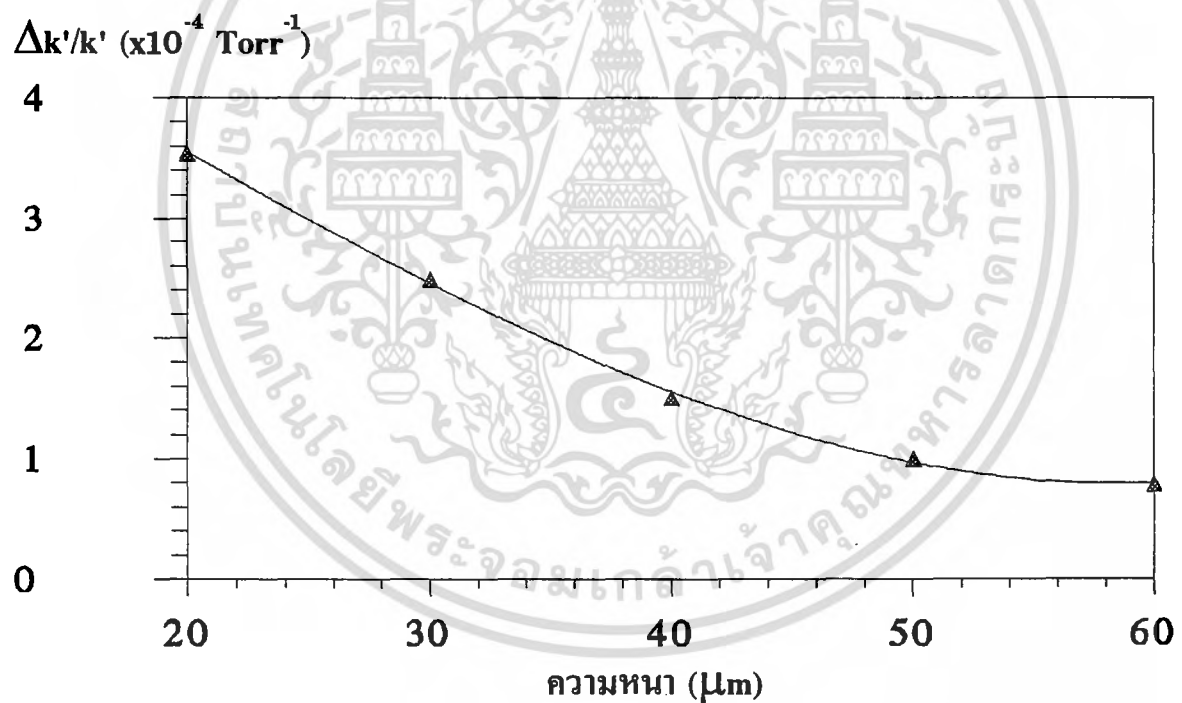
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.5-1 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับความหนาของ ไดอะแฟรมของ PMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.5-2 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับความหนาของไดอะแฟรมของ NMOISFET

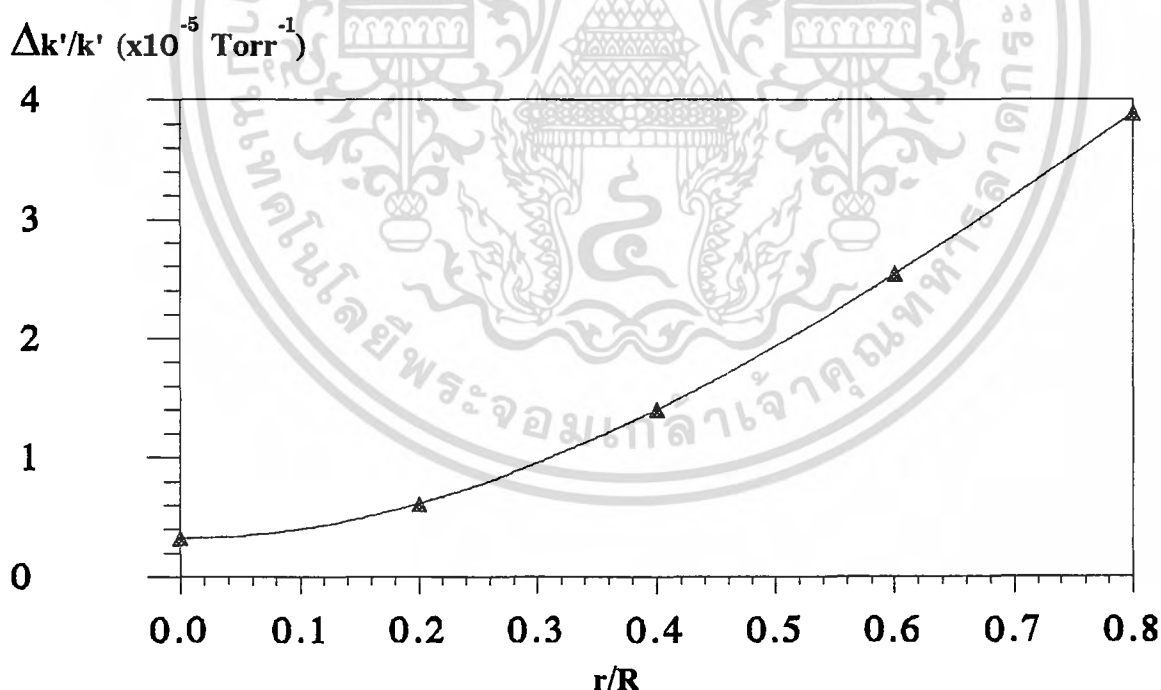
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 หาค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ตำแหน่งต่างๆ บนไดอะแฟรม

จากหัวข้อที่ 4.5 พบว่านอกจากค่าความหนา d ของไดอะแฟรมจะมีผลต่อค่าความเค้นแล้ว ค่า r (ดังในรูปที่ 2.7-2) ก็ยังมีผลต่อค่าความเค้นด้วย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการสร้าง MOISFET บนไดอะแฟรมที่ตำแหน่งต่างๆ

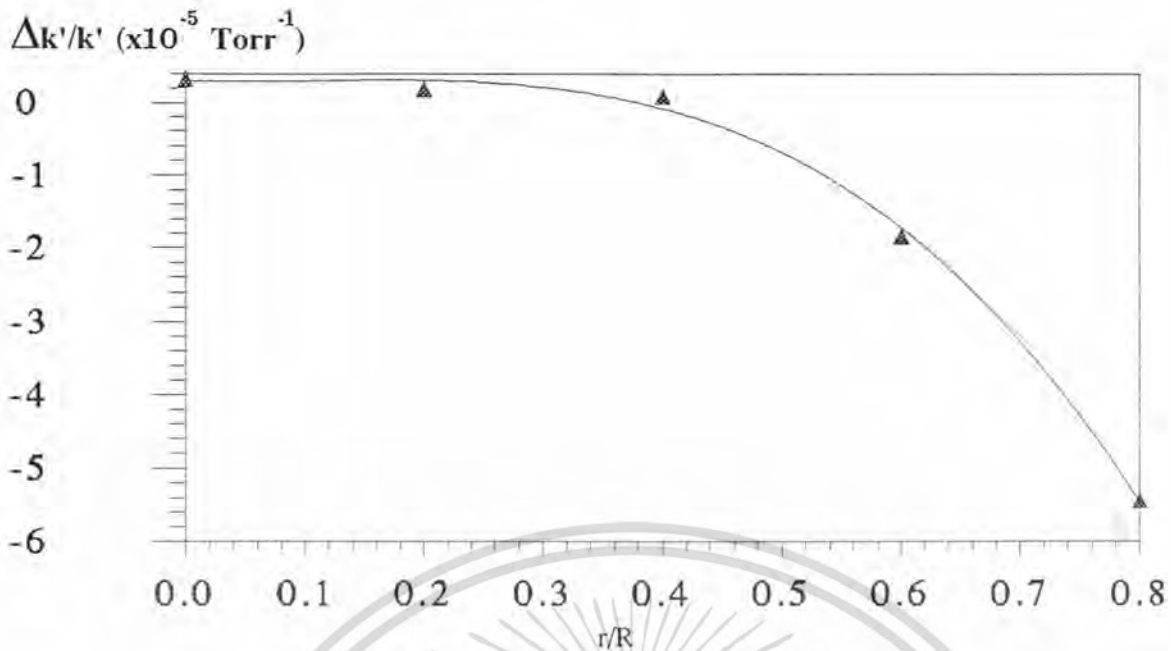
4.6.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ตำแหน่งต่างๆ บนไดอะแฟรม

ในการทดลองนี้จะทำการสร้างตัว PMOISFET บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 20 ไมโครเมตร ที่ตำแหน่ง r/R มีค่าเป็น 0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ดังการออกแบบในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อสร้างเสร็จแล้วก็ทำการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ PMOISFET ที่สร้างขึ้น ที่ความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ 760 ทอร์ แล้วคำนวณค่า k' จากกราฟที่ได้ (วงจรถ่ายวัดแสดงดังรูปที่ 4.3-1 และตัวอย่างผลการวัดแสดงดังในรูปที่ 4.3-2) หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ PMOISFET บนไดอะแฟรมกับการเปลี่ยนแปลงค่าความไว ($\Delta k'/k'$) ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4.6-1



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

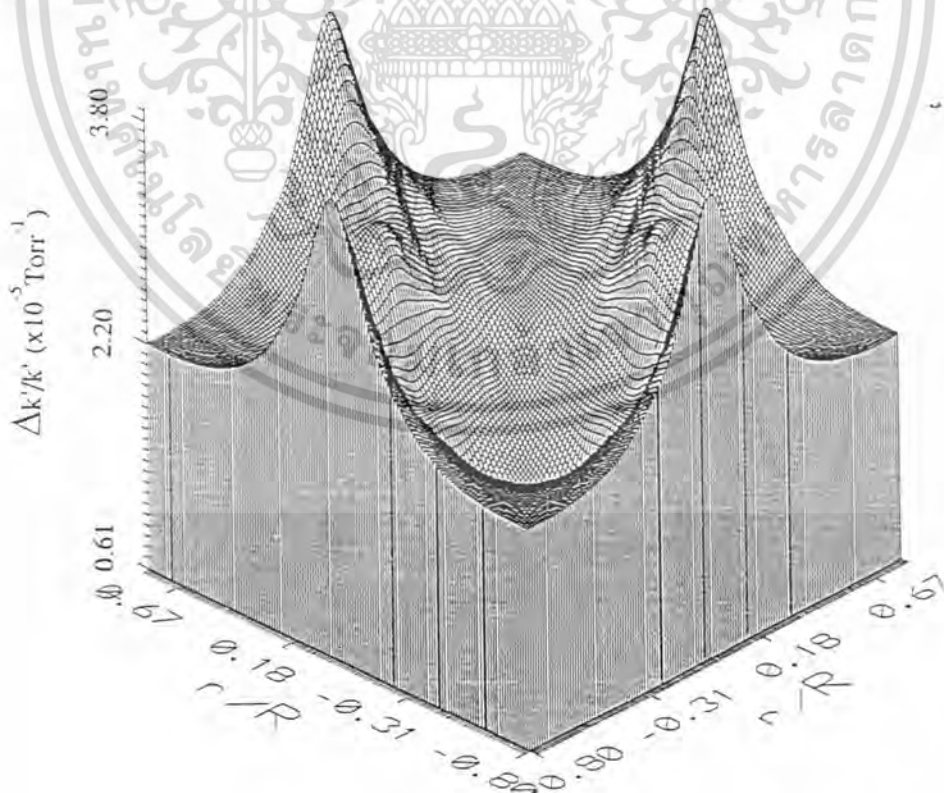
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

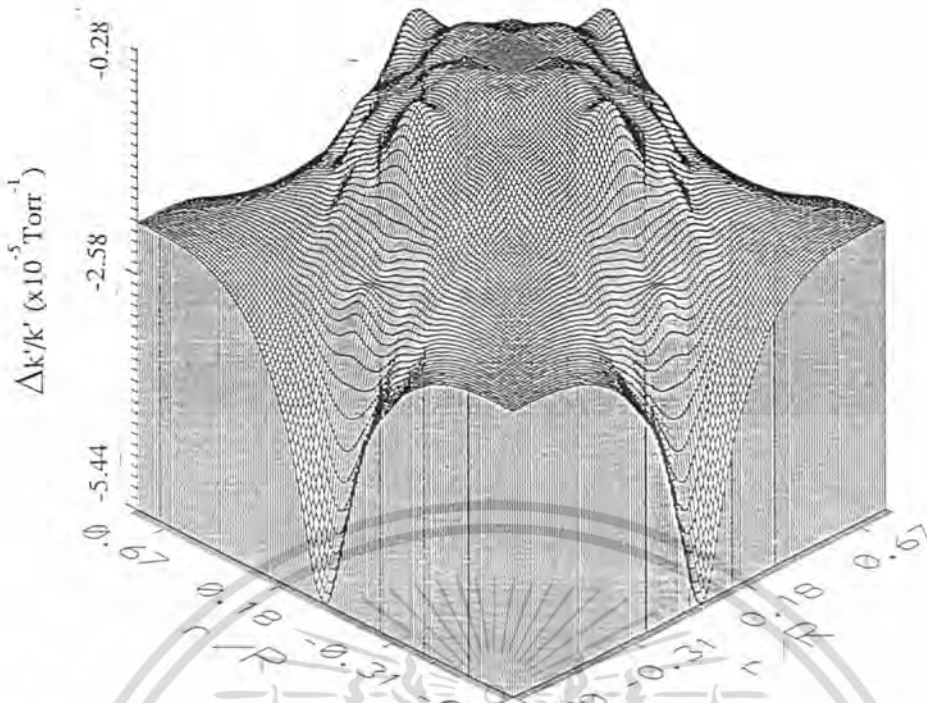
รูปที่ 4.6-1 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง PMOSFET บนไดอะแฟรม

กราฟในรูปที่ 4.6-1 นั้นเขียนที่ควอดแรนต์เดียว ถ้านำผลแต่ละควอดแรนต์มาเขียนในสี่ควอดแรนต์เป็นกราฟสามมิติจะได้ดังรูปที่ 4.6-2 ถ้าเขียนกราฟเส้นระดับความไวจะได้ดังรูปที่ 4.6-3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงแคบของไดอะแฟรมไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

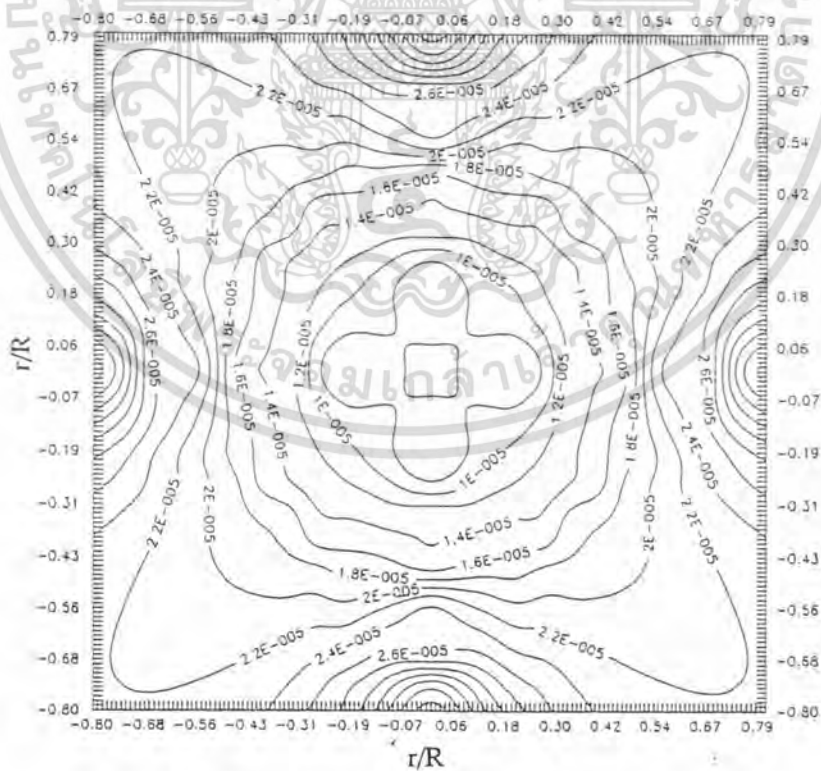
(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

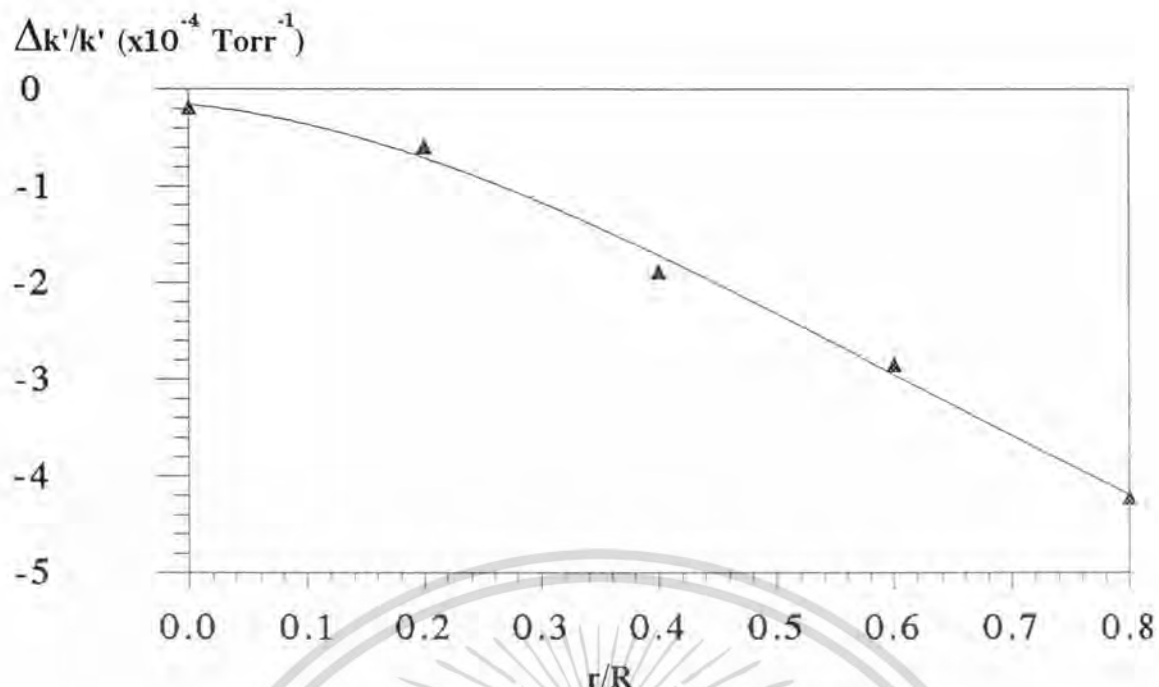
รูปที่ 4.6-2 กราฟสามมิติแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่ง

