

รายงานโครงการวิจัย

เรื่อง

วงจรรำเน็ดคววมถึคววมคุมด้วยแรงดันอากาศโครงสร้าง
ทรานซิสเตอร์แบบ CMOIS



โดย
จิววัฒน์ ปานกลาง

RCH

TK

7872

07

๑๕1๒๖



T034401

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 34401

วัน, เดือน, ปี..... 1 พ.ย. 2542

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจาก
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องสมุดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS เป็นทรานซิสเตอร์ที่มีการทำงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้า เป็นตัวควบคุมกระแสที่ไหลในตัวทรานซิสเตอร์เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์โครงสร้าง แบบ MOS ทั่ว ๆ ไป แต่ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS มีค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแสต่ำกว่าทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOS ธรรมดา ดังนั้นการประยุกต์ใช้งาน ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS จึงไม่เหมาะที่จะนำไปสร้างวงจรที่ต้องการใช้กระแสมาก ซึ่ง วงจรกำเนิดความถี่ที่จะนำทรานซิสเตอร์แบบ MOIS มาประยุกต์นี้ เป็นวงจรที่ทำงานในโหมดของ แรงดัน และประกอบด้วยคุณสมบัติของผลึกฐานรองซิลิกอนที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งใช้ เป็นฐานรองในการสร้างทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS ขณะได้รับความดันอากาศ จะทำให้ โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนรูปไป ส่งผลให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะที่ใช้ในการนำกระแสมี ค่าเปลี่ยนแปลงตามโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อมีความดันอากาศมากกระทบกับ ทรานซิสเตอร์ที่อยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอน จะทำให้ทรานซิสเตอร์มีค่าความนำกระแสเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของวงจรเมื่อได้รับความดันอากาศที่เปลี่ยนแปลงจากค่าปกติ มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS จึงเหมาะสมมากที่จะนำมาสร้าง เป็นวงจรกิจกำเนิดความถี่ ที่ควบคุมค่าความถี่ ด้วยความดันอากาศ

วงจรกิจกำเนิดความถี่ที่เหมาะสมกับทรานซิสเตอร์โครงสร้าง แบบ MOIS คือวงจรริงออสซิลเลเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ต่ออนุกรมกันเป็น จำนวนสี่ ที่ทำการป้อนกลับสัญญาณขาออกมายังสัญญาณขาเข้า ทั้งนี้โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ แบบ MOIS ได้ออกแบบบนฐานรองซิลิกอนแบบ n ระบาย (100) หนา 400 ไมโครเมตรที่มีพิทัด ความต้านทาน 8-12 โอห์ม.เซนติเมตรซึ่งถูกกัดแผ่นผลึกจากด้านหลังตรงบริเวณที่สร้าง ทรานซิสเตอร์ ให้มีความหนาของแผ่นผลึกเป็น 20 ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยกระบวนการกัดเนื้อฐานรองซิลิกอนแบบแอนไอโซโทรปิกในสารละลาย EPD การเปลี่ยนแปลงของความถี่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศนั้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าในช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์ที่อยู่บริเวณไดอะแฟรมของซิลิกอน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทดสอบ ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นและทรานซิสเตอร์ชนิดพีในวงจรกิจกำเนิดความถี่วางบริเวณแผ่นผลึกซิลิกอน ที่ได้รับผลกระทบจากการกระทำของความดันอากาศ พบว่าทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดให้ค่าความแตกต่างของความถี่ไม่เหมือนกันทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสของทรานซิสเตอร์เมื่อ เทียบกับขอบของไดอะแฟรม โดยวงจรกิจกำเนิดความถี่แบบ 3 ชุด ที่มีการแยกวาง NMOISFET ให้มี ทิศทางการไหลของกระแสเป็นแบบขนานกับขอบของไดอะแฟรม จะมีความไวมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

The operation of the MOIS transistor can be viewed as the voltage control current source, similar to that of the conventional MOS transistors. The MOIS transistor has lower electron and hole mobility. Therefore the applications of the MOIS transistor are not so good in the current mode circuit. The oscillator circuit is one of the application that MOIS operates in the voltage mode. When the air pressure is applied to the transistor on the silicon substrate, the transconductance of the transistor is changed and the frequency of the circuit is changed more than the oscillator circuit which is used MOS transistors. This is because the mobility is changed according to the present of gold atom in devices substrate. This structure of transistors is suitable to be made as a pressure control oscillator.

MOIS transistor Ring Oscillators are investigated. The circuits consist of odd stages of the inverter chain. The designed MOIS devices are fabricated on the Si substrate, (100) oriented with the thickness of 400 μm . The wafer resistivity is 8-12 ohm-cm. This wafer are etched using EPD anisotropic etchant to form thin square diaphragm on the backside of the transistor with the thickness of 20 μm . It is found that The change of output frequency of the circuit depends on the change of transconductance of the transistors as the air pressure is applied to diaphragm. Different device types, PMOIS and NMOIS, are studied and compared. And from the experimental it is found that the change of frequency are depended on the direction of drain current via edge of diaphragm. And the highest sensitivity can be produced from 3-stage ring oscillator with NMOIS in the diaphragm that determined the current flow paralleled with the diaphragm edge.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาไทยอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
สัญลักษณ์.....	X IX
คำนำ.....	XXII
บทที่	
1 ทหรานซิสเตอร์วัดความดัน โครงสร้างแบบ MOISFET.....	1
โครงสร้างและการทำงานของทหรานซิสเตอร์แบบ MOIS.....	1
ทหรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (PMOISFET).....	2
ทหรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (NMOISFET).....	3
คุณสมบัติกระแสและแรงดันของ MOISFET.....	4
แรงดันขีดเริ่มและแรงดันพังทลายของ MOISFET.....	7
แบบจำลองทหรานซิสเตอร์ โครงสร้างแบบ MOISFET.....	11
ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีป.....	13
โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน.....	14
ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปในซิลิกอนชนิดเอ็น.....	19
ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปในซิลิกอนชนิดพี.....	21
ผลของปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปในซิลิกอนต่อพารามิเตอร์ของMOISFET.....	23
แรงดันขีดเริ่ม.....	23
แรงดันพังทลาย.....	24
ความจุไฟฟ้าบริเวณช่องทางเดินกระแส.....	26
ค่าทหรานสคอนดักแตนซ์จากกระบวนการสร้าง.....	27
ความไวของทหรานสคิวเซอร์ความดัน.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
2	วงจรถ้าเน็คความถี่.....	32
	หลักการของวงจรรอสซิลเลเตอร์.....	32
	วงจรรอสซิลเลเตอร์ใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET.....	33
	วงจรรินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET.....	33
	คุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราว (Transient Response).....	37
	เวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation delay time) หรือเวลาหน่วง.....	39
	CMOIS ริงออสซิลเลเตอร์.....	40
3	การออกแบบและการสร้าง CMOIS ริงออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมด้วยความดัน.....	43
	การออกแบบไดอะแฟรม.....	44
	การออกแบบวงจรรินเวอร์เตอร์บนไดอะแฟรม.....	45
	วงจรรินเวอร์เตอร์ที่มีทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นบนไดอะแฟรม.....	46
	วงจรรินเวอร์เตอร์ที่มีทรานซิสเตอร์ชนิดพีบนไดอะแฟรม.....	48
	การออกแบบริงออสซิลเลเตอร์บนไดอะแฟรม.....	49
	การวางตำแหน่งของทรานซิสเตอร์ของวงจรริงออสซิลเลเตอร์บนไดอะแฟรม...	51
	ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างวงจรถ้าเน็คความถี่ควบคุมด้วยความดัน.....	56
	การเก็บบรรจุ.....	76
4	การทดลองและผลการทดลอง.....	79
	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOIS บนไดอะแฟรม.....	81
	แรงดันซีดเริ่ม.....	81
	แรงดันพังทลาย.....	84
	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์.....	86
	ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณช่องทางเดินกระแส.....	88
	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มีทรานซิสเตอร์แบบ MOIS แยกวางบนไดอะแฟรมเมื่อมีความดันมากกระทำ.....	91
	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรถ้าเน็คความถี่ควบคุมด้วยความดัน โครงสร้างทรานซิสเตอร์ แบบ CMOIS.....	96

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
การทดลองและผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความถี่ ของวงจรกับความดันที่มากระทำบน ไดอะแฟรมบาง.....	98
การทดลองและผลการทดลองหาความไวของวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความ ดัน.....	105
5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	112
6 สรุปและวิจารณ์.....	119
บรรณานุกรม.....	122
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก การสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์.....	125
ภาคผนวก ข กระบวนการแพร่สารเจือ โบรอนและฟอสฟอรัส.....	126
ภาคผนวก ค กระบวนการแพร่สารเจือทองคำ.....	129
ภาคผนวก ง การกัดและเทคนิคการกัดแผ่นซิลิกอน.....	130
ประวัติผู้เขียน.....	133

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงความคล่องตัว และเกจเฟคเตอร์สำหรับซิลิกอน.....	22
2	แสดงการออกแบบวาง NMOISFET บนโคอะเฟรม.....	51
3	แสดงการออกแบบวาง PMOISFET บนโคอะเฟรม.....	52
4	แสดงการออกแบบวางอินเวอร์เตอร์ 1 ชุดของวงจรริงออสซิลเลเตอร์บนโคอะเฟรม.....	52



สารบัญญภาพ

	หน้า.
1 แสดง โครงสร้างของ MOISFET.....	1
2 แสดง โครงสร้างของ PMOISFET.....	3
3 แสดง การไปอิธของ PMOISFET.....	3
4 แสดง โครงสร้างของ NMOISFET.....	4
5 แสดง การไปอิธของ NMOISFET.....	4
6 แสดง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ NMOISFET.....	6
7 แสดง ภาพตัดขวางของ MOISFET ที่มี โครงสร้างอื่นแฝงอยู่ เมื่อพิจารณาแบบไฟตรง..	11
8 แสดง แบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET.....	12
9 แสดง ภาพตัดขวางของ MOISFET ที่มี โครงสร้างอื่นแฝงอยู่เมื่อพิจารณาแบบไฟสลับ	12
10 แสดง แบบจำลองทางไฟสลับของ MOISFET.....	13
11 แสดง (ก) พลังงาน E เป็นฟังก์ชันของโมเมนตัม p สำหรับหลักการพื้นฐาน (เส้น ประ) และเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น k ด้วยธรรมชาติของอนุภาค (ข) ส่วนที่แสดงค่า ที่เป็นไปได้ของแถบความนำ แถบต้องห้ามและแถบวาเลนซ์.....	15
12 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน (ก) ทิศทาง [100] (ข) ทิศทาง [111].....	17
13 แสดง constant-energy ellipsoids ใน k-space ใกล้จุดต่ำสุดในแถบความนำของ ซิลิกอน.....	17
14 แสดง (ก) การเปรียบเทียบในทิศทาง [100] ที่เวลลีย์ [100] พลังงานน้อยสุดเป็นส่วนที่ ต่ำสุดและที่เวลลีย์ [010] และเวลลีย์ [001] ส่วนที่ต่ำสุดถูกยกขึ้น อิเล็กตรอนจะไหล จากเวลลีย์ [010] และ [001] ไปยังเวลลีย์ [100] (ข) และ (ค) แสดงการยึดครองของ อิเล็กตรอนของแถบความนำเนื่องจากคาร์ไฮลของอิเล็กตรอน.....	20
15 แสดง แฟกเตอร์ P(N,T) ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์เบี่ยโซริชิสทีปที่อุณหภูมิห้อง ที่มีการคูณ เพื่อให้ได้แกแพคเตอร์ที่อุณหภูมิ T และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (donor) N ใน ซิลิกอนชนิดเอ็น ดังที่คำนวณ โดย Kanda.....	20
16 แสดง แกแพคเตอร์ของซิลิกอนชนิดพี เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มข้นของ สารเจือ.....	22
17 แสดง ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง V_T กับความแตกต่างความดันของ PMOISFET	

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	23
18 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพ้งทลายกับความแตกต่างความดันของ PMOISFET(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	25
19 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุกับความแตกต่างความดันของ NMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	26
20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่าง $\Delta k'$ กับค่าความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ ΔP ของทรานซิสเตอร์ความดัน โดยที่มีทิศทางการไหลของกระแสแบบขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ก) แบบ PMOISFET (ข) แบบ NMOISFET.....	29
21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่าง k' กับค่าความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) ของทรานซิสเตอร์ความดัน โดยที่มีทิศทางการไหลของกระแสแบบตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ก)แบบ PMOISFET (ข) NMOISFET.....	29
22 แสดงวงจรพื้นฐานของวงจรริงออสซิลเลเตอร์.....	33
23 แสดงวงจรมอสอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ (ก) มอสอินเวอร์เตอร์แบบพีเชนแนล (ข) มอสอินเวอร์เตอร์แบบเอ็นเชนแนล (ค) มอสอินเวอร์เตอร์แบบซีมอส.....	34
24 แสดงคุณสมบัติโดยทั่ว ๆ ไป ระหว่างแรงดันอินพุทกับเอาต์พุทของมอสอินเวอร์เตอร์.....	34
25 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบMOISFET.....	35
26 แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราว (ก) การคิซาร์จ (ข) การชาร์จ.....	38
27 แสดงวงจรริงออสซิลเลเตอร์โครงสร้างแบบ CMOIS.....	40
28 แสดงรายละเอียดการกำหนดขนาดดันแบบของไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิกอนระนาบ (100)หรือตั้งฉากกับทิศทาง [110] ขนาดของดันแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้.....	44