การวาง PMOISFET บนไดอะแฟรม

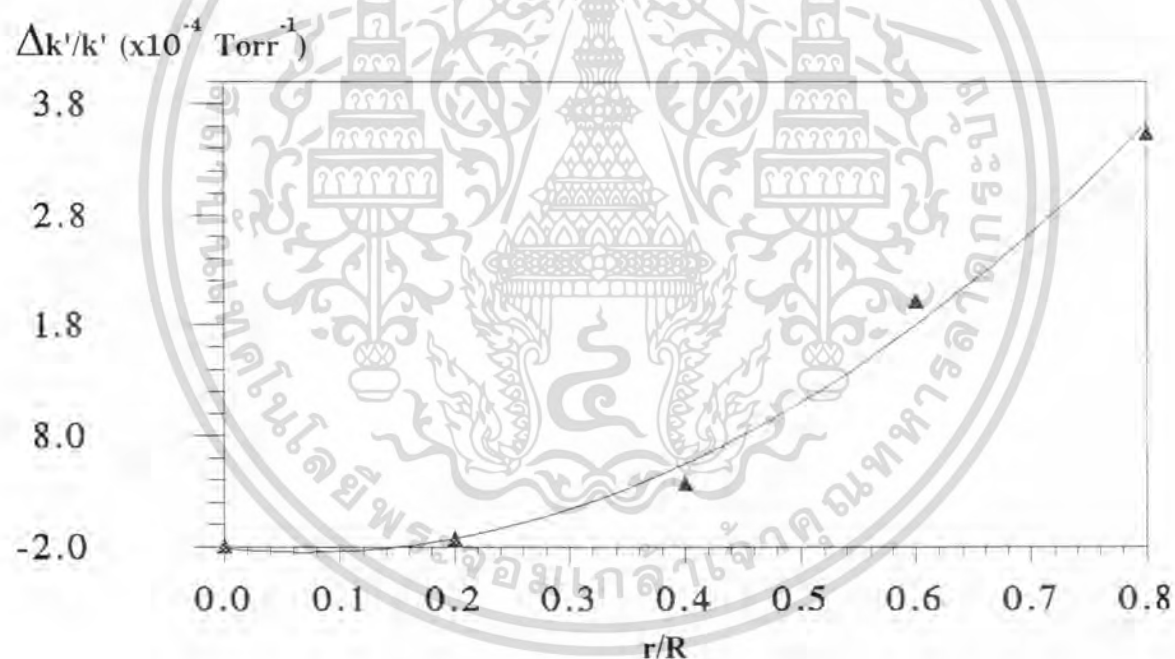


(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะเฟรม

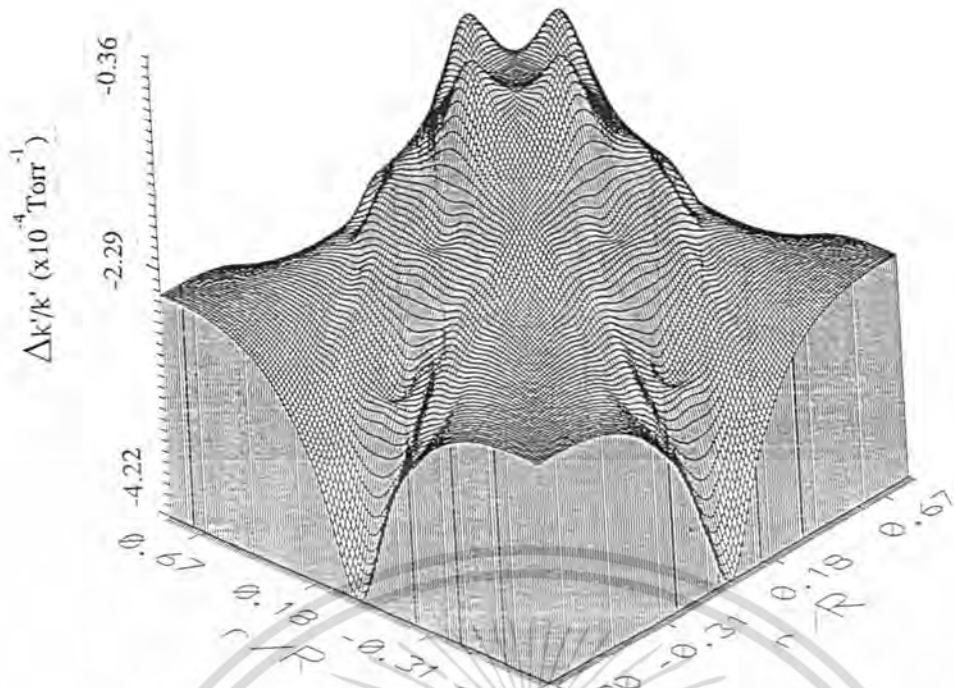


(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะเฟรม

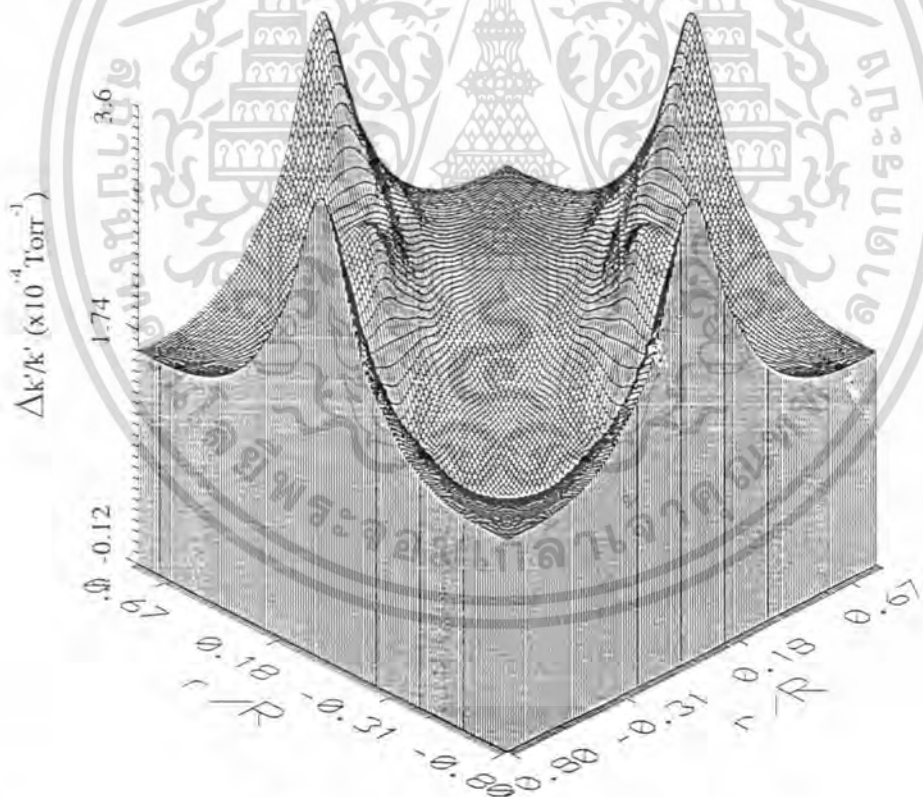
รูปที่ 4.6-4 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง NMOISFET บนไดอะเฟรม

กราฟในรูปที่ 4.6-4 นั้นเขียนที่ควอดเรนต์เดียว ถ้านำผลแต่ละควอดเรนต์มาเขียนในสี่ควอดแลนซ์ เป็นกราฟสามมิติจะได้ดังรูปที่ 4.6-5 ถ้าเขียนกราฟเส้นระดับความไวจะได้ดังรูปที่ 4.6-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



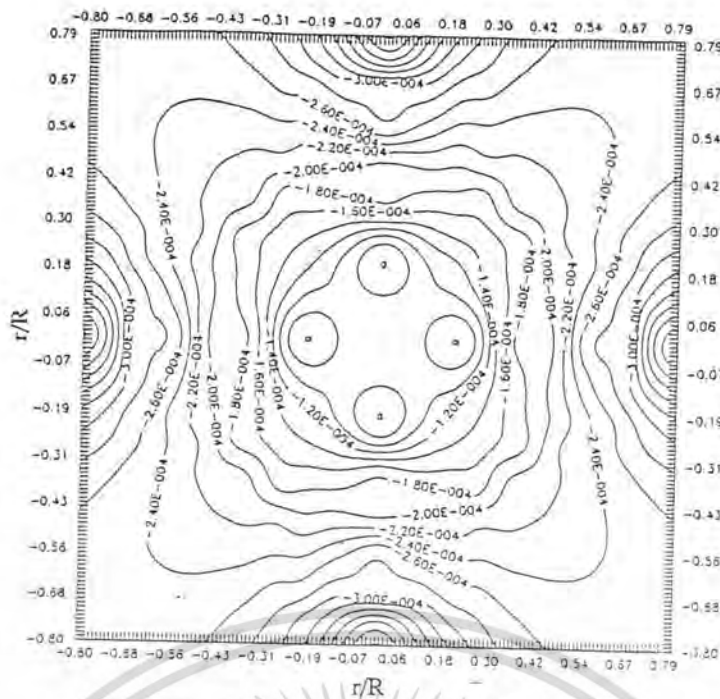
(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



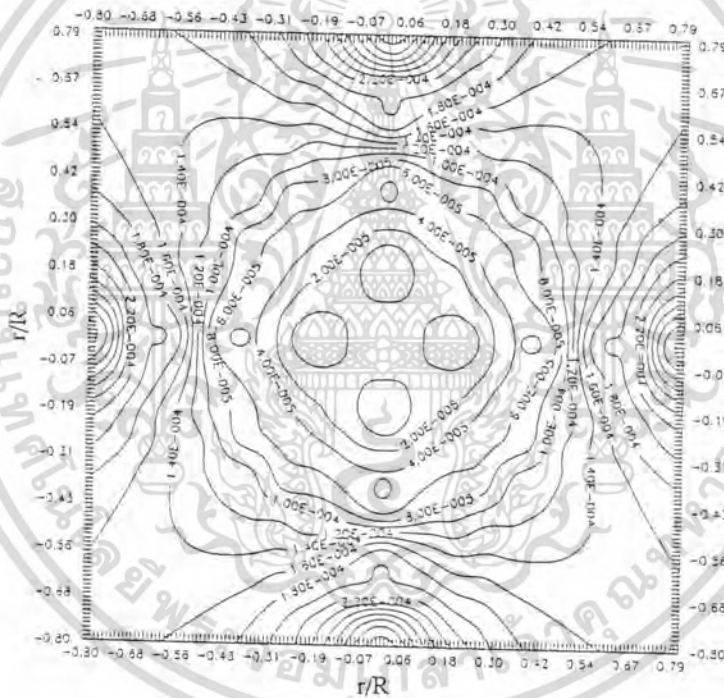
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.6-5 กราฟสามมิติแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดโอดแฟรม



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดโอดแฟรม

รูปที่ 4.6-6 กราฟเส้นระดับความไวแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับตำแหน่งการวาง NMOISFET บนไดโอดแฟรม

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่ใกล้ๆ ขอบของไดโอดแฟรมจะมีค่าความไวมากกว่าบริเวณกึ่งกลางไดโอดแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

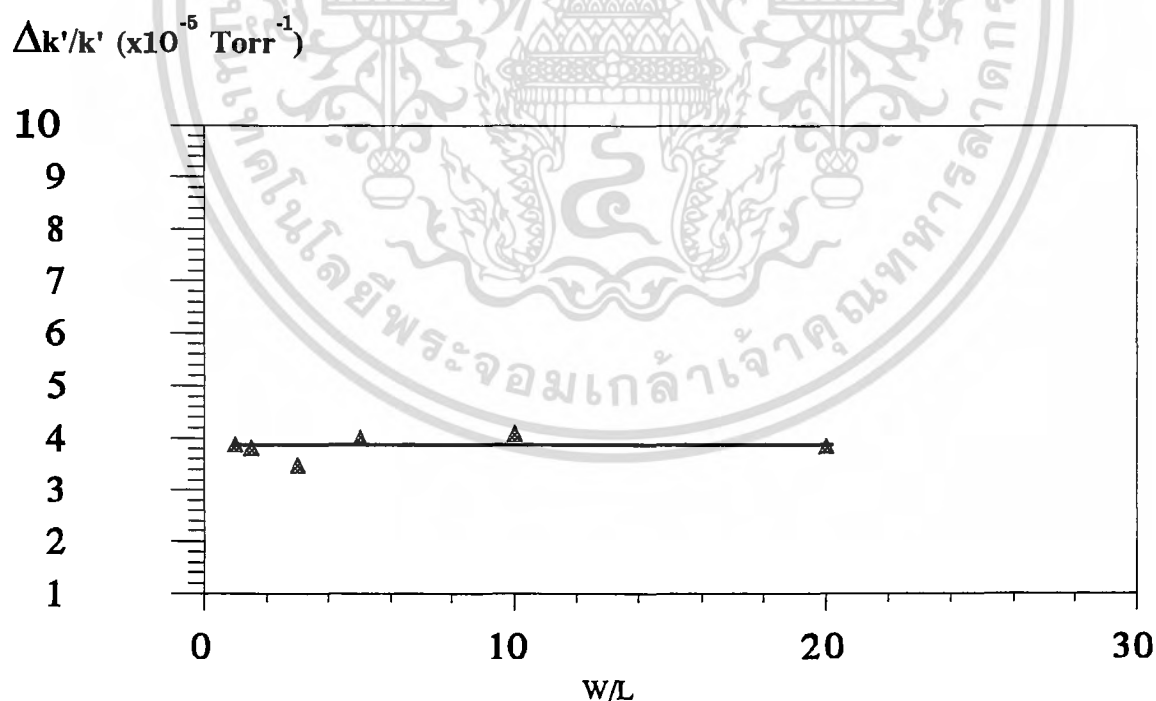
4.7 หาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ค่า

W/L ต่างๆ

จากสมการกระแสของ MOISFET ดังสมการที่ 4.3-1 และ 4.3-2 จะพบว่าถ้าอัตราส่วน W/L เปลี่ยนไป ก็จะทำให้กระแส I_{DS} ของ MOISFET เปลี่ยนไปด้วย เมื่อกระแสไหลมากหรือไหลน้อยนั้น การเปลี่ยนแปลงของ k' เมื่อมีความแตกต่างของความดันเกิดขึ้น จะแตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงทำการศึกษาความสัมพันธ์ของ W/L กับความไว ($\Delta k'/k'$) ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET

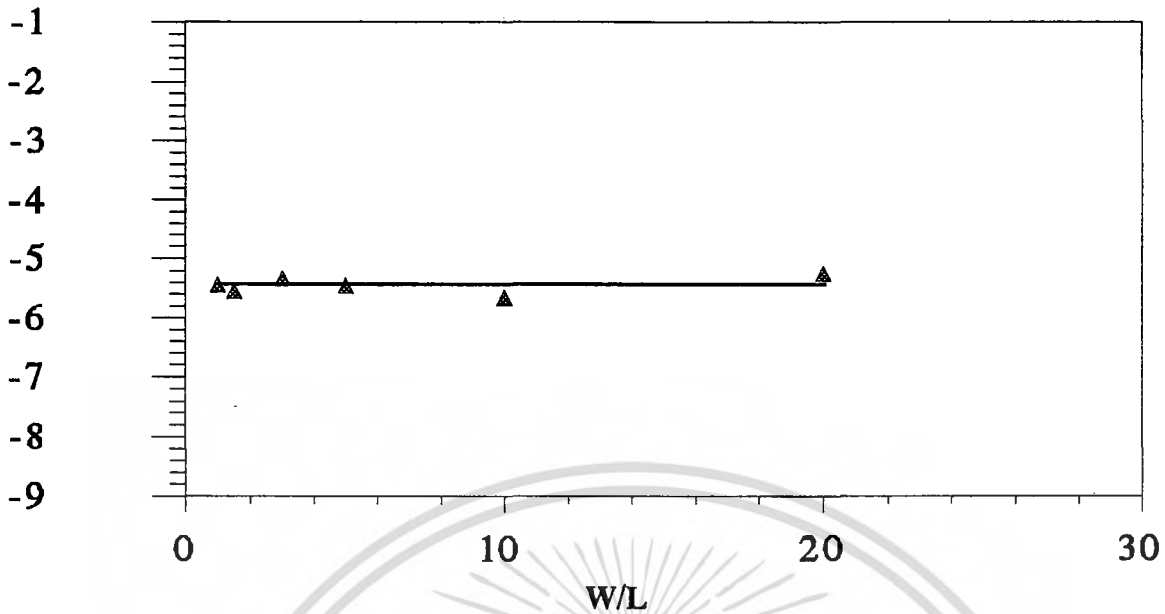
4.7.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ค่า W/L ต่าง

ในการทดลองนี้จะทำการสร้างตัว PMOISFET บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 20 ไมโครเมตร ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร แล้วแปรค่า W/L ดังการออกแบบในหัวข้อ 3.2.2 โดยให้อัตราส่วน W/L เป็น 1, 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เมื่อสร้างเสร็จแล้วก็ทำการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOISFET ที่สร้างขึ้น ที่ความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ 760 ทอร์ แล้วคำนวณหาค่า k' จากกราฟที่ได้ (วงจรถ่ายที่แสดงดังรูปที่ 4.3-1 และตัวอย่างผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.3-2) หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า W/L กับค่าความไว ($\Delta k'/k'$) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7-1



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

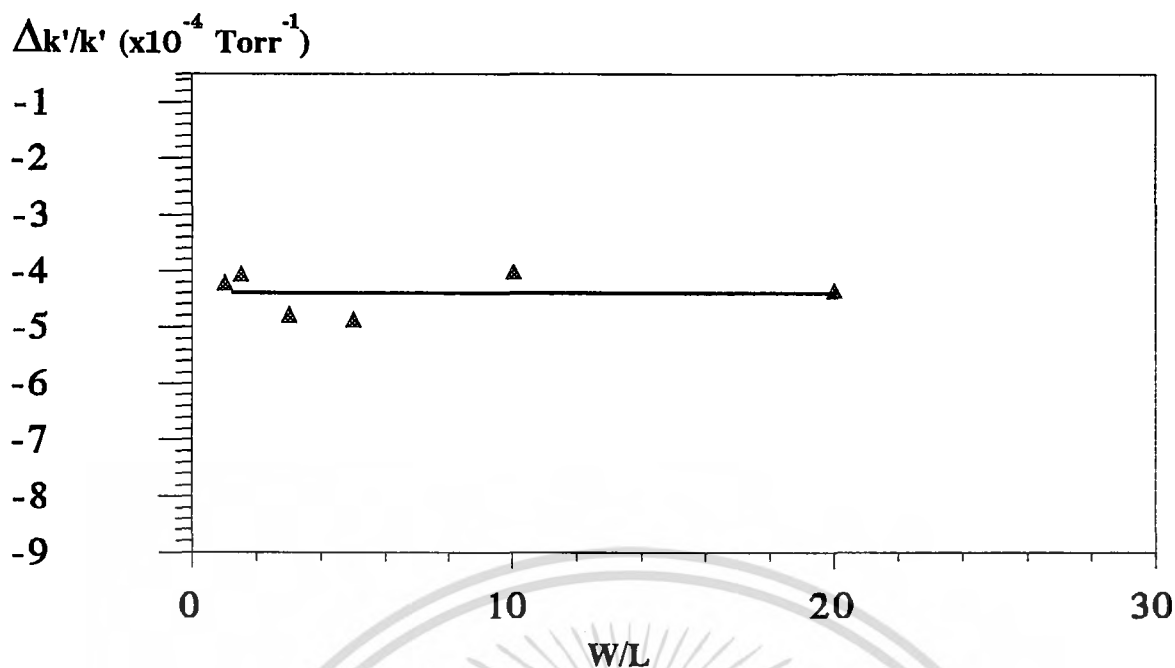
$\Delta k'/k' \text{ (x}10^{-5} \text{ Torr}^{-1}\text{)}$