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
29 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์.....	46
30 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำการแยกวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม..	47
31 แสดงภาพตัดขวางของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำการแยก NMOISFET วางไว้บนไดอะแฟรม.....	48
32 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำการแยกวาง PMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม...	48
33 แสดงภาพตัดขวางของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำการแยก PMOISFET วางไว้บนไดอะแฟรม.....	49
34 แสดงวงจรริงออสซิลเลเตอร์ โครงสร้างแบบ CMOIS.....	49
35 แสดงภาพตัดขวางของ NMOISFET และ PMOISFET ที่มีขั้วของทรานซิสเตอร์ต่อกันหนึ่งคู่	50
36 แสดงตัวอย่างต้นแบบของวงจรกำเนิดความถี่แบบ 5 stages ที่ควบคุมด้วยความดันอากาศโดยทำการวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) วาง NMOISFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) วาง NMOISFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม(ค) วาง NMOISFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ง) วาง NMOISFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	53
37 แสดงตัวอย่างต้นแบบของวงจรกำเนิดความถี่แบบ 5 stage ที่ควบคุมด้วยความดันอากาศโดยทำการวาง PMOISFET บนไดอะแฟรม(ก) วาง PMOISFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) วาง PMOISFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ค) วาง PMOISFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ง) วาง PMOISFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	54
38 แสดงตัวอย่างต้นแบบของวงจรกำเนิดความถี่แบบ 5 stage ที่ควบคุมด้วยความดันอากาศโดยทำการวาง PMOISFET บนไดอะแฟรม(ก) วาง PMOISFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) วาง PMOISFET 5 ตัว ให้มี	

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

ทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของโคอะเฟรม (ค) วาง PMOISFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของโคอะเฟรม (ง) วาง PMOISFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของโคอะเฟรม.....	55
39 แสดงการออกแบบลวดลายคั่นแบบลงบนกระดาษกราฟไขว้.....	56
40 แสดงการตัดลวดลายคั่นแบบบนแผ่นพลาสติกมิลามेटด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์.....	57
41 แสดงคั่นแบบมาสก์เริ่มต้นใช้สำหรับกระบวนการสร้างโคอะเฟรม.....	57
42 แสดงคั่นแบบมาสก์ที่ 1 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพรสารเจือโบรอนสำหรับ PMOISFET.....	58
43 แสดงคั่นแบบมาสก์ที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพรสารเจือฟอสฟอรัสสำหรับ NMOISFET.....	58
44 แสดงคั่นแบบมาสก์ที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วนเกต.....	59
45 แสดงคั่นแบบมาสก์ที่ 4 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอลูมิเนียม.....	59
46 แสดงคั่นแบบมาสก์ที่ 5 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอลูมิเนียม.....	60
47 แสดงภาพถ่ายของกระจกคั่นแบบที่ใช้เป็นโฟโตมาสก์.....	60
48 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มแรก.....	64
49 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก.....	65
50 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นคอนที่ 7.....	67
51 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นคอนที่ 11.....	68
52 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นคอนที่ 19.....	69
53 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นคอนที่ 27.....	70
54 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นคอนที่ 32.....	71
55 แสดงภาพตัดขวาง ของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านชั้นคอนที่ 44	73
56 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของวงจรกำเนิคความถี่ ที่สร้างเสร็จแล้ว (ก) แบบ 5 สถานะที่มี NMOISFET 1 ตัวอยู่บนโคอะเฟรม (ข) แบบ 7 สถานะที่มี PMOISFET 1 ตัวอยู่บนโค อะเฟรม.....	74
57 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของวงจรกำเนิคความถี่ 9 สถานะ ที่สร้างเสร็จแล้วแบบที่ทำการ วาง NMOISFET 9 ตัว และ PMOISFET 9 ตัว ไว้บนโคอะเฟรม.....	75

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
58 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของวงจรกำเนิดความถี่ 9 สถานะ ที่สร้างเสร็จแล้ว โดยที่ทำการวางวงจรถืออินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ไว้บนไดอะแฟรม.....	75 74
59 แสดงภาพถ่ายชิปวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดัน ที่ติดอยู่บนตัวถังโลหะแบบ TO-5 พร้อมทั้งต่อสายระหว่างขั้วสัมผัสโลหะของอุปกรณ์กับขาโลหะของฐานรอง.....	75
60 ภาพตัดขวางแสดงการเก็บบรรจุชิปวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดัน ด้วยตัวถังโลหะแบบ TO-5.....	78
61 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์กำเนิดความถี่ ที่ควบคุมด้วยความดัน โดยใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS ที่เก็บบรรจุเรียบร้อยแล้ว.....	78
62 ภาพถ่ายแสดงการทดสอบ MOISFET ด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ Hewlett packard.....	79
63 แผนผังแสดงชุดการทดลอง.....	80
64 ภาพถ่ายแสดงชุดการทดลอง.....	80
65 แสดงวงจรถ่ายค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ โครงสร้าง MOISFET (ก) PMOISFET (ข) NMOISFET.....	82
66 แสดงผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ โครงสร้าง MOISFET (ก) PMOISFET (ข) NMOISFET.....	83
67 แสดงวงจรถ่ายวัดค่าแรงดันฟังก์ชันของ PMOISFET.....	84
68 แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าแรงดันฟังก์ชันของ PMOISFET.....	84
69 แสดงวงจรถ่ายวัดค่าแรงดันฟังก์ชันของ NMOISFET	85
70 แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าแรงดันฟังก์ชันของ PMOISFET.....	85
71 แสดงวงจรถ่ายวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ PMOISFET.....	86
72 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบค่ากระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ PMOISFET	86
73 แสดงวงจรถ่ายวัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET.....	87
74 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบค่ากระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ NMOISFET.....	87
75 แสดงวงจรถ่ายสมมูลของ MOISFET ที่มี C_{ox} แฝงอยู่ (ก) PMOISFET (ข) NMOISFET..	89
76 แสดงวงจรถ่ายวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ MOISFET (ก) สำหรับทดสอบ PMOISFET (ข) สำหรับทดสอบ NMOISFET.....	89

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
77 แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ PMOISFET	90
78 แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ NMOISFET.....	90
79 แสดงวงจรรินเวอร์เตอร์.....	91
80 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ t_{LH} (Δt_{LH}) กับความดัน ที่เปลี่ยนแปลงของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มี PMOISFET แยกวางบนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข)เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของ ไดอะแฟรม.....	92
81 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ t_{PLH} (Δt_{PLH}) กับความดัน ที่ เปลี่ยนแปลงไปของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มี PMOISFET แยกวางบนไดอะแฟรม (ก) เมื่อ กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข)เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของได อะแฟรม.....	93
82 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ t_{HL} (Δt_{HL}) กับความดัน ที่ เปลี่ยนแปลงไปของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มี NMOISFET แยกวางบนไดอะแฟรม (ก) เมื่อ กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข)เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของได อะแฟรม.....	94
83 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ t_{PHL} (Δt_{PHL}) กับความดันที่ เปลี่ยนแปลงไปของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มี NMOISFET แยกวางบนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบ ของไดอะแฟรม.....	95
84 แสดงลักษณะของสัญญาณขาออกของวงจรรำเนิดความถี่.....	96
85 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟเลี้ยงกับความถี่ที่ได้จากวงจร และแสดง ค่า จำนวนสถานะของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่ประกอบเป็นวงจรริงออสซิลเลเตอร์.....	97
86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟเลี้ยงกับค่าแรงดันของขาออกของ วงจรริง ออสซิลเลเตอร์.....	97
87 แสดงผลการทดลองเมื่อวางทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET จำนวน 1 ตัวของวงจรร ริงออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะโดยให้ทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของ ไดอะแฟรม.....	99

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
88 แสดงผลการทดลองเมื่อวางทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET จำนวนทั้งหมดของวงจร ริงออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะให้อยู่บนไดอะแฟรมโดยให้ทิศทางการไหลของกระแส ขนานกับขอบของไดอะแฟรม.....	99
89 แสดงผลการทดลองเมื่อวางทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET จำนวน 1 ตัวของวงจร ริงออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะโดยให้ทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของ ไดอะแฟรม.....	100
90 แสดงผลการทดลองเมื่อวางทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET จำนวนทั้งหมด ของ วงจรริงออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะให้อยู่บนไดอะแฟรมโดยให้ทิศทาง การไหล ของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	100
91 แสดงผลการทดลองเมื่อวางทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET จำนวน 1 ตัวของวงจร ริงออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะโดยให้ทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของ ไดอะแฟรม.....	101
92 แสดงผลการทดลองเมื่อวางทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET จำนวนทั้งหมด ของวงจร ริงออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะให้อยู่บนไดอะแฟรมโดยให้ทิศทาง การไหลของ กระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม.....	101
93 แสดงผลการทดลองเมื่อวางทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET จำนวน 1 ตัวของวงจรริง ออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะโดยให้ทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉาก กับขอบของได อะแฟรม.....	102
94 แสดงผลการทดลองเมื่อวางทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET จำนวนทั้งหมดของวงจร ริงออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะให้อยู่บนไดอะแฟรม โดยให้ทิศทางการไหลของกระแส ตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	102
95 แสดงผลการทดลอง เมื่อวางอินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ของวงจรออสซิลเลเตอร์ ไว้บนได อะแฟรมโดยให้ PMOISFET และ NMOISFET มีกระแสไหลขนานเมื่อเทียบกับขอบ ของไดอะแฟรม.....	103
96 แสดงผลการทดลอง เมื่อวางอินเวอร์เตอร์ 1 ชุดของวงจรออสซิลเลเตอร์ไว้บนไดอะ แฟรมโดยให้ PMOISFET และ NMOISFET มีกระแสไหลตั้งฉากเมื่อเทียบกับขอบของ ไดอะแฟรม.....	103

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
97 แสดงผลการทดลองเมื่อวางอินเวอร์เตอร์ 1 ชุดของวงจรรอสวิตเลเตอร์ไว้บนไดอะแฟรม โดยให้ PMOSFET มีกระแสไหลขนานและ NMOISFET มีกระแสไหลตั้งฉากเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรม.....	104
98 แสดงผลการทดลองเมื่อวางอินเวอร์เตอร์ 1 ชุดของวงจรรอสวิตเลเตอร์ไว้บนไดอะแฟรม โดยให้ PMOSFET มีกระแสไหลตั้งฉากและ NMOISFET มีกระแสไหลขนานเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรม.....	104
99 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับ จำนวนสถานะของวงจรรอสวิตเลเตอร์ เมื่อทำการวาง PMOSFET จำนวน 1 ตัวบนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม.....	105
100 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรรอสวิตเลเตอร์ เมื่อทำการวาง NMOISFET จำนวน 1 ตัวบนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม.....	106
101 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรรอสวิตเลเตอร์ เมื่อทำการวาง PMOSFET จำนวนทั้งหมดบนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม.....	107
102 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรรอสวิตเลเตอร์ เมื่อทำการวาง NMOISFET จำนวนทั้งหมดบนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม.....	107
103 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรรอสวิตเลเตอร์ เมื่อทำการวาง PMOSFET จำนวน 1 ตัว บนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	108
104 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรรอสวิตเลเตอร์ เมื่อทำการวาง NMOISFET จำนวน 1 ตัว บนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	109
105 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรรอสวิตเลเตอร์เมื่อทำการวาง PMOSFET จำนวนทั้งหมดบนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม.....	110

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
106 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับ จำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ เมื่อทำการวาง NMOISFET จำนวนทั้งหมดบนโคอะแฟรม โดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของโคอะแฟรม.....	110
107 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ เมื่อทำการแยกวางวงจรรินเวอร์เตอร์ 1 ชุด บนโคอะแฟรม โดยที่ PMOISFET และ NMOISFET มีทิศทางการไหลของกระแสแบบต่างๆ.....	111
108 แสดงความสัมพันธ์ของค่า Δf_p กับค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรรินเวอร์เตอร์ (ก)แยกวาง PMOISFET ให้ทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของโคอะแฟรม (ข)แยกวาง PMOISFET ให้ทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของโคอะแฟรม (ค) แยกวาง NMOISFET ให้ทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของโคอะแฟรม (ง)แยกวาง NMOISFET ให้ทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของโคอะแฟรม.....	115
109 แสดงความหนาออกไซด์ (X_o) กับเวลา (t_o) และอุณหภูมิ (T) ในการทำออกซิเดชัน.....	125
110 แสดงค่า solid solubility ของสารเจือในซิลิกอน (ความเข้มข้นสารเจือสูงสุด, C_{Bmax} ที่อุณหภูมิ T ใดๆ).....	127
111 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือในซิลิกอน.....	128
112 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองคำในสถานะอิ่มตัว (C_{Au}) กับความเข้มข้นของสารเจือ Background (C_B) และ อุณหภูมิในการแพร่ทองคำ (T).....	129
113 แสดงภาพตัดขวางของหลุมที่ถูกกัด (ก) หลุมภาพด้วย (ข) หลุมภาพด้วยวี ซึ่งความกว้างของพื้นหลุมจะหาได้จากสมการ.....	130
114 แสดงเทคนิคการควบคุมความหนาด้วยร่องด้วยวี.....	131
115 แสดงแผนภูมิการกัด.....	132