(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม
รูปที่ 4.7-1 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับค่า W/L ของ PMOSFET บนไดอะแฟรม

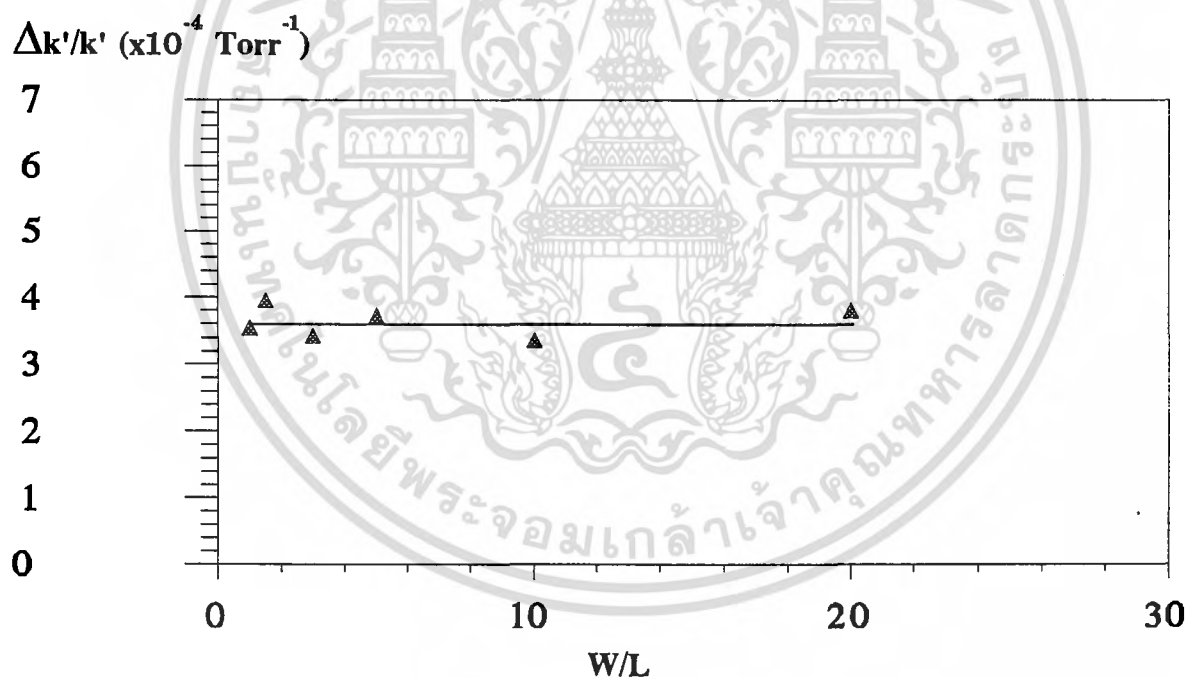
4.7.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ค่า W/L ต่าง

ในการทดลองนี้จะทำการสร้างตัว NMOISFET บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 20 ไมโครเมตร ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร แล้วแปรค่า W/L ดังการออกแบบในหัวข้อ 3.2.2 โดยให้อัตราส่วน W/L เป็น 1, 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เมื่อสร้างเสร็จแล้วก็ทำการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET ที่สร้างขึ้น ที่ความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ 760 ทอร์ แล้วคำนวณหาค่า k' จากกราฟที่ได้ (วงจรที่ใช้วัดแสดงดังรูปที่ 4.3-4 และตัวอย่างผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.3-5) หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า W/L กับค่าความไว ($\Delta k'/k'$) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7-2

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความไวไม่ขึ้นกับค่า W/L



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.7-2 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับ W/L ของ NMOISFET บนไดอะแฟรม

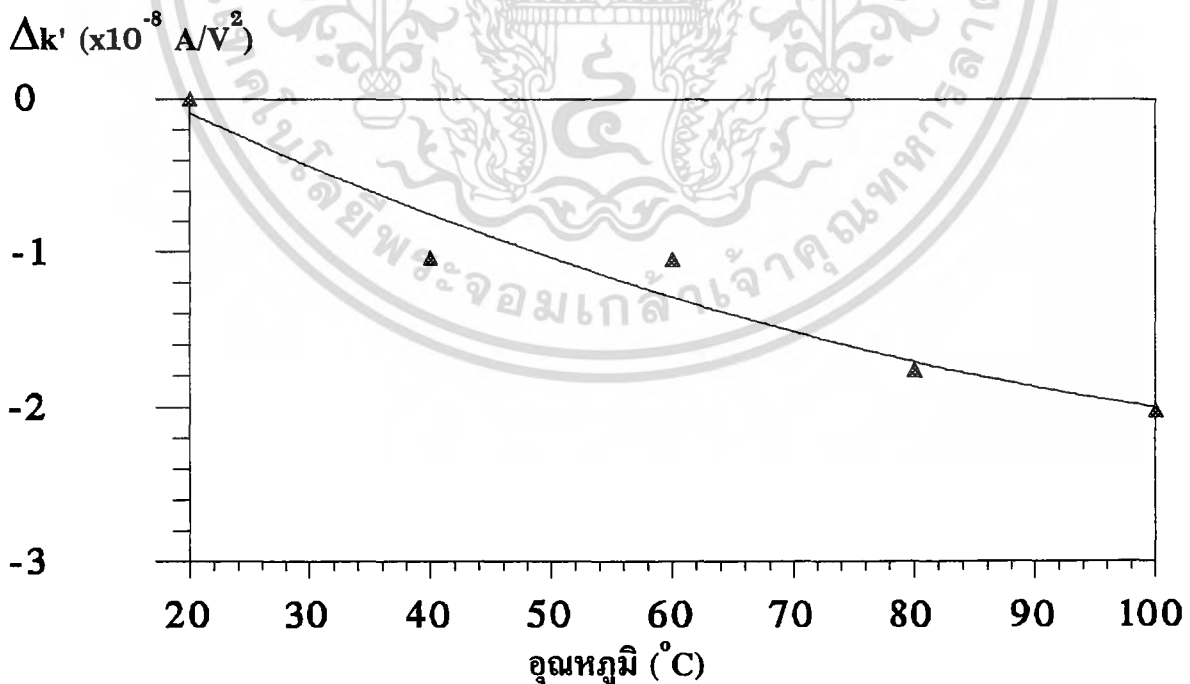
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 หาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่อุณหภูมิ ต่างๆ

ในการนำทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ไปใช้งาน ในสภาวะนั้นอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อมขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ต้องทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ด้วย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการหาความไวต่ออุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ตัวนี้

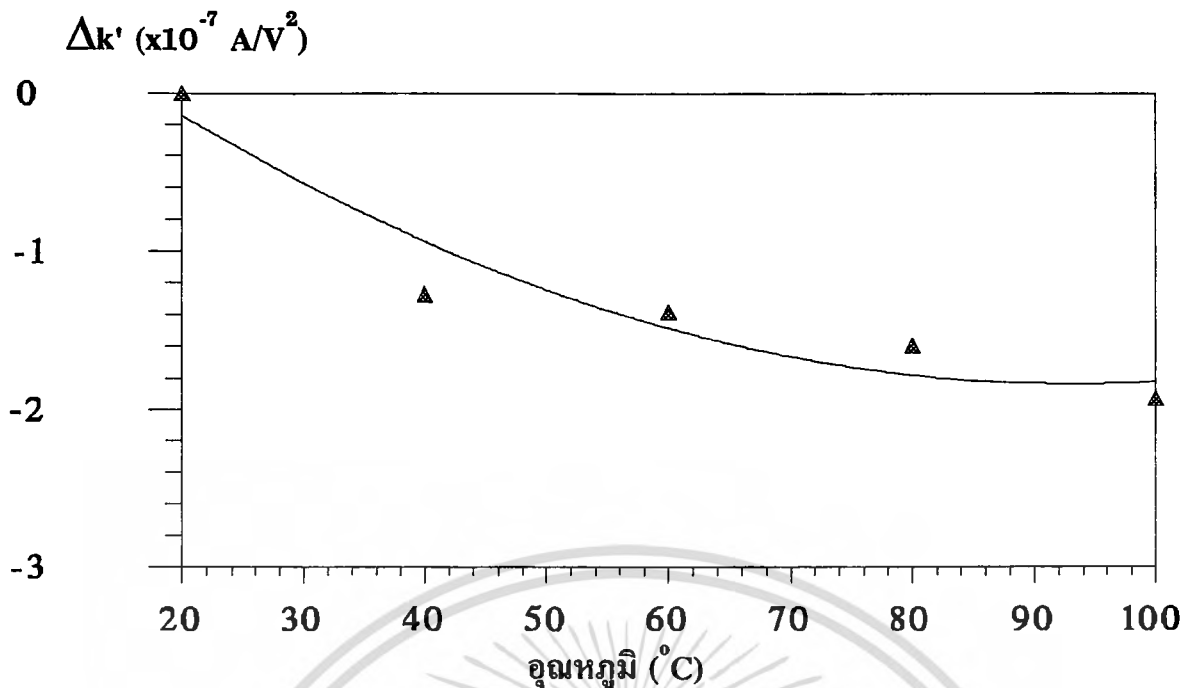
4.8.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดัน แบบ PMOISFET ที่อุณหภูมิต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทำการสร้างตัว PMOISFET บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 20 ไมโครเมตร ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร ดังการออกแบบในหัวข้อ 3.2.2 เมื่อสร้างเสร็จแล้วก็ทำการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOISFET ที่สร้างขึ้น แล้วคำนวณค่า k' จากกราฟที่ได้ (วงจรถ่ายวัดแสดงดังรูปที่ 4.3-1 และตัวอย่างผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.3-2) ที่อุณหภูมิ 20, 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตกับการเปลี่ยนแปลงค่า k' ($\Delta k'$) ที่ความดันบรรยากาศ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8-1 หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตกับความไว ($\Delta k'/k'$) ดังรูปที่ 4.8-2

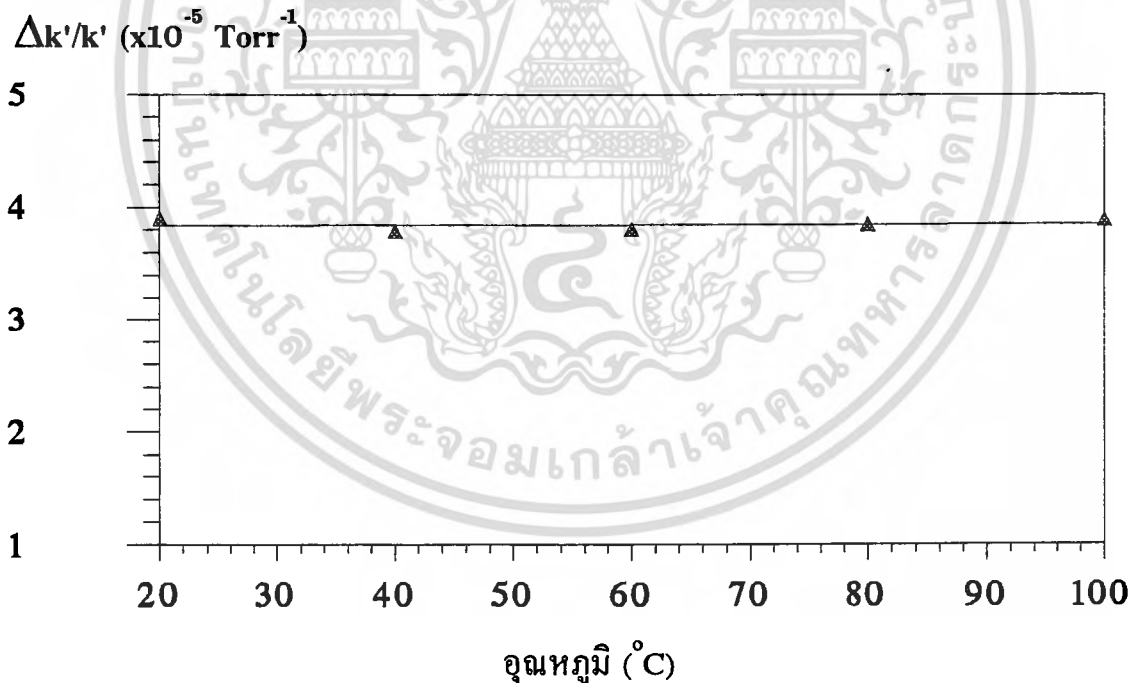


(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

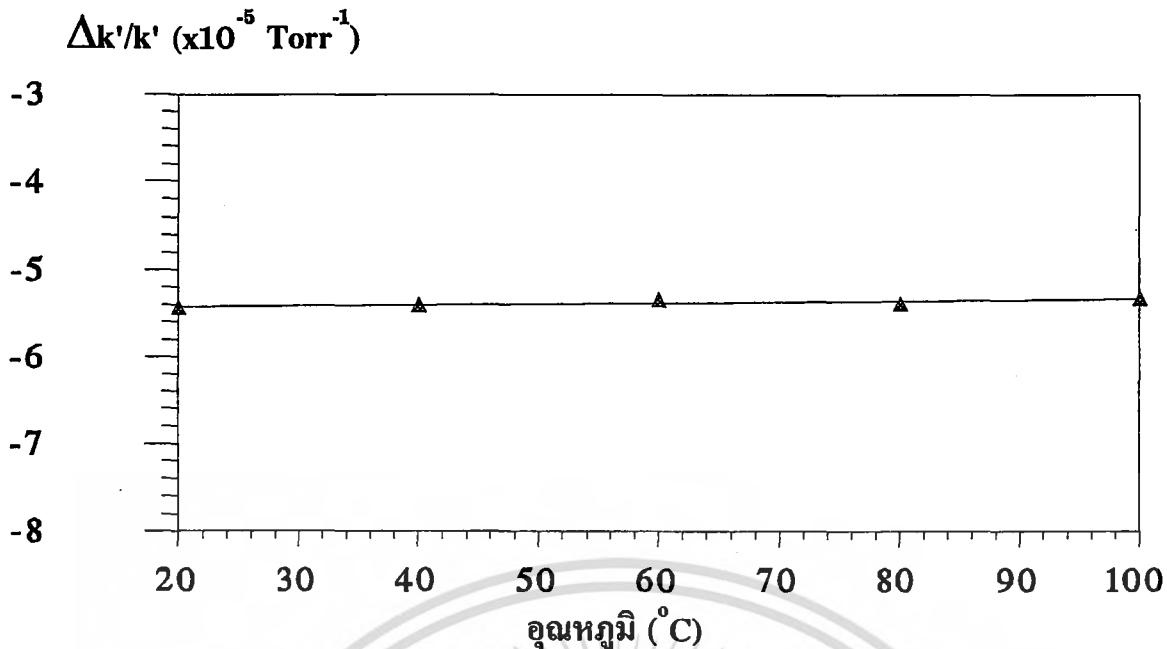


(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม
รูปที่ 4.8-1 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่า k' กับอุณหภูมิของ PMOISFET
บนไดอะแฟรม



(ค) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



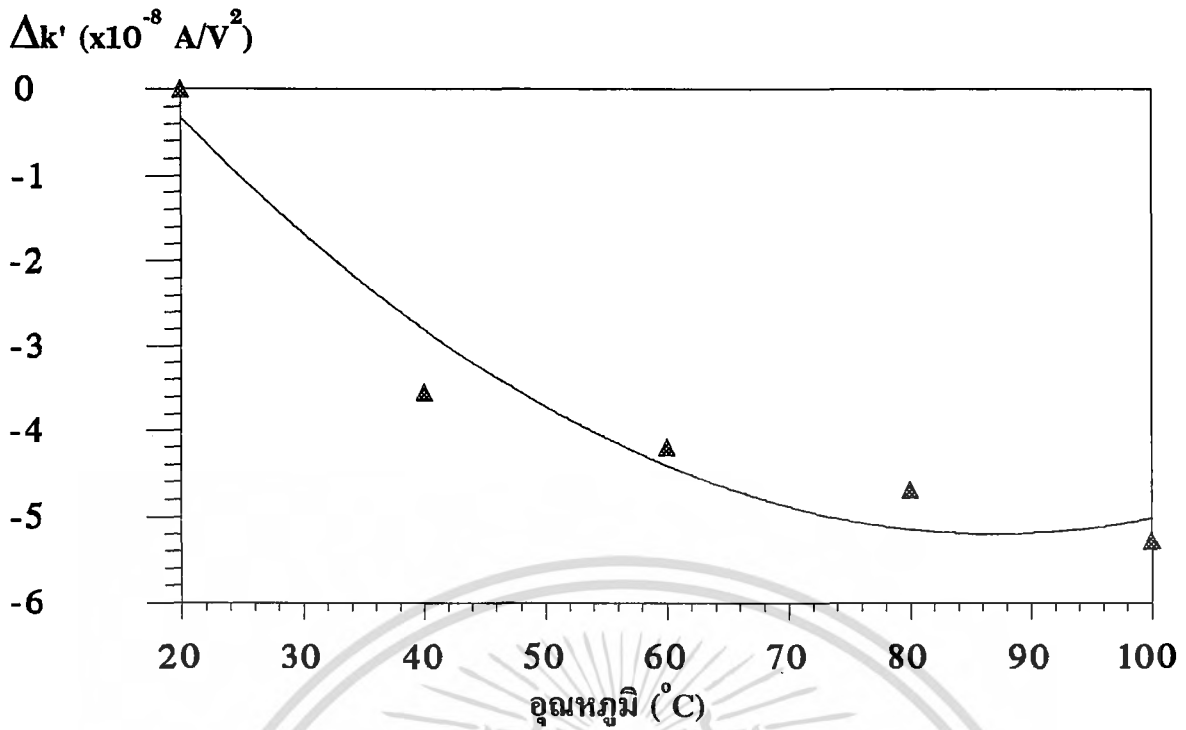
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของ ไดอะแฟรม

รูปที่ 4.8-2 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความไวกับอุณหภูมิของ PMOISFET บน ไดอะแฟรม

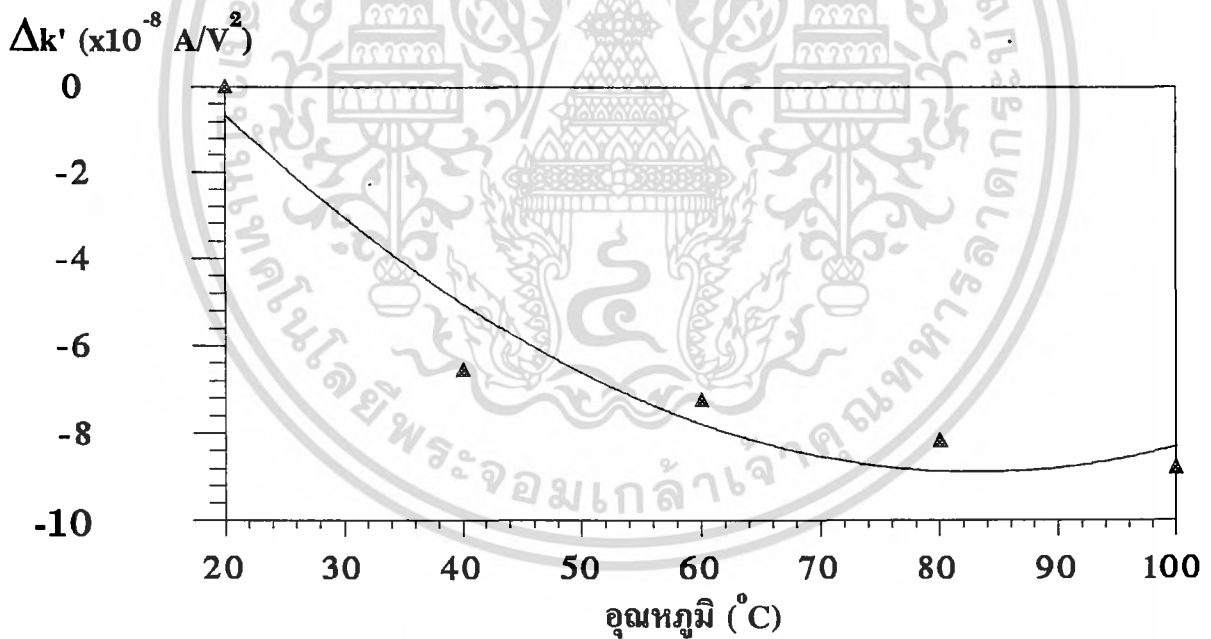
4.8.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่อุณหภูมิต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทำการสร้างตัว NMOISFET บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 20 ไมโครเมตร ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร ดังการออกแบบในหัวข้อ 3.2.2 เมื่อสร้างเสร็จแล้วก็ทำการวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET ที่สร้างขึ้น แล้วคำนวณค่า k' จากกราฟที่ได้ (วงจรถ่ายที่วัดแสดงดังรูปที่ 4.3-4 และตัวอย่างผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.3-5) ที่อุณหภูมิ 20, 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงค่า k' ($\Delta k'$) ที่ความดันบรรยากาศ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8-3 หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความไว ($\Delta k'/k'$) ดังรูปที่ 4.8-4

จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ค่าความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



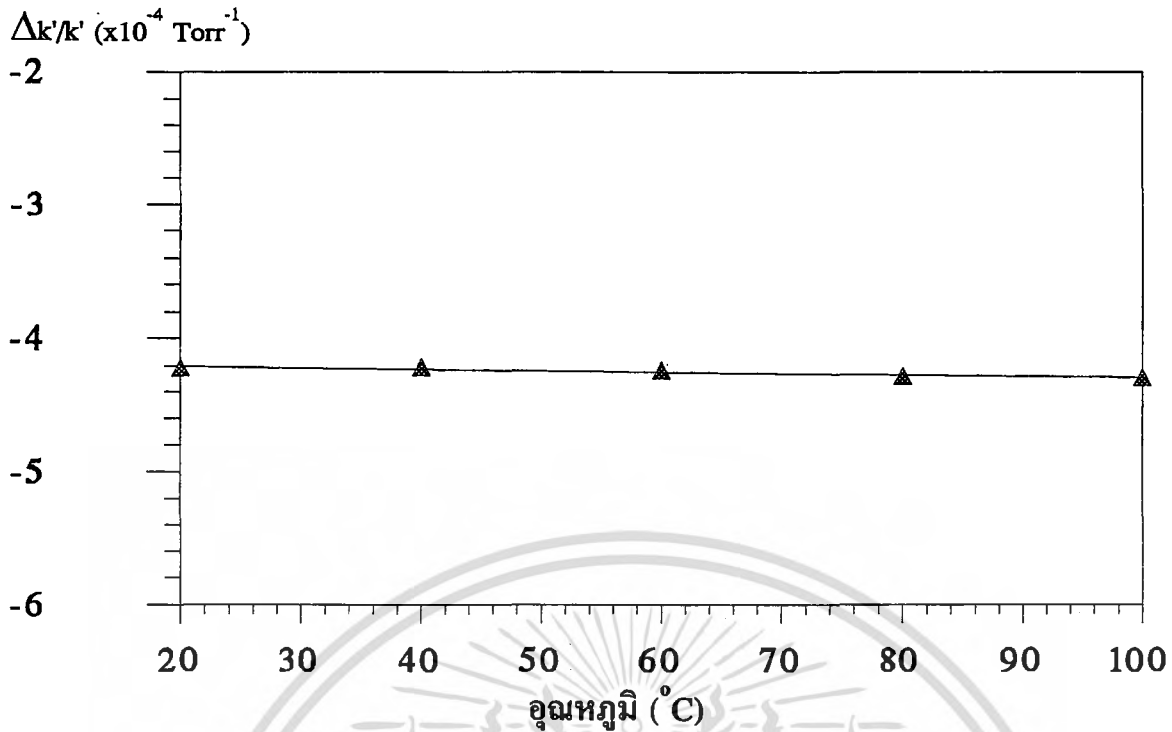
(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



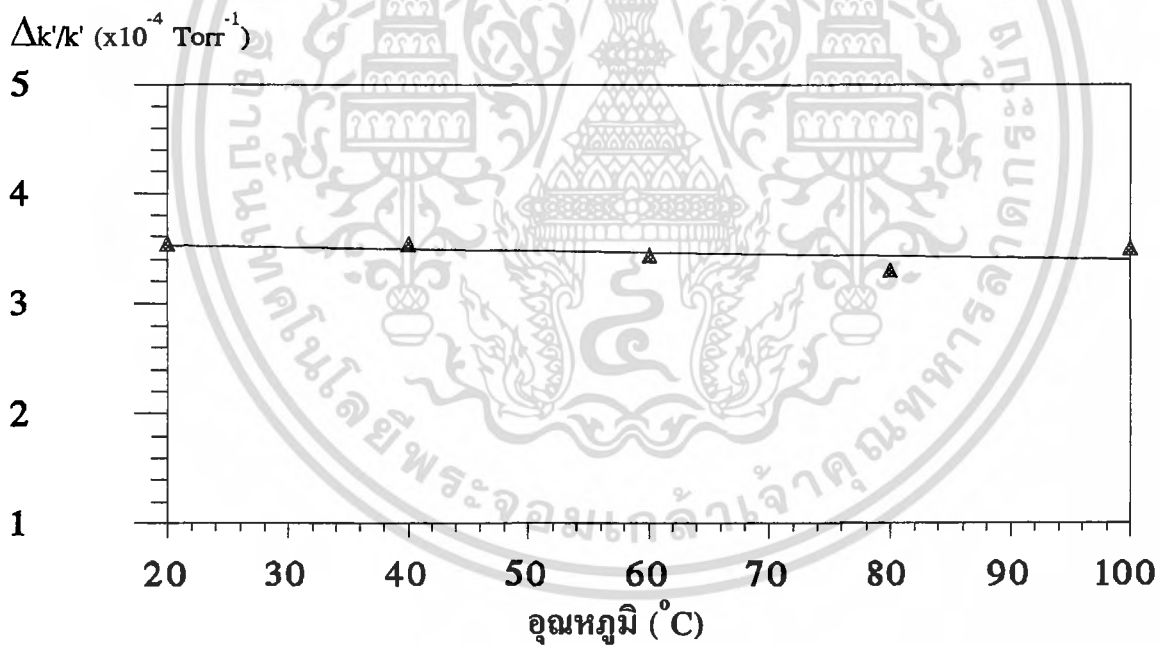
(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.8-3 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่า k' กับอุณหภูมิของ NMOISFET บนไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 4.8-4 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความไวกับอุณหภูมิของ NMOISFET บนไดอะแฟรม

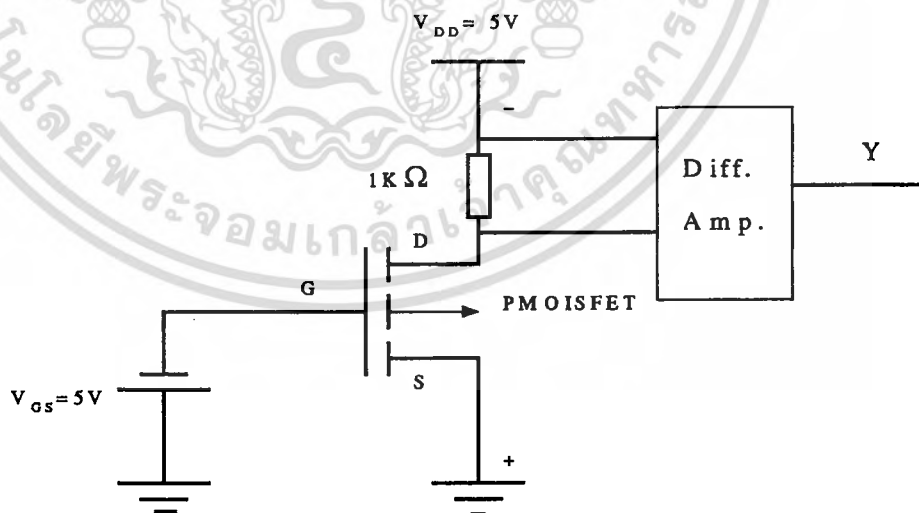
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 เสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ความดันต่างๆ

ในกรณีที่ใช้งานทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ติดต่อกันนานๆ นั้นสัญญาณที่ได้ออกมาต้องคงที่ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการหาเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุต ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ซึ่งก็คือการเขียนกราฟระหว่างกระแส I_{DS} ของ MOISFET กับเวลาที่ความดันคงที่ค่าหนึ่ง แต่เนื่องจากกระแสของ MOISFET ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดันมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับกระแสเดิมของ MOISFET ดังนั้นเพื่อต้องการดูกระแสที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดัน จึงใช้วงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) เข้าช่วย

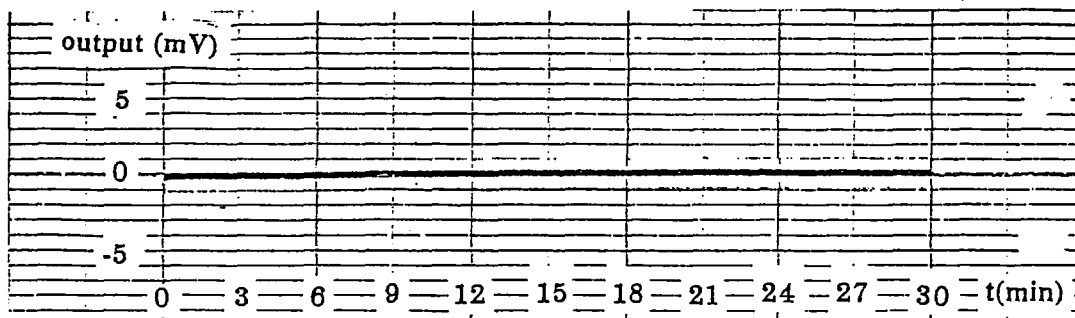
4.9.1 การทดลองและผลการทดลองหาค่าเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของ ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ความดันต่างๆ

ในการทดลองนี้จะนำทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ มาวัดกระแสที่ออกมาในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อดูค่ากระแสที่ออกมานั้นมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ การทดลองจะกระทำโดยให้แรงดันเพื่อให้ PMOISFET ทำงาน และวัดกระแส (โดยการเปลี่ยนเป็นค่าแรงดัน) ที่ออกมาเป็นเวลา 30 นาที ที่ความดันบรรยากาศและที่ความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ 760 ทอร์ ด้วย X-Y Recorder โดยให้แรงดันเข้าไปที่แกน Y และให้กระดาดเคลื่อนไปด้วยความเร็วที่ตั้งไว้ โดยที่วงจรวัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.9-1 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9-2

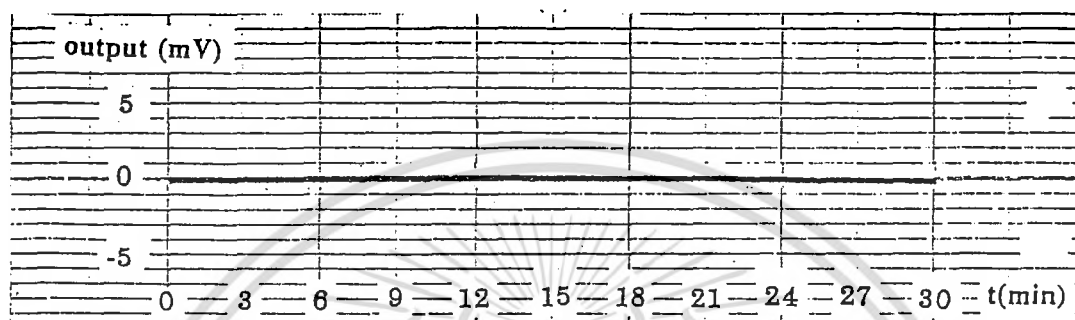


รูปที่ 4.9-1 แสดงวงจรที่ใช้วัดเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ
PMOISFET

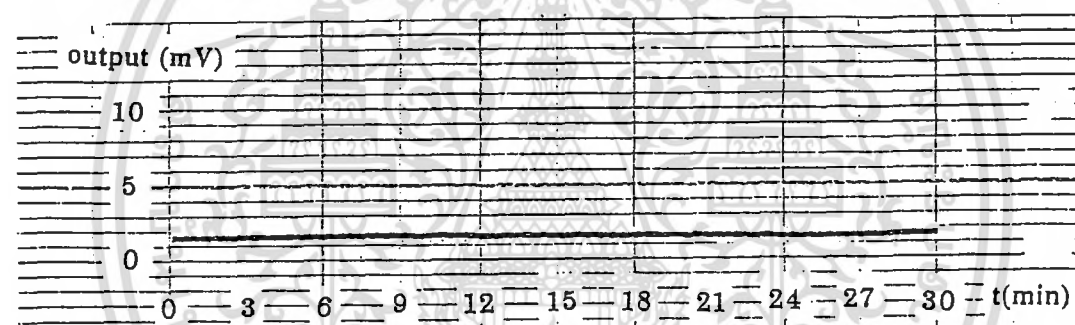
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



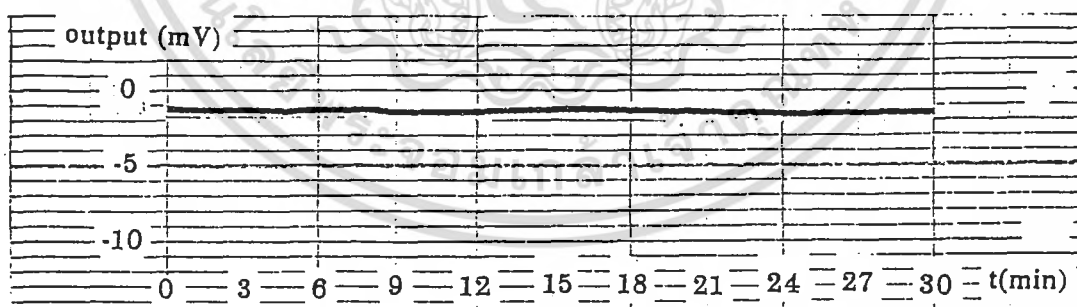
(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดโอดแฟรมที่ความดันบรรยากาศ



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดโอดแฟรมที่ความดันบรรยากาศ



(ค) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดโอดแฟรมที่ความแตกต่างความดันเป็น 760 ทอร์



(ง) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดโอดแฟรมที่ความแตกต่างความดันเป็น 760 ทอร์

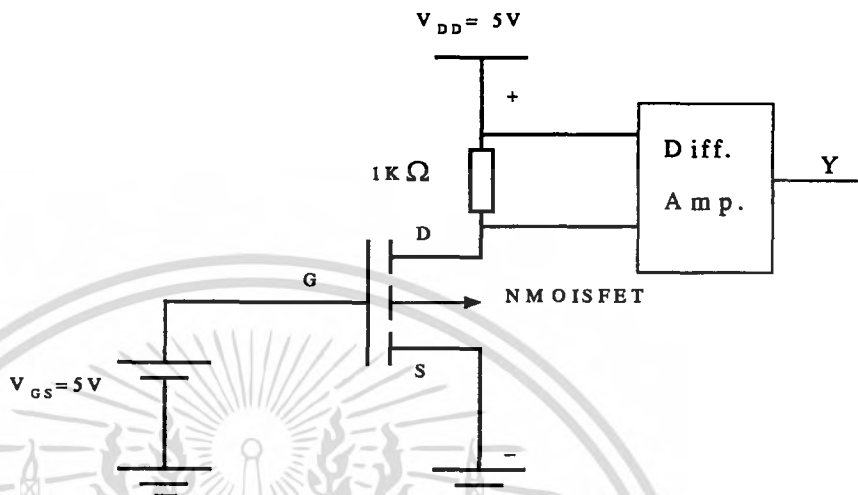
รูปที่ 4.9-2 แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดัน

แบบ PMOSFET

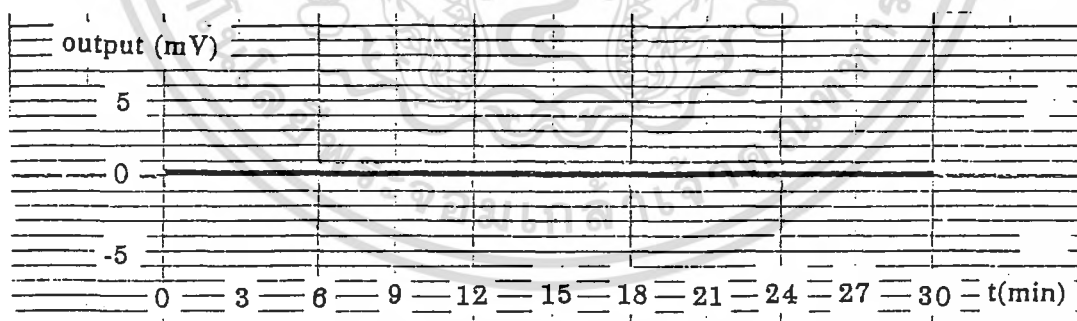
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9.2 การทดลองและผลการทดลองหาค่าเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุต ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่ความดันต่างๆ

การทดลองจะทำเหมือนหัวข้อที่ 4.9.1 แต่เปลี่ยนเป็น NMOISFET โดยที่วงจรวัดแสดงดังรูปที่ 4.9-3 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9-4

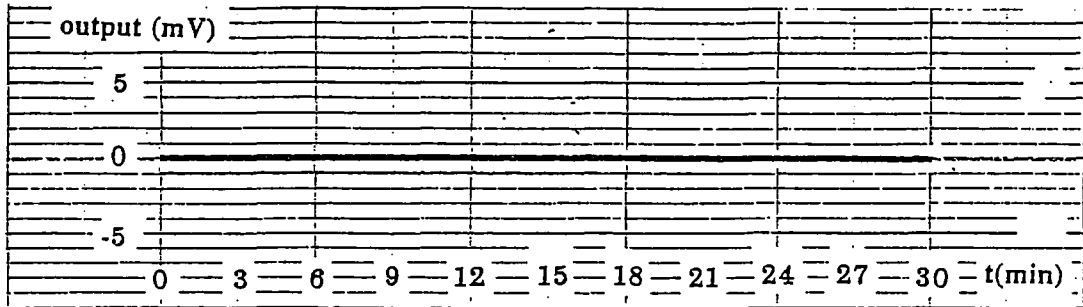


รูปที่ 4.9-3 แสดงวงจรที่ใช้วัดเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตจะดีมาก