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_{cl}	อัตราขยายรอบรูปป้อนกลับปิด	-
a	ค่าคงที่แลททิซ	อังสตรอม (\AA)
B	ค่าลดทอนของวงจรป้อนกลับ	-
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	ความหนาของไดอะแฟรม	ไมโครเมตร (μm)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่	เซนติเมตรกำลังสองต่อวินาที (cm^2/s)
E_C	พลังงานแถบความนำ	อิเล็กตรอน โวลต์ (eV)
E_F	พลังงานระดับเฟอร์มิ	อิเล็กตรอน โวลต์ (eV)
E_G	พลังงานแถบต้องห้าม	อิเล็กตรอน โวลต์ (eV)
E_i	พลังงานระดับอินทรินซิก	อิเล็กตรอน โวลต์ (eV)
E_v	พลังงานแถบวาเลนซ์	อิเล็กตรอน โวลต์ (eV)
f	ค่าความถี่	เฮิรตซ์
h	ค่าคงตัวของพลังค์	จูล-วินาที (J.s)
I_{DS}	กระแสแคปรน	แอมแปร์ (A)
k	เวฟนัมเบอร์	ต่อเมตร (m^{-1})
l	ขนาดของไดอะแฟรม	ไมโครเมตร (μm)
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส	ไมโครเมตร (μm)
m^*	มวลยังผล	กิโลกรัม (Kg)
m_x	มวลยังผลตามยาว	กิโลกรัม (Kg)
m_y	มวลยังผลตามขวาง	กิโลกรัม (Kg)
n_i	ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^{-3})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 XIX
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P	ความดัน	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm ²)
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	คูลอมบ์ (C)
Q _{ss}	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง ซิลิกอนกับซิลิกอนไดออกไซด์	คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร (C/cm ²)
T	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส (°C)
T _{ox}	ความหนาของเกตออกไซด์	อังสตรอม (Å)
t	เวลา	วินาที (s)
t _{HL}	เวลา fall time	วินาที (s)
t _{LH}	เวลา rise time	วินาที (s)
t _p	เวลาหน่วง (propagation delay time)	วินาที (s)
V	ศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไบอัส	โวลต์ (V)
V _{BV}	แรงดันพังทลาย	โวลต์ (V)
V _{DD}	แรงดันไบอัสภายนอก	โวลต์ (V)
V _{DS}	แรงดันแควน-ซอส	โวลต์ (V)
V _{GS}	แรงดันเกต-แควน	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)
β _n	ค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น	(A/V ²)
β _p	ค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ชนิดพี	(A/V ²)
K	เกจเฟคเตอร์	-
k'	ค่าทรานคอนคักแดนซ์ของกระบวนการสร้าง	A/V ²
ε _o	ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ	F/cm
ε _{ox}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์	-
ε _s	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ_{si}	ค่าเพอร์มิติวิตีของซิลิกอน	F/cm
ρ	สภาพต้านทาน	$\Omega\text{-cm}$
ρ_s	ความต้านทานแผ่น	Ω/\square
μ	ความคล่องตัวของพาหะ	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
μ_{\parallel}	ค่าความคล่องตัวตามแกนยาวของอิลิปซอยด์	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
μ_{\perp}	ค่าความคล่องตัวตามแกนสั้นของอิลิปซอยด์	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
μ_{nAu}	ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในซิลิกอนที่ เต็มอะตอมทองคำ	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
μ_{pAu}	ค่าความคล่องตัวของโฮลในซิลิกอนที่ เต็มอะตอมทองคำ	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
π_{\parallel}	สัมประสิทธิ์เปียโซโซริซีสที่ปคามยาว	cm^2/dyn
π_{\perp}	สัมประสิทธิ์เปียโซโซริซีสที่ปคามขวาง	cm^2/dyn
$\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$	สัมประสิทธิ์เปียโซโซริซีสที่ป	cm^2/dyn
σ	สภาพความนำ	$(\Omega\text{-cm})^{-1}$
σ'	ความเค้นไคเมนชั้นเลต	-
σ''_{\parallel}	ความเค้นขนาน	N/m^2
σ'_{\perp}	ความเค้นตั้งฉาก	N/m^2
τ	เวลาอิสระเฉลี่ย	วินาที(s)
ΔR	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง	โอห์ม (Ω)
$(\Delta R/R)$	อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน	-
$(\Delta R/R)_{\parallel}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้าน ทานในแนวรัศมี	-
$(\Delta R/R)_{\perp}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้าน ทานในแนวตั้งฉาก	-
$\Delta k'$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลง	A/V^2
$(\Delta k'/k')$	อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าทรานสคอนดักแตนซ์	-
Δf	ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลง	เฮิรตซ์
$\Delta f/f$	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความถี่	-

คำนำ

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาไปมากซึ่งมีบทบาทในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มากมายดังนั้นในการวัดปริมาณต่าง ๆ เช่น ความขรุขระของพื้นผิว น้ำหนัก อัตราการไหล อัตราเร่ง แรงบิด ความเค้น การสั่นสะเทือน และความดัน นี้ ได้ใช้อุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิกอน โดยอาศัยปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีป (piezoresistive effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อมีความเค้นมากระทำจะทำให้เกิดความต้านทานของเนื้อสารเปลี่ยนไป

อุปกรณ์วัดแรงดันที่ใช้ในทางการแพทย์และทางอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่เป็นทรานสดิวเซอร์ความดันแบบพาสซีฟแทบทั้งสิ้น ดังนั้นในปี พ.ศ.2538 ได้มีการศึกษา วิจัย และสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันแบบใหม่ขึ้นมา คือ ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET^[1] ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดความดันแบบแอคทีฟชนิดแรก โดยอาศัยกระบวนการสร้างภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ ดังนั้นทรานสดิวเซอร์ชนิดใหม่จึงมีความไวสูงกว่าทรานสดิวเซอร์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้

ทรานสดิวเซอร์ความดันที่ใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET^[1] นี้มีข้อดีคือสามารถสร้างทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีได้บนฐานรองเดียวกัน^[2] ทำให้ประหยัดพื้นที่ซึ่งในเทคโนโลยีเดียวกัน สามารถสร้างวงจรรวมที่มีความหนาแน่นได้มากกว่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการพัฒนาทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ให้เป็นอุปกรณ์วัดความดันแบบวงจรรวม โดยวงจรรวมที่ใช้คือวงจรริงออสซิลเลเตอร์หรือวงจรถ้าเนคความถี่ซึ่งทำการศึกษา และสร้างโดยอาศัยกระบวนการสร้างภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ตัวนี้จะเป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่ที่ยังไม่เคยมีใครศึกษาและทำการสร้าง จึงเป็นอีกก้าวหนึ่งของการพัฒนาอุปกรณ์วัดความดัน

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการวิจัย วงจรถ้าเนคความถี่ควบคุมด้วยแรงดันอากาศโดยใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS โดยเริ่มต้นจากการศึกษาทางทฤษฎี การออกแบบกระบวนการสร้าง การสร้างเป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์ การทดลอง และบทสรุป รายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยสามารถสรุปได้เป็นบทดังนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ MOISFET โดยใช้โครงสร้างของ MOISFET ทั้งชนิดพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด และชนิดเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด คุณสมบัติการทำงานของ MOISFET แบบจำลองของ MOISFET จากนั้นจะทำการศึกษาปรากฏการณ์เพียโซรี