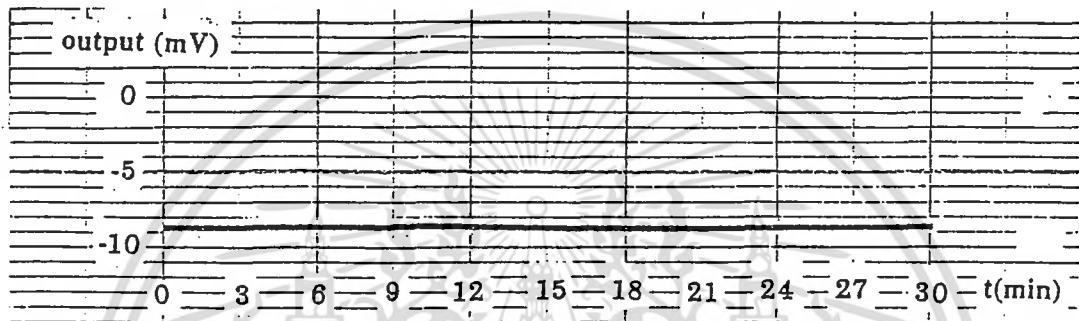


(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมที่ความดันบรรยากาศ

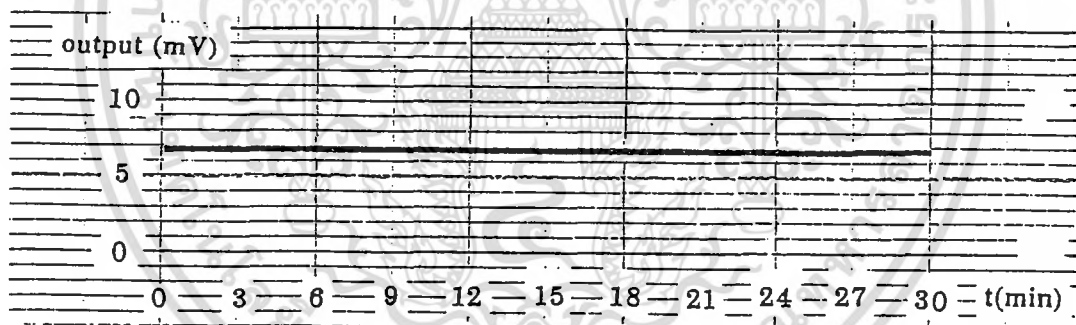
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดโอดแฟรมที่ความดันบรรยากาศ



(ค) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดโอดแฟรมที่ความแตกต่างความดันเป็น 760 ทอร์



(ง) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดโอดแฟรมที่ความแตกต่างความดันเป็น 760 ทอร์
รูปที่ 4.9-4 แสดงผลการทดลองวัดเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดัน

แบบ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการสร้างอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ขึ้นมานั้น โครงสร้างของอุปกรณ์ตัวนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือ ส่วนของโครงสร้าง MOISFET และโครงสร้างของไดอะแฟรมบาง โดยคุณสมบัติแต่ละส่วนได้เคยมีการศึกษาและพัฒนาขึ้นมาแล้ว แต่เมื่อนำโครงสร้างสองแบบนี้มารวมกัน ก็เป็นโครงสร้างใหม่ที่ยังไม่เคยมีใครทำการศึกษาและพัฒนามาก่อน ดังนั้นในการสร้างอุปกรณ์ตัวนี้ จึงต้องทำการศึกษาคูสมบัติต่างๆ ของ MOISFET บนไดอะแฟรม เมื่อมีความดันมากกระทำ เพราะว่าเมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้กระแส I_{DS} ของ MOISFET เปลี่ยนไป พิจารณาสมการกระแสของ MOISFET ในช่วงอิ่มตัวจะเป็นดังนี้

$$I_{DS} = \left(\frac{\beta}{2}\right)[V_{GS} - V_T]^2 \quad (5.1)$$

$$\beta = k' \left(\frac{W}{L}\right) \quad (5.2)$$

$$k' = \mu_{Au} \cdot C_{ox} \quad (5.3)$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} = \frac{3.9\epsilon_o}{T_{ox}} \quad (5.4)$$

จะเห็นว่าในสมการนั้นมีตัวแปรหลายตัวที่สามารถทำให้ค่ากระแส I_{DS} ของ MOISFET เปลี่ยนไป เมื่อค่าของตัวแปรในสมการกระแสเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ เนื่องจากความดันเพราะว่าจะได้รู้ว่าจะจริงๆ แล้วตัวแปรตัวใดที่เปลี่ยนแปลง เมื่อทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ตัวนี้ได้รับความดัน ซึ่งในการศึกษานี้ก็จะทำการแยก MOISFET เป็น PMOISFET และ NMOISFET เพราะ MOISFET สองชนิดนี้จะใช้พาหะในการนำกระแสคนละตัวกัน และจะดูทิศทางการไหลของกระแสเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรมด้วย

เริ่มต้นจะทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงค่า V_T ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET จากผลการทดลอง (หัวข้อ 4.1) พบว่าค่า V_T ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันมากกระทำ ทั้งของ PMOISFET และ NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสทั้งขนานและตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม การที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าจากสมการที่ 2.3-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_T = V_{FB} + \phi_F + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{Si} N(\phi_F)} \quad (5.5)$$

ตัวแปรทุกตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันมากระทำ

ในขณะที่ใช้งาน MOISFET โดยทั่วๆ ไปนั้นจำเป็นต้องทราบค่าแรงดันสูงสุดที่ MOISFET ยังสามารถทำงานได้ ซึ่งก็คือแรงดันพังทลายนั่นเอง ในทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ก็เช่นเดียวกันจำเป็นต้องรู้ค่าแรงดันพังทลายว่าเปลี่ยนแปลงหรือไม่เมื่อได้รับความดัน จากผลการทดลอง (หัวข้อ 4.2) พบว่าค่าแรงดันพังทลายไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันมากระทำทั้งของ PMOISFET และ NMOISFET ที่มีทิศทางกระแสของกระแสทั้งขานและตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม การที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า จากสมการที่ 2.3-18

$$V_{BV} \cong \left(\frac{\epsilon_{CR}^2 \epsilon_{Si}}{2q} \right) \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] \quad (5.6)$$

ตัวแปรทุกตัว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันมากระทำ

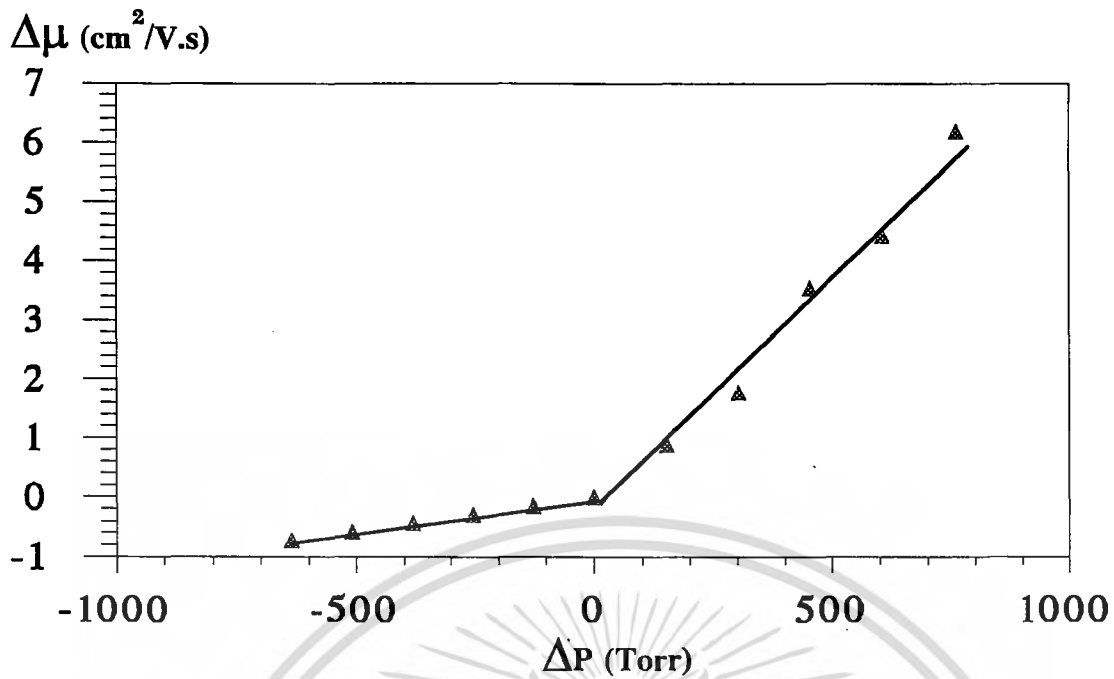
จากสมการที่ 5.1 จะพบว่าเมื่อ V_T ไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่มีความดันมากระทำนั้น ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงแล้วทำให้ค่ากระแส I_{DS} เปลี่ยนไปก็ควรจะเป็น β และจากผลการทดลอง (หัวข้อ 4.3) จะพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า W/L ของ MOISFET แล้วทดลองที่ความดันต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีความดันมากระทำค่า W/L ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากสมการที่ 5.2 จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวที่เปลี่ยนแปลงควรจะเป็น k' แต่ $k' = \mu_{Au} C_{ox}$ ดังนั้นจึงทำการทดสอบค่า C_{ox} กับความดัน (หัวข้อ 4.4) จากผลการทดลองพบว่าค่า C_{ox} ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันมากระทำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความดันแล้วทำให้ค่ากระแส I_{DS} เปลี่ยนไปคือ μ_{Au} นั่นเอง ดังนั้นจากการทดลองหาค่า k' กับความดัน จึงสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของค่าความแตกต่าง $\mu_{Au} (\Delta\mu_{Au})$ กับความแตกต่างของความดันจากความดันบรรยากาศได้ดังรูปที่ 5.1

ถ้าคิดว่าที่ช่องทางเดินกระแสของ MOISFET เป็นตัวต้านทานค่าหนึ่ง เมื่อทำการไบอัสให้ MOISFET ทำงานที่จุดใดๆ ก็สามารถพิจารณาได้ดังนี้ จากรูปที่ 2.6-2 และจากสมการที่ 2.6-11 และ 2.6-12 จะได้

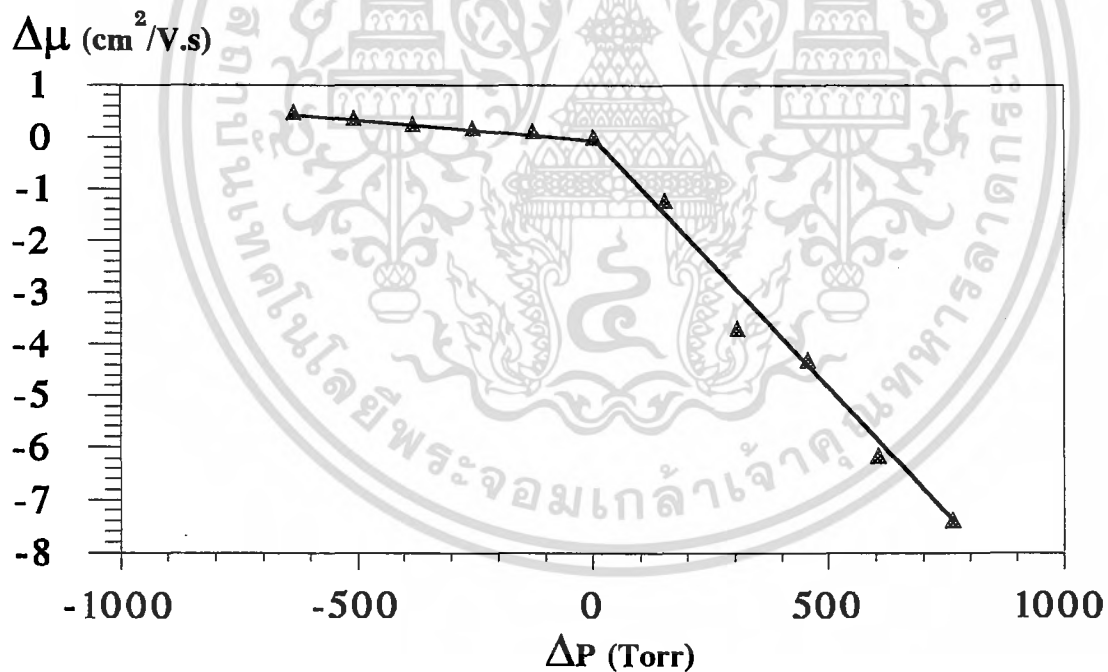
$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_t = \pi_{\parallel} \sigma_t + \pi_{\perp} \sigma_t \quad (5-7)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_r = \pi_{\parallel} \sigma_r + \pi_{\perp} \sigma_r \quad (5-8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

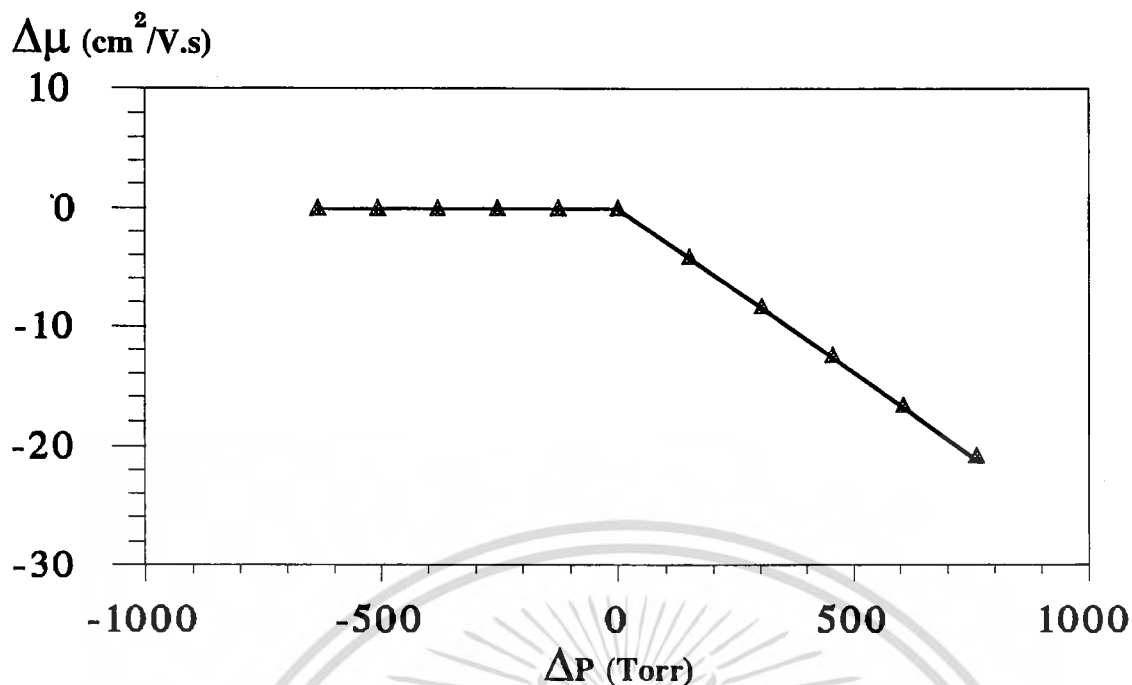


(ก) PMOISFET เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

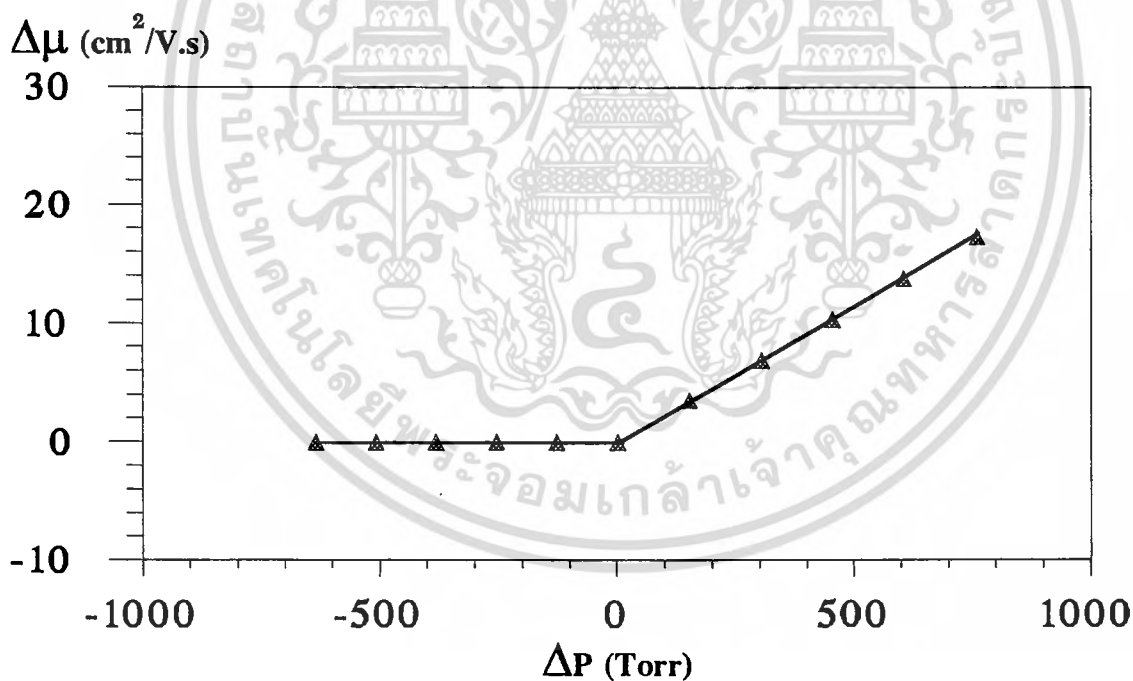


(ข) PMOISFET เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) NMOISFET เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม



(ง) NMOISFET เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ 5-1 แสดงความสัมพันธ์ของค่า μ_{su} กับความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการที่ 2.6-9 และ 2.6-10 จะได้

สำหรับตัวต้านทานชนิดเอ็น

$$\pi_{\parallel} = \pi_{11} [1 - 3(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2)] \quad (5.9)$$

$$\pi_{\perp} = \pi_{11} \left[-\frac{1}{2} + \frac{3}{2} (l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \right] \quad (5.10)$$

สำหรับตัวต้านทานชนิดพี

$$\pi_{\parallel} = 2\pi_{44} (l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \quad (5.9)$$

$$\pi_{\perp} = -\pi_{44} (l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (5.10)$$

จะเห็นว่าเมื่อมีการวางตัว MOISFET ในทิศทางต่างๆ จะทำให้ค่า π_{\parallel} และ π_{\perp} ของตัวต้านทานในช่องทางเดินกระแส (ดังแสดงในแบบจำลองทางไฟตรงและไฟสถับในรูปที่ 2.4-1 และ 2.4-3) มีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ก็เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของ μ_{Au} เมื่อได้รับความดัน ซึ่งจะเห็นได้จาก

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho \frac{l}{A}}{\rho \frac{l}{A}} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta(nq\mu_{nAu} + pq\mu_{pAu})}{(nq\mu_{nAu} + pq\mu_{pAu})} \quad (5-13)$$

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการนำกระแสของ NMOISFET จะได้

$$\frac{\Delta \rho_n}{\rho_n} = \frac{\Delta(nq\mu_{nAu})}{nq\mu_{nAu}} \quad (5-14)$$

ซึ่งค่า n และ q จะคงที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของความดันต่อทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ดังนั้นจะได้

$$\frac{\Delta \rho_n}{\rho_n} = \frac{nq\Delta\mu_{nAu}}{nq\mu_{nAu}} = \frac{\Delta\mu_{nAu}}{\mu_{nAu}} \quad (5-15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการที่ 5-15 ลงในสมการที่ 5-7 และ 5-8 จะได้ดังนี้
สำหรับ NMOISFET

$$\left(\frac{\Delta\mu_{nAu}}{\mu_{nAu}}\right)_i = \pi_{\parallel}\sigma'_i + \pi_{\perp}\sigma'_r \quad (5-16)$$

$$\left(\frac{\Delta\mu_{nAu}}{\mu_{nAu}}\right)_r = \pi_{\parallel}\sigma'_r + \pi_{\perp}\sigma'_i \quad (5-17)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับ PMOISFET จะได้

$$\left(\frac{\Delta\mu_{pAu}}{\mu_{pAu}}\right)_i = \pi_{\parallel}\sigma'_i + \pi_{\perp}\sigma'_r \quad (5-16)$$

$$\left(\frac{\Delta\mu_{pAu}}{\mu_{pAu}}\right)_r = \pi_{\parallel}\sigma'_r + \pi_{\perp}\sigma'_i \quad (5-17)$$

ดังนั้นจึงทำให้ PMOISFET ที่มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อได้รับความดันมากขึ้นจะทำให้ $\Delta\mu_{pAu}/\mu_{pAu}$ มีค่าเป็นบวกมากขึ้น ส่วนของ PMOISFET ที่มีทิศทางการไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อได้รับความดันมากขึ้นจะทำให้ $\Delta\mu_{pAu}/\mu_{pAu}$ มีค่าเป็นลบมากขึ้น ส่วนใน NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อได้รับความดันมากขึ้นจะทำให้ $\Delta\mu_{nAu}/\mu_{nAu}$ มีค่าเป็นลบมากขึ้น และใน NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อได้รับความดันมากขึ้นจะทำให้ $\Delta\mu_{nAu}/\mu_{nAu}$ มีค่าเป็นบวกมากขึ้น

การที่ μ เปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันกระทำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.5-8, 2.5-9, 2.5-9.1 และ 2.5-9.2

$$m^* = \frac{h^2}{4\pi^2 \frac{d^2 E}{dK^2}}$$

$$\mu = \left(\frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_j}\right)^{-1}$$

$$\mu_i \approx (m^*)^{-5/2} T^{-3/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_i \approx (m^*)^{-1/2} N_i^{-1} T^{3/2}$$

จะเห็นว่าทั้ง μ_n และ μ_p ขึ้นกับ m^* และ T ดังนั้นถ้า m^* หรือ T มีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ μ เปลี่ยนแปลงไปด้วย และ μ_i นั้นยังขึ้นกับ N_i อีกด้วย ดังนั้นถ้า N_i และ T คงที่ จะเห็นว่า μ นั้นขึ้นอยู่กับ m^* อย่างเดียว ดังนั้นเมื่อมีความดันมากกระทำบนไดอะแฟรมจะทำให้โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน ดังรูปที่ 2.5-2 เปลี่ยนไป ทำให้ m^* เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ทำให้ค่า m^* เปลี่ยนไป

ส่วนในเรื่องความไวนั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความหนาไดอะแฟรม และตำแหน่งการวางตัว MOISFET บนไดอะแฟรมเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.7-4 และ 2.7-5 จะได้ว่า

$$\sigma_r - \sigma_t = \sigma'(x,y)(2R/d)^2 P \quad (5-20)$$

ซึ่งพบว่าเมื่อไดอะแฟรมมีความหนาน้อยลงจะทำให้ $\sigma_r - \sigma_t$ มีค่ามากขึ้นทำให้ $\Delta k/k'$ หรือ $\Delta\mu/\mu$ มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ส่วนในเรื่องของตำแหน่งการวาง MOISFET บนไดอะแฟรม จะพบว่าเมื่อ r (ดังในรูปที่ 2.7-2) มีค่ามากๆ จะทำให้ $\sigma_r - \sigma_t$ มีค่ามาก นั่นก็คือที่ขอบของไดอะแฟรมจะมีค่า $\sigma_r - \sigma_t$ มากที่สุด

ความไวของ MOISFET ไม่ขึ้นกับ w/L ก็เพราะว่าค่าของ k' นั้นไม่ขึ้นกับ w/L ของ MOISFET ดังนั้น w/L จึงไม่มีผลต่อความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET

จากการทดลองในเรื่องความไวที่อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่าทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET มีการเปลี่ยนแปลงของค่า k' เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อ MOISFET มีอุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้ประจุพาหะเปลี่ยนไป^[1] จึงทำให้กระแส I_{DS} มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินี้จะทำให้ μ เปลี่ยนไป ดังสมการที่ 2.5-9, 2.5-9.1 และ 2.5-9.2 แต่จะไม่ทำให้ความไวต่อความดันที่อุณหภูมิต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET เปลี่ยนไป เนื่องจากจากเมื่อค่า μ เปลี่ยนไปค่า $\Delta\mu$ ก็เปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้อัตราส่วน $\Delta\mu/\mu$ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

ในเรื่องเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตนั้น จากผลการทดลองจะพบว่าเสถียรภาพดีมาก เนื่องจากอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ตัวนี้เป็นอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ จึงทำให้สามารถควบคุมสัญญาณทางเอาต์พุตได้แน่นอนมาก

ข้อสังเกต จากการทดลองจะพบว่าเมื่อมีความแตกต่างของความดันเป็นบวกกับเป็นลบ ความไวที่ได้จะแตกต่างกัน การที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟ ที่เกิดจากความเค้นอัดและความ

เส้นโค้งมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้ความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันไม่เท่ากัน จึงเป็นเหตุให้เมื่อความแตกต่างความดันมีค่าเป็นลบ การเปลี่ยนแปลงของค่า k' จะมีค่าน้อยมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

1.สรุป

จากผลการทดลองในบทที่ 4 พบว่าอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET เมื่อได้รับความดันมากกระทำ ค่าแรงดันขีดเริ่ม ค่าแรงดันพั้งทลาย และค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกทของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนสามารถประมาณได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่า process transconductance(k') เมื่อมีความแตกต่างความดันกับความดันบรรยากาศเป็นบวก จะเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่า $\Delta k'/k'$ เป็นบวกมากขึ้น
- ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่มีกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่า $\Delta k'/k'$ เป็นลบมากขึ้น
- ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่า $\Delta k'/k'$ เป็นลบมากขึ้น
- ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่มีกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่า $\Delta k'/k'$ เป็นบวกมากขึ้น

แต่เมื่อความแตกต่างความดันกับความดันบรรยากาศเป็นลบ ค่าของ $\Delta k'/k'$ นั้น มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากทั้งของ PMOISFET และ NMOISFET ที่มีทิศทางกระแสขนานและตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

ความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ขึ้นกับความหนาของไดอะแฟรม และตำแหน่งการวาง MOISFET บนไดอะแฟรม คือเมื่อความหนาน้อยความไวก็จะมาก แต่เมื่อความหนาน้อยก็ทำให้ความแข็งแรงของไดอะแฟรมน้อย ดังนั้นจึงใช้ความหนา 20 ไมโครเมตร ซึ่งหนามากกว่าอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเปียโซรีซิสทีบบนไดอะแฟรมบาง^[11] ซึ่งสร้างด้วยเทคโนโลยีเดียวกัน ส่วนตำแหน่งบนไดอะแฟรมนั้นควรวาง MOISFET ที่บริเวณใกล้ขอบเพราะมีการเปลี่ยนแปลงดีที่สุดและความไวก็ไม่ขึ้นกับค่า W/L ของ MOISFET และอุณหภูมิ

ส่วนเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตที่ความดันต่างๆ นั้นจะมีความเสถียรสูง

ตัวอย่าง ความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่สร้างบนไดอะแฟรมขนาด 1000 x1000 ตารางไมโครเมตร ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร และความหนาของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตรมีค่าเป็นดังนี้

- ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมมีความไว $3.894 \times 10^{-5} \text{ Torr}^{-1}$
- ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่มีกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมมีความไว $-5.44 \times 10^{-5} \text{ Torr}^{-1}$
- ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมมีความไว $-4.22 \times 10^{-4} \text{ Torr}^{-1}$
- ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET ที่มีกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมมีความไว $3.545 \times 10^{-4} \text{ Torr}^{-1}$

จะเห็นว่าทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET ที่มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมนั้น จะมีความไวน้อยกว่าในกรณีที่กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม แต่ในกรณีของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ NMOISFET พบว่ากรณีที่กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม จะมีความไวมากกว่ากรณีที่กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

2. วิจารณ์

จากการทดลองพบว่าทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET นั้นมีข้อดี และข้อเสียดังนี้ คือ

2.1 ข้อดี

1. สามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้
2. เป็นอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟจึงสามารถควบคุมอัตราขยายได้
3. มีเสถียรภาพสูง
4. ความบางของไดอะแฟรมน้อยกว่า และมีความไวมากกว่า เมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเปียโซรีซิสทีฟบนไดอะแฟรมบาง^[11] ที่เคยพัฒนาขึ้นในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคโนโลยีเดียวกัน
5. เมื่อนำทรานซิสเตอร์ความดันแบบ PMOISFET และ NMOISFET ที่มีกระแสไหลขนานและตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม มาต่อกันอย่างเหมาะสมจะทำให้ความไวมีค่าเพิ่มขึ้น
6. ความไวของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ต่อความดัน ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

2.2 ข้อเสีย

ในการสร้างอุปกรณ์ตัวนี้ขึ้นมา นั้น มีหลายขั้นตอน ต้องมีขั้นตอนการกัดเป็นไดอะแฟรมและการแพร่ทองคำ ซึ่งขั้นตอนทั้งสองนี้เป็นขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการสร้าง MOS และเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยาก และไม่สามารถนำไปใช้งานในกรณีที่มีความแตกต่างความดันกับความดันบรรยากาศเป็นลบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แนวทางในการพัฒนา

จากผลการทดลองพบว่า ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET นั้น สามารถตอบสนองต่อความแตกต่างของความดันกับความดันบรรยากาศที่เป็นบวกได้ดี และจากลักษณะการตอบสนองที่แตกต่างเนื่องจากชนิดของทรานซิสเตอร์ความดัน (PMOISFET และ NMOISFET) และทิศทางของกระแสที่ไหลเทียบกับขอบของไดอะแฟรม จะเป็นแนวทางในการพัฒนาให้มีความไวสูงๆ ได้ หรือนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมหรือกำเนิดความถี่โดยใช้ความดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. จิรวัดน์ ปานกลาง การศึกษา วิจัย และพัฒนาทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS เป็นวงจรรวมขนาดเล็ก, วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535.
2. S. Middelhoek and S.A. Audet, *Silicon sensors*. London: Academic Press, 1989.
3. C.S Smith, Piezoresistance effect in germanium and silicon, *Phys. Rev.*, Vol.94, PP42-49, 1954.
4. John Markus, *Electronics dictionary*, McGraw-Hill, New York, 1978.
5. อัมพร โพธิ์ไย, วีระ เฟื่องจันทร์, เต็มพงษ์ เฟ็ชรกุล, ศศ.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช, คุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างซิมอสในกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน, การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2535, หน้า 479-504.
6. อัมพร โพธิ์ไย, จิรวัดน์ ปานกลาง, ศศ.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช และ Prof. Dr. Masamori Iida, ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOIS, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, หน้า 419-423, พฤศจิกายน 2536.
7. อนุชา เรืองพานิช, ศศ. วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง และ รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช, ผลของอะตอมทองคำต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไคโดด, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14, หน้า 2-128 - 2-131, พฤศจิกายน 2534.
8. มนชนก ศรีเสื่อขาม, การพัฒนาทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS เป็นวงจรรพื้นฐานของ GATE ARRAY, วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536.
9. S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., 1969.
10. W.G. Pfann and R.N. Thurston, Semiconductor stress transducers Utilizing the transverse and shear piezoresistance effects, *J. Appl. Phys.*, Vol.32, No. 10 october 1963.
11. ชาญชัย สักดิ์โสภณัฐ, สมศักดิ์ เขียวศิริกุล และสมเกียรติ สุกเดช, การพัฒนาทรานซิสเตอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปเพื่อประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 12, หน้า 573-581, พฤศจิกายน 2532.
12. Helmut F. Wolf., *Silicon semiconductor data*, Peramon Press Inc., 1969.
13. ศศ. สมเกียรติ สุกเดช, ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ, สำนักพิมพ์วารสารอิเล็กทรอนิกส์เวิลด์, 2525.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. อัมพร โพธิ์ชัย, จิรวัดน์ ปานกลาง, ผศ.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช และ Prof. Dr. Tateki Kurosu, การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOIS เนื่องจากความดัน, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17, หน้า 492-497, ธันวาคม 2537.
15. Dewitt G. Ong, **Modern MOS Technology Processes Devices and Design**, McGraw-Hill Book company, 1984.
16. โกศล เพ็ชรสุวรรณ, มาชามอริ อีคะ, เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ, บริษัท ดวงกลม จำกัด, 2522.
17. สมเกียรติ สุกเดช, วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, จิรวัดน์ ปานกลาง, อนุชา เรืองพานิช และมนชนก ศรีเสื่อขาม, ความคล่องตัวของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่เติมอะตอมทองคำ, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 13 หน้า 280-290, พฤศจิกายน 2533.
18. รัชฎะ สักดีโสภณัฐ, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมชัย วงษ์เมตตา และสมเกียรติ สุกเดช, การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แรงดันชนิดสารกึ่งตัวนำ, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 9 หน้า 1-22-1 - 1-22-19, ธันวาคม 2529.
19. รัชฎะ สักดีโสภณัฐ, ทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเปียโซรีซิสทีปบนไดอะเฟรมบาง, วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

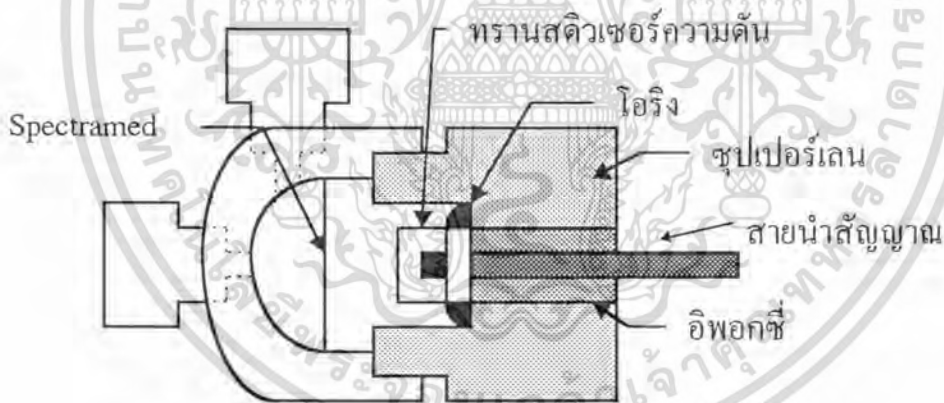
ภาคผนวก ก

การประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากในปัจจุบันนี้หัวใจความดันมีหลายชนิดมาก ดังนั้นอุปกรณ์ตัวใหม่ๆ ที่สร้างขึ้นมาจึงต้องทำให้สามารถใช้ได้กับระบบเดิมที่มีอยู่แล้ว ก็ไม่ต้องมีการตัดแปลงมาก เพียงแต่นำอุปกรณ์ตัวใหม่เข้าไปแทนก็สามารถใช้งานได้ อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ก็เหมือนกันสามารถนำไปแทนในการประยุกต์ใช้งานของทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเปียโซรีซิสทีฟบนไดอะแฟรมบาง กับระบบจำลองการหมุนเวียนของเลือดได้ โดยมีรายละเอียดการเก็บบรรจุและการทดสอบดังนี้

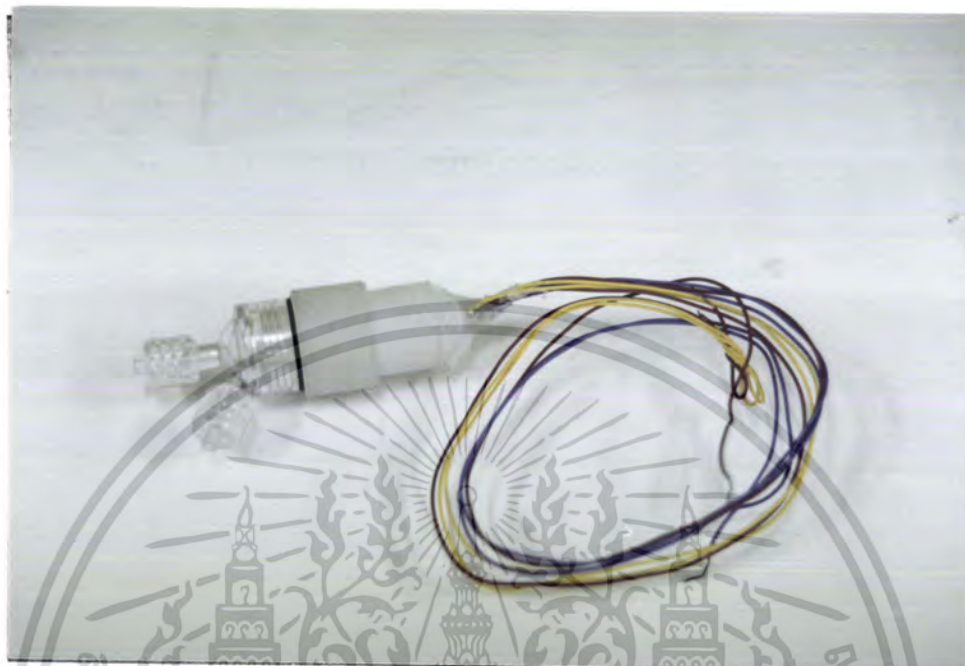
การเก็บบรรจุ

จะนำชิปทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET มาติดบนฐานรองโลหะแบบ TO-5 แล้วปิดฝาที่เจาะรูตรงกลาง ติดกาวอีพอกซีระหว่างฝาปิดกับฐานรอง เมื่อบรรจุลงบนตัวถังเรียบร้อยแล้วก็ทำการสอดเข้าไปในโครงสร้างตัวถังเก็บบรรจุที่ทำจากซูเปอร์เลน โดยมีโอริง (oring) รองรับอยู่เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศภายในรั่วออกมาได้ หลังจากนั้นทำการต่อสายสัญญาณออกมา การเก็บบรรจุลักษณะนี้สามารถนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์มาตรฐานที่ใช้ในการแพทย์ในปัจจุบันนี้ได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก-1 และ ก-2