ซึ่งศึกษาจากโครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน ปฏิกิริยาเคมีของซิลิกอน ปฏิกิริยาเคมีของซิลิกอน ในซิลิกอนชนิดอื่นและชนิดพี ศึกษาความเค้นและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีปในซิลิกอน และสุดท้ายศึกษาผลของปฏิกิริยาเคมีของซิลิกอนต่อพารามิเตอร์ของ MOISFET

บทที่ 2 เริ่มแรกจะทำการศึกษาหลักการและพื้นฐานของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ จากนั้นจะกล่าวถึงทฤษฎีของวงจรรินเวอร์เตอร์ จากนั้นจะกล่าวถึงทฤษฎีของวงจรริงออสซิลเลเตอร์

บทที่ 3 เป็นการออกแบบและการสร้างประกอบด้วย การออกแบบหาเงื่อนไขของจำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ ที่วางบนไดอะแฟรมอย่างเหมาะสม จากนั้นจะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง สุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการแอสเซมบลี และการเก็บบรรจุ

บทที่ 4 นำเสนอการทดลองและผลการทดลอง คือการหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ค่าแรงดันพังทลาย ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ของกระบวนการสร้าง ค่าความไวและค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่วนเกต จากนั้นทำการศึกษาวงจรรินเวอร์เตอร์โครงสร้าง CMOIS ที่มี MOISFET วางบนไดอะแฟรม ซึ่งเมื่อความดันเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ค่าเวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราวของวงจรรินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย และสุดท้ายจะกล่าวถึงผลการทดลองการหาค่าความถี่ของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความดันมากระทำบนไดอะแฟรมบาง

บทที่ 5 เป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ทฤษฎีบทที่ 1, 2 มาใช้อธิบายผลการทดลองในบทที่ 4

บทที่ 6 บทสรุปผลการทดลองที่ทำมาทั้งหมด เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด

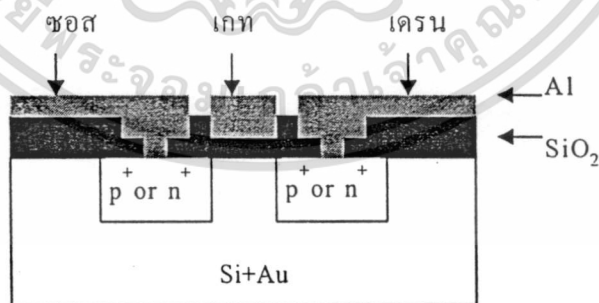
บทที่ 1

ทรานซิสเตอร์วัดความดันโครงสร้างแบบ MOISFET

โครงสร้างและหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOISFET

โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ MOISFET^[1] (Metal Oxide Intrinsic Semiconductor Field Effect Transistor) แสดงได้ดังภาพที่ 1 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ชั้น คือ ชั้นฐานรองจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นระนาบ (100) ที่ทำการเติมอะตอมทองคำอย่างเหมาะสม ชั้นที่ 2 คือ ชั้นของฉนวน ซึ่งในเทคโนโลยีที่ใช้ซิลิกอนในการผลิต มักนิยมใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวน และชั้นโลหะตัวนำจะเป็นชั้นสุดท้ายซึ่งจะใช้โลหะอลูมิเนียม อะตอมทองคำที่เติมที่ชั้นฐานรองนี้จะทำหน้าที่จับประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุส่วนมากในเนื้อสาร ทำให้เกิดความต้านทานในชั้นฐานรองมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ อะตอมทองคำยังทำให้อิเล็กตรอนในเนื้อสารมีค่าระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ที่ระดับ 0.62 eV เทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำอย่างเหมาะสมจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายสารกึ่งตัวนำปริสทรีได้

ภาพที่ 1



แสดงโครงสร้างของ MOISFET

นอกจากลักษณะโครงสร้างของ MOISFET กับ MOSFET มีลักษณะเหมือนกันแล้วลักษณะการทำงานยังเหมือนกันอีกด้วย กล่าวคือการทำงานของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOIS จะอาศัยผลของสนามไฟฟ้าเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแสขึ้น โดยถ้าต้องการให้ช่องทางเดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสมีประจุโฮลในการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOSFET) กระทำโดยการป้อนค่าแรงดันลบเมื่อเทียบกับฐานรอง ในบริเวณที่เป็นส่วนของโลหะด้านบนสุด ประจุลบบริเวณโลหะจะเหนี่ยวนำประจุโฮลในเนื้อสารซิลิกอนชนิดเอ็นที่เดิมอะตอมทองคำให้ขึ้นมาอยู่บริเวณรอยต่อสารกึ่งตัวนำและฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ แต่ถ้าต้องการให้ทางเดินกระแสเป็นประจุอิเล็กตรอน ในการนำกระแสของ NMOISFET จะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง เข้าไปที่โลหะด้านบนซึ่งประจุบวกที่ชั้นโลหะจะเหนี่ยวนำประจุอิเล็กตรอนในชั้นฐานรองให้ขึ้นมาอยู่ที่บริเวณรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์

จากที่กล่าวมาพบว่าปรากฏการณ์การเกิดประจุพหุของทรานซิสเตอร์ โครงสร้าง MOISFET ใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมปริมาณประจุพหุ ดังนั้นโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOISFET จึงเป็นโครงสร้างที่มีข้อดีเช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOSFET คือ

1. มีค่าความต้านทานขาเข้าของทรานซิสเตอร์สูงมากเนื่องจากโครงสร้างของส่วนควบคุมการนำกระแสจะถูกกั้นด้วยชั้นฉนวนไดออกไซด์
2. ขาเดรนและขาซอสสามารถสลับกันได้ โดยการทำงานของทรานซิสเตอร์ยังคงไม่แตกต่างกันเนื่องจากเป็นโครงสร้างแบบสมมาตร (Bilaterally Symetric)
3. ไม่เกิดปรากฏการณ์วิ่งหนีความร้อน (Thermal Runaway) ภายในอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก
4. ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างซอสและฐานรอง
5. ประหยัดพื้นที่ในการสร้างเพราะสามารถสร้างทั้ง PMOSFET และ NMOISFET บนฐานรองเดียวกัน โดยไม่ต้องมีบ่อแยก
6. ค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ MOISFET มีค่าน้อยกว่าใน MOSFET^{[3][4]}

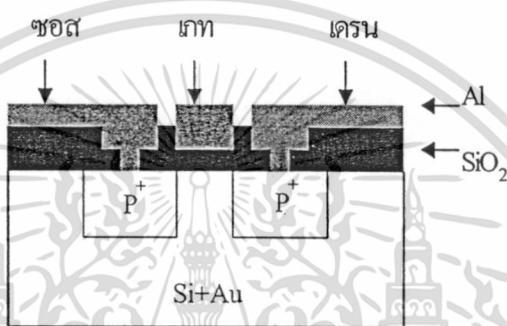
ทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (PMOSFET)

การสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด สามารถสร้างได้โดยเติมอะตอมสารเจือชนิดพีเพื่อสร้างเป็นขั้วซอสและเดรนของทรานซิสเตอร์ชนิดพี ลงบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น โดยให้ได้ค่าความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีมีค่าประมาณ 10^{15} ถึง 10^{16} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากนั้นจึงเติมสารเจือทองคำเข้าไปที่ฐานรอง โดยมีโครงสร้างภาพตัดขวางแสดงดังภาพที่ 2

จากรูปของโครงสร้างจะประกอบด้วยขั้วเดรนและซอสซึ่งจะเลือกขั้วใดเป็นขั้วเดรนหรือขั้วซอสก็ได้ และขั้วเกตออกไซด์ การใช้งานจะกระทำโดยป้อนศักดาไฟฟ้าลบรองที่ขั้วเกตเมื่อเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาเบไซบระเยชนดานการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

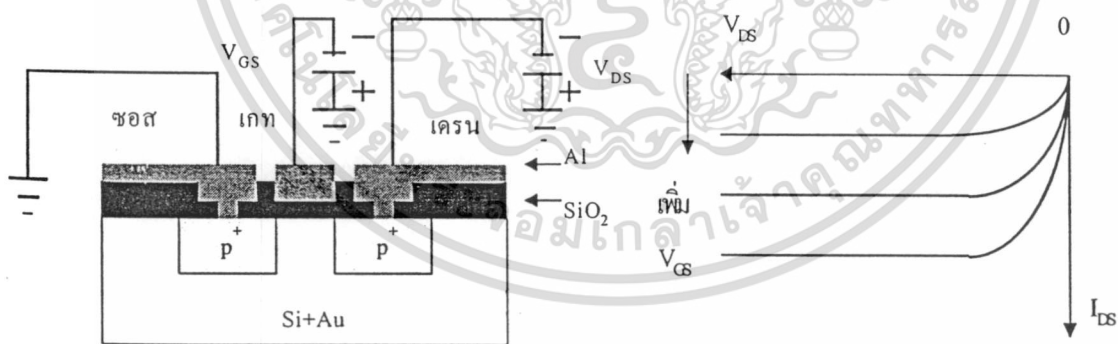
กับฐานรองที่ขั้วเกต ทำให้ประจุโฮลถูกเหนี่ยวนำให้ขึ้นมาอยู่ในช่องทางเดินกระแสทำให้เกิดช่องทางเดินกระแสขึ้นมา ถ้าศักดาไฟฟ้าที่เดรนมีค่าต่ำกว่าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วซอสก็จะเกิดกระแสโฮลไหลจากขั้วเดรนไปขั้วซอสได้ ซึ่งการทำงานแบบนี้จะเป็นแบบพีแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3

ภาพที่ 2



แสดง โครงสร้างของ PMOSFET

ภาพที่ 3



แสดงการ ไปอัสของ PMOSFET

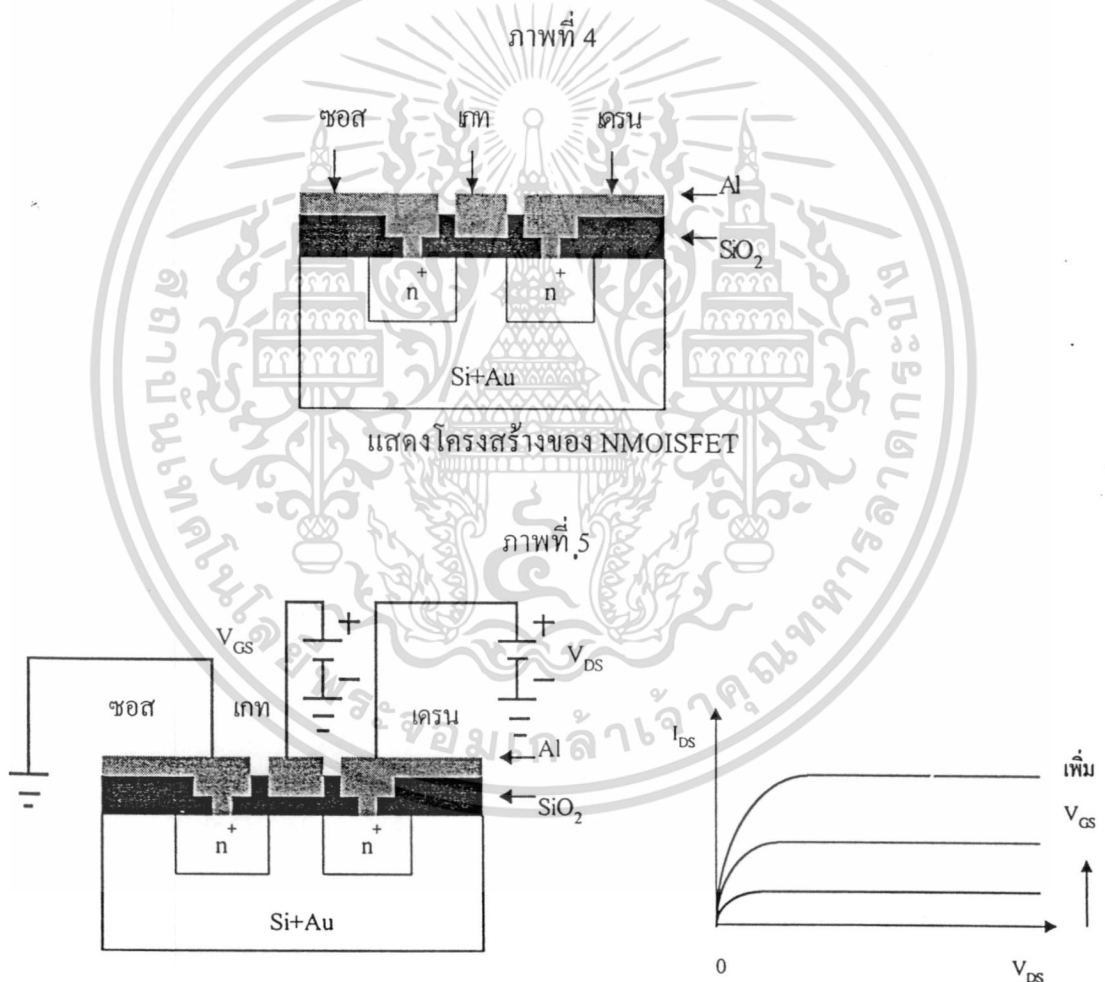
ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (NMOISFET)

การสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด สามารถสร้างได้โดยเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เพื่อสร้างเป็นขั้วซอสและเดรนของทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นลงบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น โดยให้ได้ค่าความเข้มข้นของสารเจือชนิดเอ็นมีค่าประมาณ 10^{15} ถึง 10^{16} อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากนั้นจึงเติมสารเจือของค่าเข้าไปที่ฐานรอง โครงสร้างภาพตัดขวาง แสดงดังในภาพที่ 4