รูปที่ ก-1 แสดงโครงสร้างภาพตัดขวางของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่ถูกเก็บบรรจุเป็นหัวใจเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบจำลองการหมุนเวียนของเลือด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

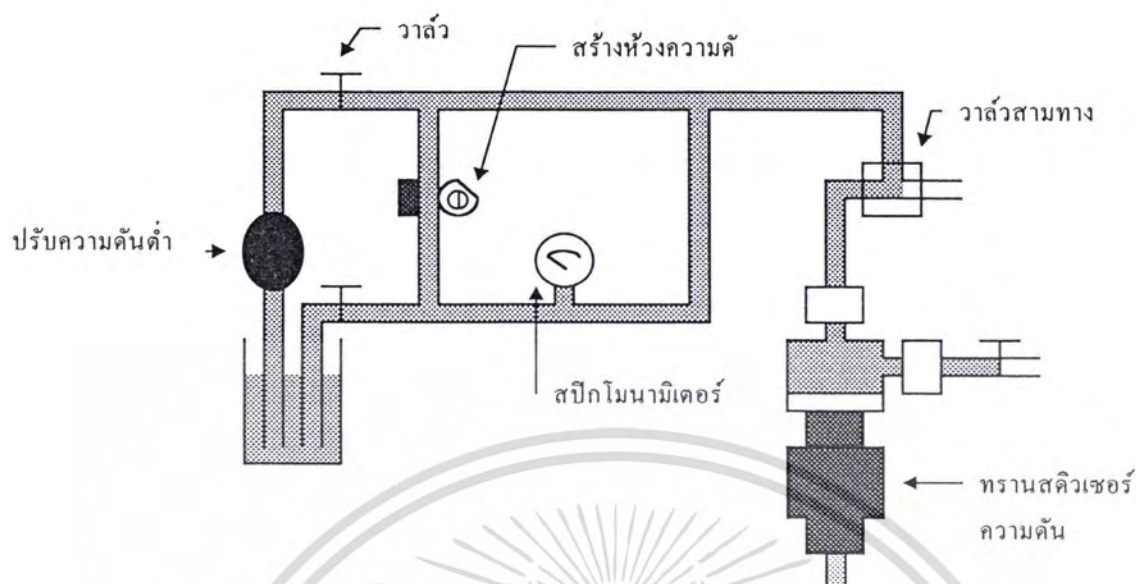


รูปที่ ก-2 แสดงภาพถ่ายหัววัดที่ได้รับการเก็บบรรจุเสร็จสมบูรณ์แล้ว

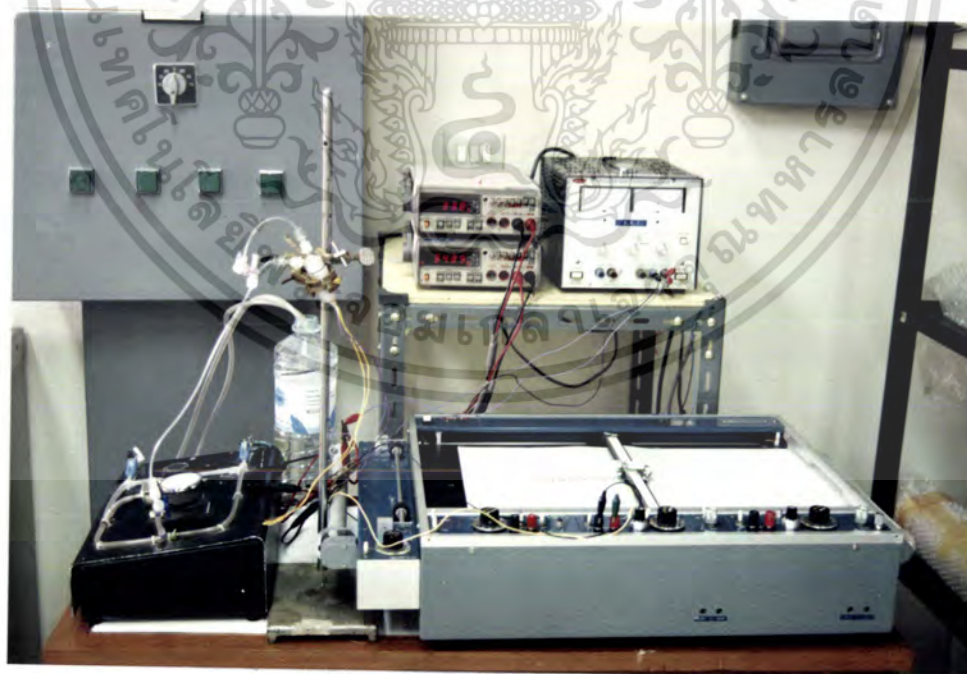
การทดสอบกับระบบจำลองการหมุนเวียนของเลือด

หัววัดจะต่อเข้ากับระบบจำลองการหมุนเวียนของเลือด ดังแสดงในรูปที่ ก-3 และ ก-4 เริ่มต้นโดยการใส่ฟองอากาศในหลอดแคทีเตอร์ (catheter) ออกให้หมด จากนั้นตั้งความดันเริ่มต้นให้ได้ 80 มิลลิเมตรปรอท ค่าความดันนี้แสดงด้วยสปีกโมนามิเตอร์ เมื่อแบบจำลองการหมุนเวียนของเลือดทำงานก็จะให้ห้วงความดันคล้ายกับความดันที่เกิดจากการสูบฉีดเลือดของหัวใจ เนื่องจากกระแสที่ได้มีค่าต่ำมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความดัน แต่กระแสของ MOISFET ในขณะที่ไม่มีความดันมีค่าสูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกัน ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) ช่วยในการแยกสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงออกมา สัญญาณที่ได้จะบันทึกลงบนเครื่องบันทึกสองแกน จะเห็นว่าหัววัดที่สร้างขึ้นสามารถถ่ายทอดสัญญาณลักษณะรูปคลื่นความดันเลือดจากระบบจำลองการหมุนเวียนของเลือดได้ ดังแสดงในรูปที่ ก-5

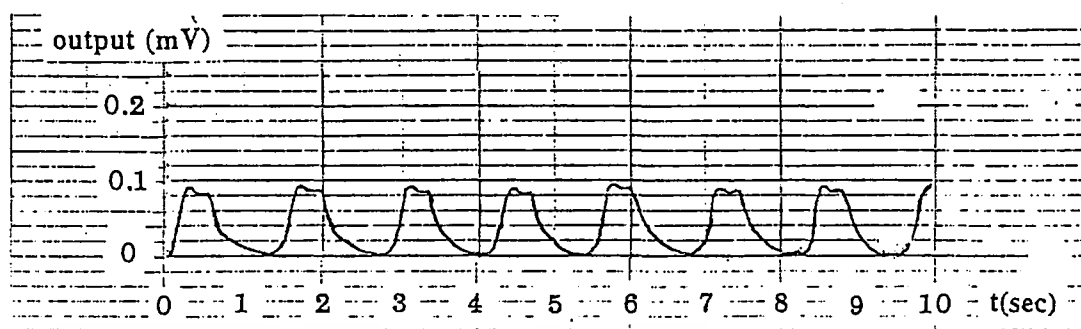
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



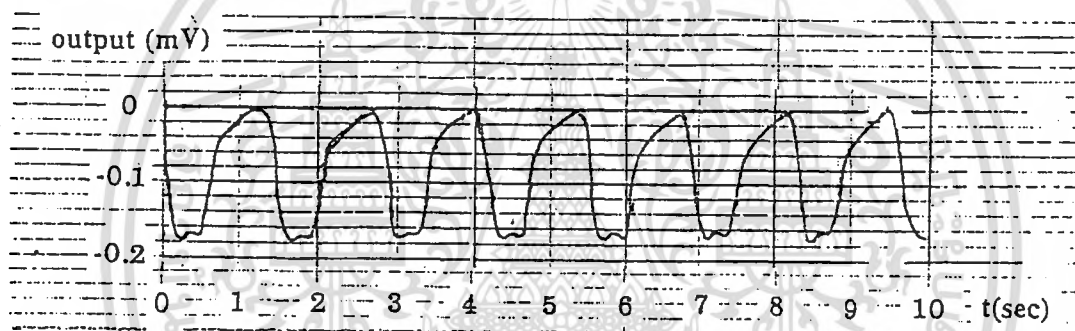
รูปที่ ก-3 แสดงแผนผังการทดสอบห้วงวัดความค้แบบ MOISFET กับระบบจำลองการหมุนเวียนเลือด



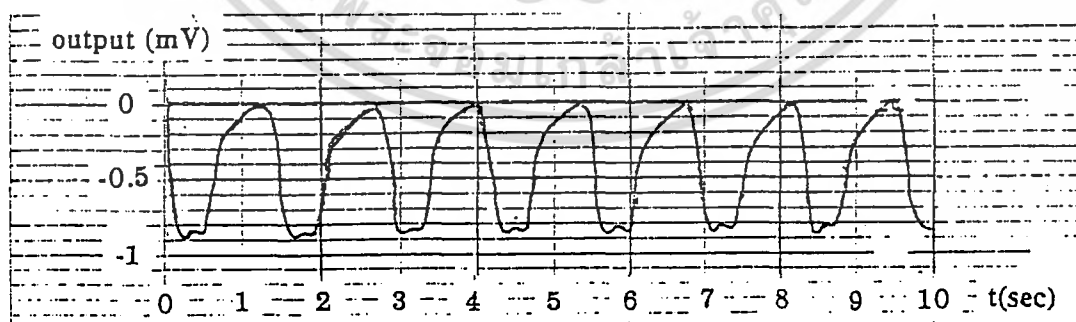
รูปที่ ก-4 แสดงภาพถ่ายการทดสอบห้วงวัดความค้แบบ MOISFET กับแบบจำลองการหมุนเวียนเลือด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) หัววัดความดันแบบ PMOSFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม

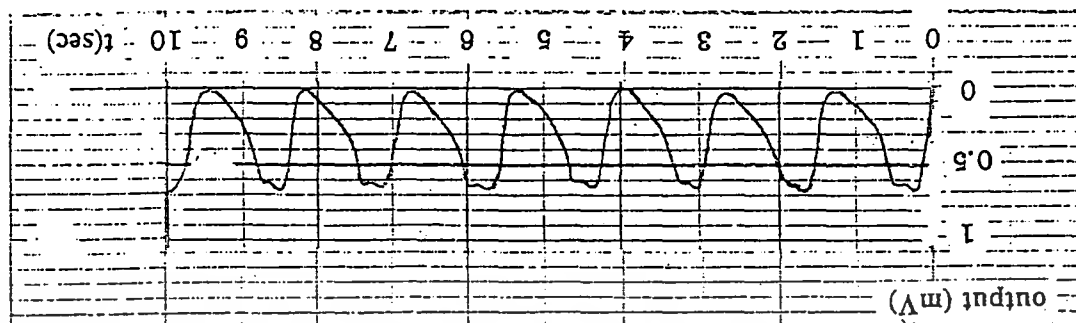


(ข) หัววัดความดันแบบ PMOSFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม



(ค) หัววัดความดันแบบ NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) หัววัดความดันแบบ NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

รูปที่ ก-5 กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากหัววัดจากการทดสอบกับระบบจำลองการหมุนเวียนของเลือด

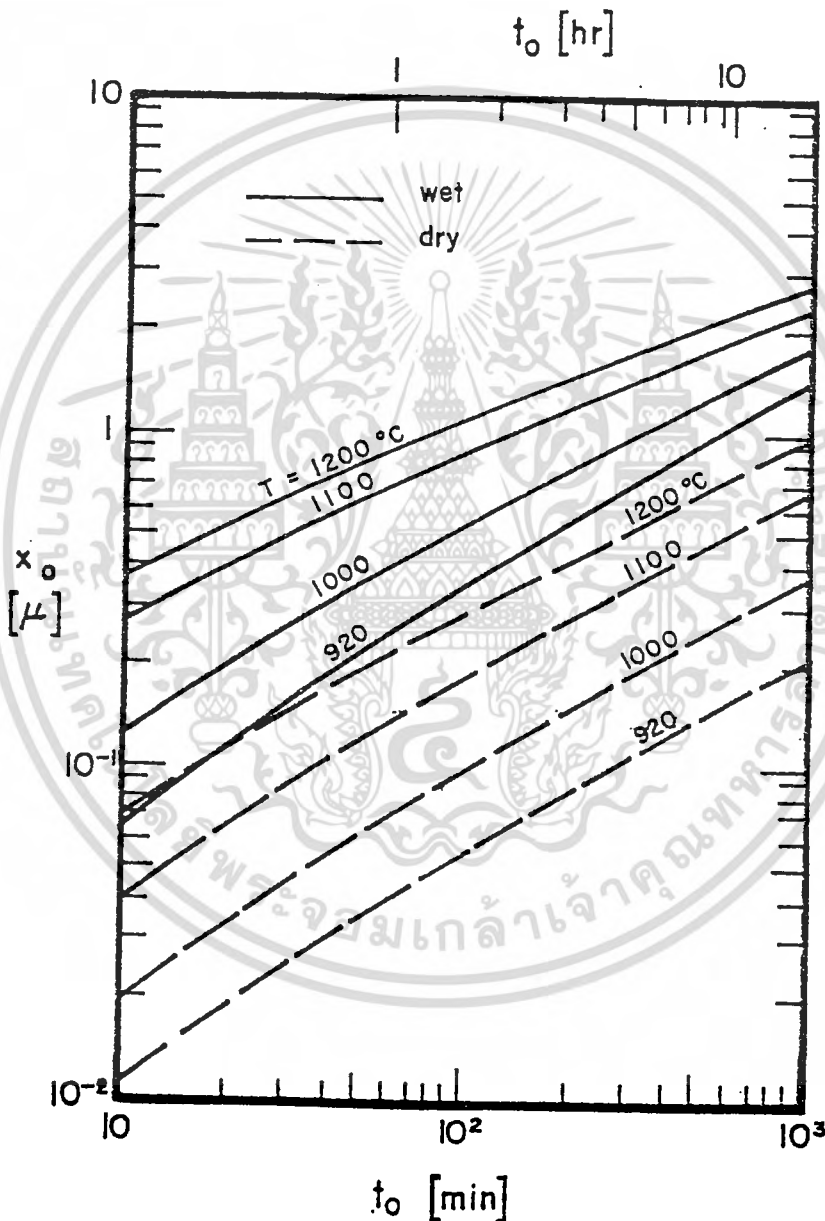


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ด้วยความร้อน ซึ่งกราฟที่จะแสดงต่อไปนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของความหนาออกไซด์ (X_o) กับเวลาในการทำออกซิเดชัน (t_o) และอุณหภูมิในการทำออกซิเดชัน (T) ดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 ความหนาออกไซด์ (X_o) กับเวลา (t_o) และอุณหภูมิ (T) ในการทำออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

กระบวนการแพร่สารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส

ในทางปฏิบัติกระบวนการแพร่สารเจือ แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการ Predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้น เพื่อควบคุมปริมาณของสารเจือที่จะเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ
 2. ขั้นตอนการ Drive-in เป็นการแพร่ในขั้นต่อจากการ Predeposition เพื่อควบคุมและกำหนดลักษณะการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ
- ดังนั้นเมื่อผ่านสองขั้นตอนนี้แล้วการกระจายของสารเจือจะเป็นดังนี้

$$C(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \cdot \frac{e^{-x^2}}{4D_2 t_2} \quad (\text{ค-1})$$

โดยที่ $C(x)$ คือความหนาแน่นสารเจือที่ตำแหน่ง x ซึ่งห่างจากผิวหน้าลงในแผ่นผลึก

Q คือปริมาณของสารเจือที่ถูกเติมลงไปผลึกสารกึ่งตัวนำขณะทำการ Predeposition ซึ่งหาได้ดังนี้

$$Q = C_s \sqrt{\frac{4D_1 t_1}{\pi}} \quad (\text{ค-2})$$

C_s คือค่า solid solubility ของสารเจือในซิลิกอนที่อุณหภูมิขณะ Predeposition (คือความเข้มข้นของสารเจือสูงสุด C_{Bmax}) ซึ่งหาได้จากรูปที่ (ค-1)

D_1 คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือในซิลิกอนที่อุณหภูมิขณะ Predeposition ค่านี้หาได้จากกราฟรูปที่ (ค-2)

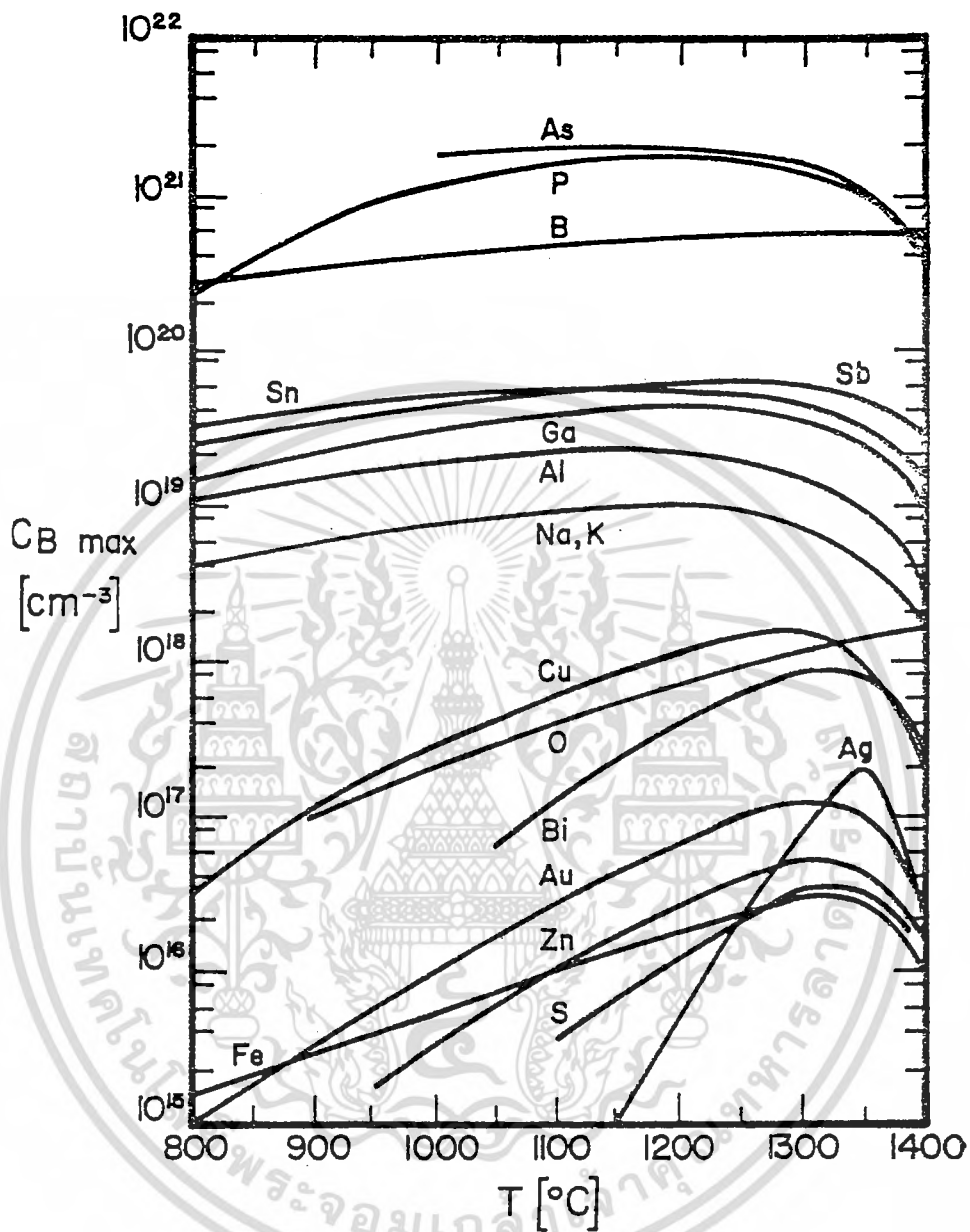
t_1 คือช่วงเวลาที่ใช้ในการ Predeposition

D_2 คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือที่อุณหภูมิขณะทำการ drive-in

t_2 คือช่วงเวลาที่ใช้ในการ drive-in

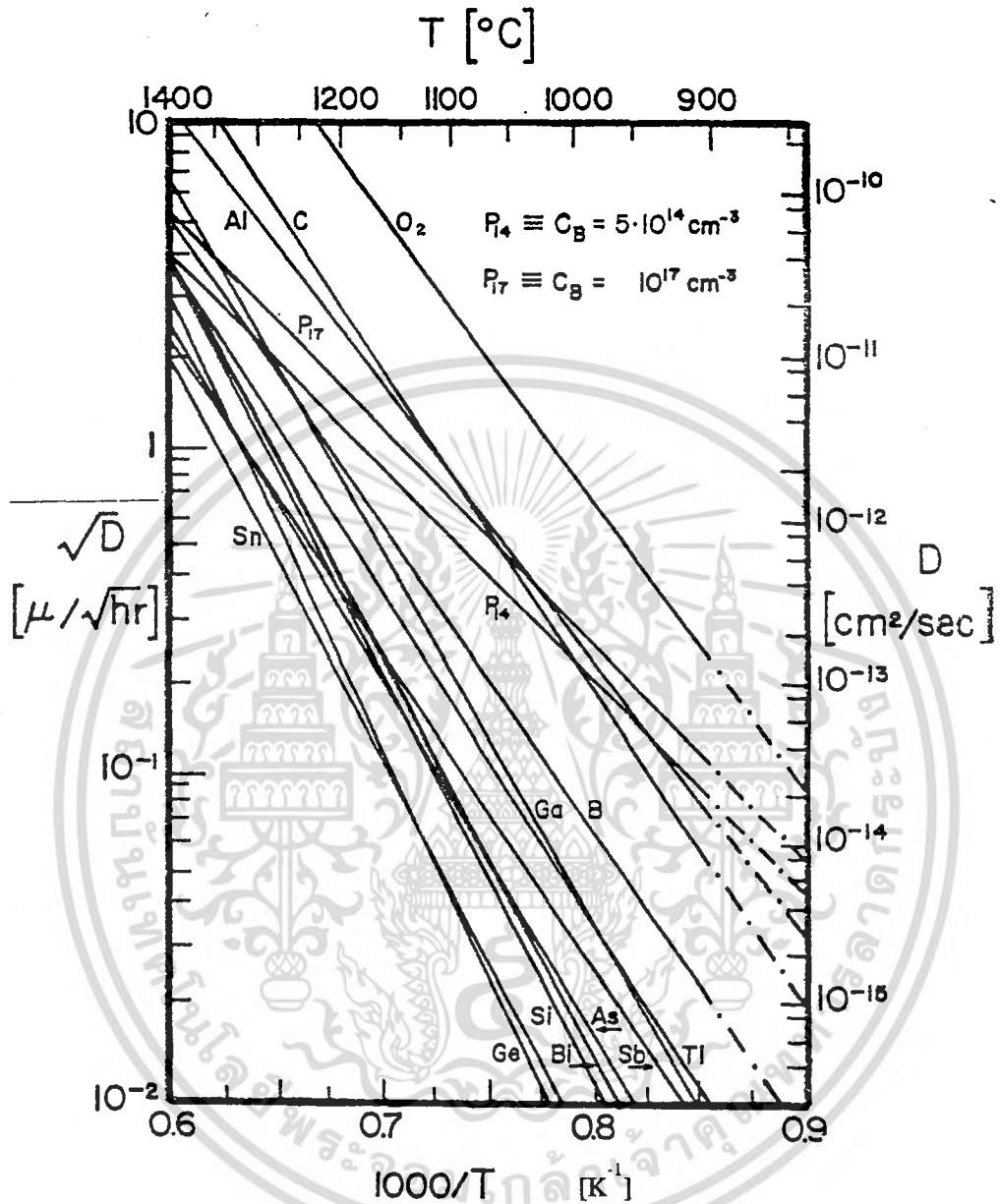
e คือค่าเอกโปรเนนเชียล มีค่า 2.71828

x คือตำแหน่งใดๆ ซึ่งลึกลงไปในแผ่นผลึก



รูปที่ ก-1 แสดงค่า solid solubility ของสารเจือในซิลิกอน (ความเข้มข้นสารเจือสูงสุด, C_{Bmax} ที่อุณหภูมิ T ใดๆ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



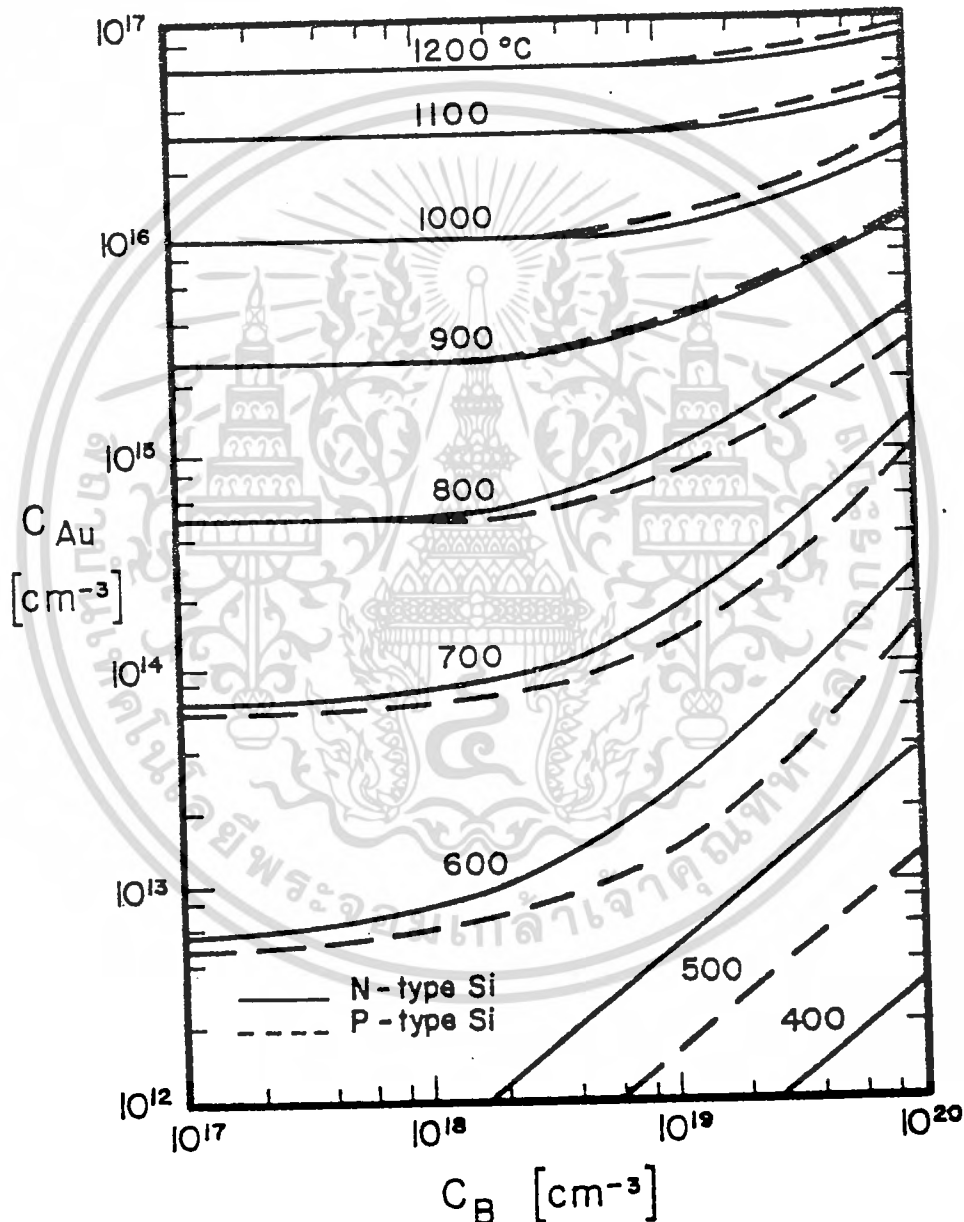
รูปที่ ค-2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

กระบวนการแพร่สารเจือทองคำ

ในกระบวนการแพร่ทองคำ ถ้าทำการเคลือบทองคำที่ด้านหลังให้มากเกินพอแล้ว ความเข้มข้นของทองคำในแผ่นผลึกซิลิกอน (C_{Au}) จะขึ้นกับชนิดของซิลิกอน ความเข้มข้นสารเจือที่มีอยู่เดิม (Background Impurity Concentration (C_B)) และอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ทองคำ (T) ดังแสดงในรูปที่ ง-1



รูปที่ ง-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองคำในสภาวะอิมิตัว (C_{Au}) กับความเข้มข้นของสารเจือ Background (C_B) และ อุณหภูมิในการแพร่ทองคำ (T)

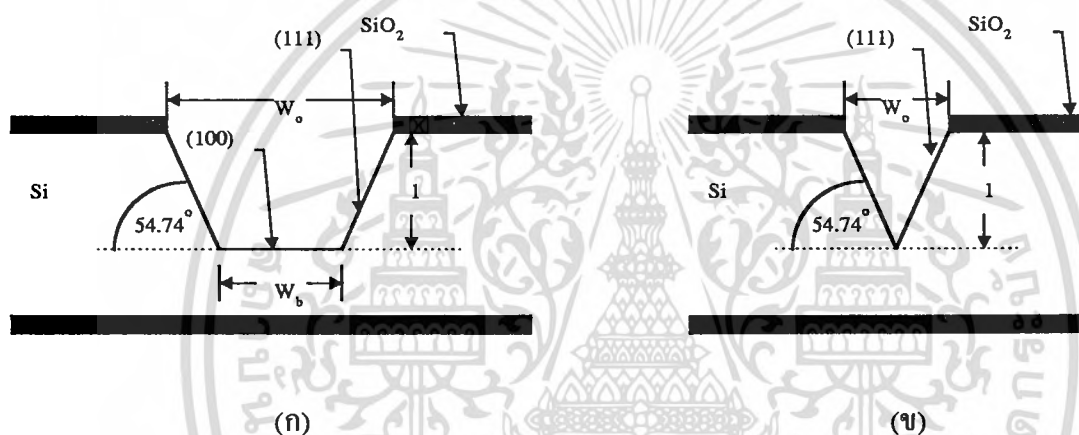
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การกัดและเทคนิคการกัดแผ่นซิลิกอน

ในการกัดเป็นไดอะแฟรมนั้น จะใช้สารละลายซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ Ethylene diamine ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$) Pyrocatechol ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$) และ Deionized water หรือเรียกย่อๆ ว่า EPD ที่มีอัตราส่วน 50:8:16 ซึ่งสารละลายตัวนี้มีคุณสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โดยมีอัตราการกัดในผลึกซิลิกอน ระบายต่างๆ เรียงลำดับดังนี้ $(100) > (110) > (111)$ และจะใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวนป้องกันการกัดของสารละลาย เพราะว่าอัตราการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ช้ามาก

เนื่องจากสารละลายตัวนี้มีคุณสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ดังนั้นเมื่อเปิดช่องการกัดเป็น รูสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะได้ลักษณะการกัดเป็นดังรูปที่ (จ-1)



รูปที่ จ-1 แสดงภาพตัดขวางของหลุมที่ถูกกัด (ก) หลุมรูปตัวยู (ข) หลุมรูปตัววี ซึ่งความกว้างของพื้นหลุมจะหาได้จากสมการ

$$W_b = W_0 - 2l \cot 54.74^\circ$$

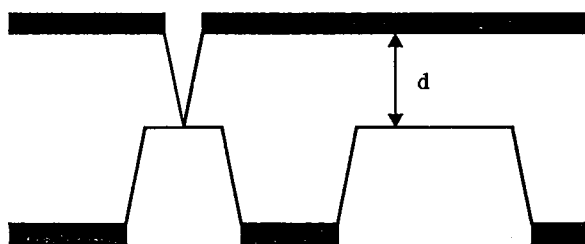
$$\approx W_0 - \sqrt{2}l$$

(จ-1)

จากสมการที่ จ-1 จะเห็นว่าถ้า $W_0 \leq 2l \cot 54.74^\circ$ แล้วจะทำให้การกัดเป็นรูปตัววี ดังแสดงในรูปที่ จ-1 (ข) ถ้า $W_0 > 2l \cot 54.74^\circ$ แล้วจะทำให้การกัดเป็นรูปตัวยูดังแสดงในรูปที่ จ-1 (ก)

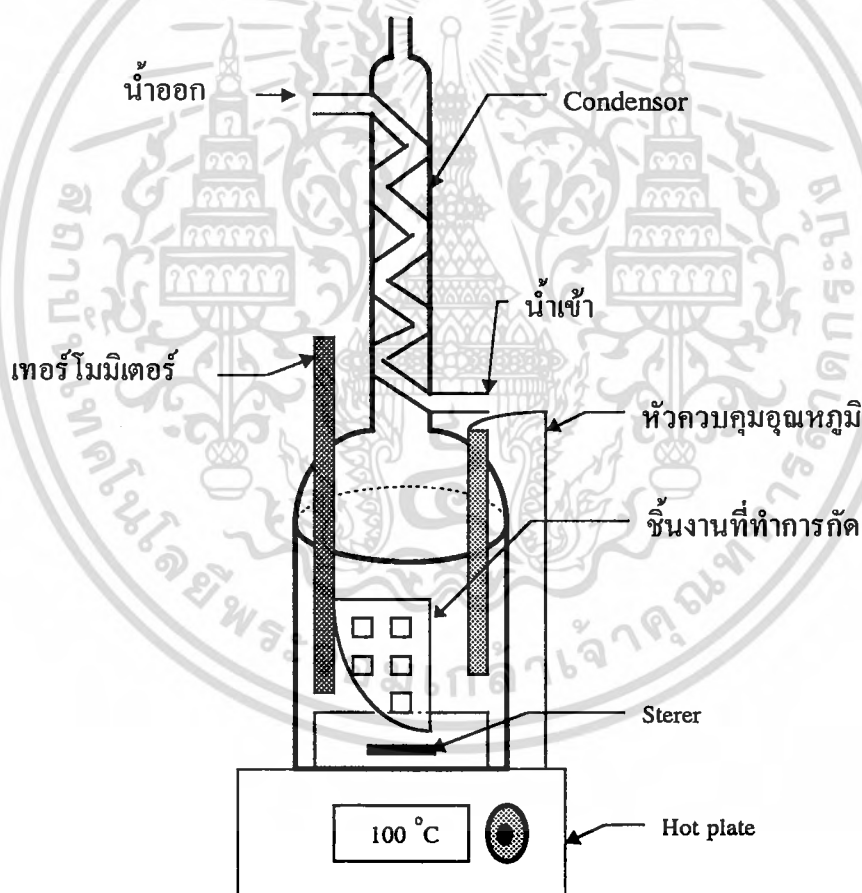
จากลักษณะการกัดแบบนี้จึงทำให้ใช้เทคนิคการควบคุมความหนาด้วยร่องตัววี และใช้แสงช่วยลักษณะของเทคนิคนี้แสดงได้ดังรูปที่ จ-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-2 แสดงเทคนิคการควบคุมความหนาด้วยร่องตัววี

จากรูปที่ จ-2 จะเห็นว่าถ้าต้องการให้ไดอะแฟรมหนา d ก็ทำการออกแบบ W_0 ให้มีลักษณะการกัดเป็นหลุมตัววีที่ลึก d เมื่อกัดมาถึงความลึก d การกัดก็จะหยุดกัด แต่ทางด้านหลุมรูปตัวยูจะกัดไปเรื่อยๆ จนชนกับหลุมตัววี แสงก็สามารถทะลุผ่านได้ ก็จะได้ความหนาไดอะแฟรม d ตามต้องการ แผนภูมิการกัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงดังรูปที่ จ-3 และภาพถ่ายในรูปที่ จ-4



รูปที่ จ-3 แสดงแผนภูมิการกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-4 แสดงภาพถ่ายของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัดแผ่นผลึกซิกลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง



รูปที่ ฉ-1 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต้นแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้นรูปที่ ฉ-2 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพเพื่อส่วนลงบนกระดาษที่มีสีนำไปใช้



รูปที่ ๓-3 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม (เครื่อง spinner)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น **รูปที่ ๓-4** แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายมาสก์ (Mask aligner) ครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓-5 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ๓-6 แสดงภาพถ่ายเครื่องวัดความต้านทานแผ่น (Four point probe) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗-7 แสดงภาพถ่ายเครื่องตัดแยกชิป



รูปที่ ๗-8 แสดงภาพถ่ายเครื่องตัดชิปบนตัวถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑-9 แสดงภาพถ่ายเครื่องสันถวามถี่สูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ ๑-10 แสดงภาพถ่ายเครื่องต่อสายลวดตัวนำ



รูปที่ จ-11 แสดงภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการตรวจสอบลวดลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ จ-12 แสดงภาพถ่ายเครื่องวัดความหนา



รูปที่ ๑-13 แสดงภาพถ่ายเครื่องเคลือบ โลหะในสูญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการสร้าง

สารเคมีที่ใช้มีความเข้มข้นดังนี้

HF 47%

NH₄ 40%

ส่วนน้ำที่ใช้นั้นจะปลอดประจุ (Deionized Ion (DI))

สารเคมีที่ใช้มีองค์ประกอบดังนี้

1. HF 5%

HF : H₂O

1 : 19

2. BUFFER

HF : NH₄

1 : 6

3. กรดกัดละลายอลูมิเนียม

H₃PO₄ : HNO₃ : CH₃COOH : H₂O

80 : 5 : 5 : 10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายอัมพร โพธิ์ไย
วัน เดือน ปี เกิด	วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2512
สถานที่เกิด	จังหวัดปทุมธานี
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2534



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้