จากรูปของโครงสร้างจะพบว่าทรานซิสเตอร์ NMOISFET มีขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ เช่นเดียวกับ ทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET แต่การใช้งานจะเป็นไปในทางตรงกันข้ามกล่าวคือ ป้อนศักดา ไฟฟ้าบวกเมื่อที่ขั้วเกตเทียบกับฐานรอง จะทำให้อิเล็กตรอนมาทำให้เกิดช่องทางเดินกระแสขึ้น มา ถ้าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วเดรนมีค่าสูงกว่าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วซอสก็จะเกิดกระแสอิเล็กตรอนไหลจากขั้ว ซอสไปขั้วเดรนได้ การทำงานแบบนี้จะเป็นแบบเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ซึ่งแสดงได้ดัง ภาพที่ 5



แสดงการไบอัสของ NMOISFET

คุณสมบัติกระแสและแรงดันของ MOISFET

การพิจารณาคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะ NMOISFET เท่านั้น ส่วน PMOISFET นั้นจะมีคุณสมบัติการทำงานในลักษณะเดียวกันแต่เครื่องหมายและทิศทางการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นตรงกันข้าม สมการกระแสและแรงดันของ MOISFET จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับสมการกระแสและแรงดันของ MOSFET

การทำงานของ MOISFET นั้น สามารถพิจารณาการทำงานออกได้เป็น 3 ช่วงการทำงาน โดยพิจารณาจากค่าแรงดันคั่นคร่อมขั้วเกตกับขั้วซอส (V_{GS}) ค่าแรงดันคั่นคร่อมขั้วเดรนและขั้วซอส (V_{DS}) และค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ซึ่งลักษณะการไบอัสเป็นไปดังภาพที่ 5 ซึ่งจะแบ่งได้ดังนี้

1. ช่วงที่ MOISFET ไม่ทำงาน (Cutoff Region)

การทำงานของ MOISFET ในช่วงเวลานี้เกิดขึ้นเนื่องจากค่าแรงดันคั่นคร่อมขั้วเกตและขั้วซอสมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นจึงไม่สามารถเหนี่ยวนำประจุในช่องทางเดินกระแสให้ขึ้นมาอยู่บริเวณช่องทางเดินกระแสได้ จึงไม่เกิดการไหลของกระแสจากขั้วเดรนไปยังขั้วซอสได้ถึงแม้ว่าจะจ่ายศักดาไบอัสที่ขั้วเดรนและซอสไปแล้วก็ตาม ดังนั้นสมการการไหลของกระแสจะเป็นดังนี้

$$I_{DS} = 0; V_{GS} < V_T \quad (1.1)$$

2. ช่วงที่ MOISFET ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัว (Nonsaturated Region)

การทำงานในช่วงนี้บางครั้งอาจเรียกว่าการทำงานในช่วงเชิงเส้น (Linear Region) จะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายศักดาไบอัสให้ค่าแรงดันคั่นคร่อมขั้วเดรนและซอสน้อยกว่าค่าแรงดันคั่นคร่อมขั้วเกตกับขั้วซอสลบด้วยค่าแรงดันขีดเริ่มหรือคือ $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ การไหลของกระแสของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นกับ V_{DS} ที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีสมการการไหลของกระแสเป็นดังนี้

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad ; V_{DS} < V_{GS} - V_T \quad (1.2)$$

โดยที่ตัวแปรค่าต่าง ๆ มีค่าดังต่อไปนี้คือ

I_{DS} คือค่ากระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์ MOISFET

β คือค่า devices transconductance parameter มีค่า = $k'(w/L)$

k' คือค่า process transconductance parameter มีค่า = $\mu_{AU} \cdot C_{OX}$

μ_{AU} คือค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ใช้ในการนำกระแสของ MOISFET

C_{OX} คือค่าความจุไฟฟ้าที่เกตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ มีค่า = ϵ_{OX}/T_{OX}

ϵ_{OX} มีค่า $3.9\epsilon_0$ โดยที่ 3.9 เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ_0 เป็นค่าสภาพยอมของสูญญากาศ (Permittivity of free space) มีค่า $8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$

T_{ox} คือค่าความหนาของชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ที่บริเวณช่องทางเดินกระแสของ MOISFET

W คือค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแสของ MOISFET

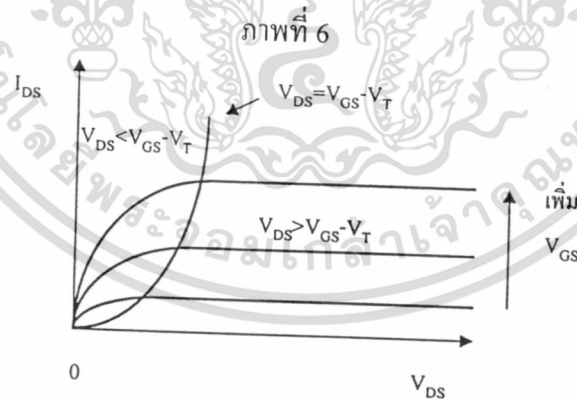
L คือค่าความยาวของช่องทางเดินกระแสของ MOISFET

3. ช่วงที่ MOISFET ทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturated Region)

การทำงานในช่วงนี้จะเกิดขึ้นเมื่อค่าแรงดันคร่อมขั้วเดรนกับขั้วซอร์สมีค่ามากกว่าค่าแรงดันคร่อมเกตกับขั้วซอร์สด้วยค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ ช่วงนี้ปริมาณของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่ตลอดเวลาแม้ว่าแรงดัน V_{DS} จะเพิ่มขึ้น ค่ากระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่ ที่ค่าแรงดันตั้งแต่ $V_{DS} = (V_{GS} - V_T)$ ดังนั้นจึงเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอิ่มตัว ซึ่งมีสมการการไหลของกระแสเป็นดังนี้

$$I_{DS} = \left(\frac{\beta}{2}\right)[V_{GS} - V_T]^2 \quad ; \quad V_{DS} \geq V_{GS} - V_T \quad (1.3)$$

ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันเป็นไปดังภาพที่ 6



แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันขั้วเริ่มและแรงดันพังทลายของ MOISFET

แรงดันขั้วเริ่ม (V_T)

แรงดันขั้วเริ่ม (V_T) คือแรงดันที่ให้ไบอัสที่เกตเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับ (inversion layer) พอดี โดยแรงดันที่ป้อนให้ที่เกตนี้จะเพียงพอที่จะเอาชนะฟังก์ชันงาน (Work function) ต่าง ๆ ได้ คุณสมบัติความสัมพันธ์ของแรงดันขั้วเริ่มเป็นดังนี้

$$V_T = V_{FB} + \phi_F + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{si} N_A(\phi_F)} \tag{1.4}$$

โดยที่ V_{FB} คือ แรงดันแถบราบ (flat band voltage)
 C_{ox} คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่เกตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
 ϵ_{si} มีค่า $11.7\epsilon_0$
 q มีค่า 1.6×10^{-19} คุลอมบ์ (C)
 N_A คือจำนวนประจุในฐานรอง (ประจุที่ใช้ในการนำกระแสของ MOISFET ที่กำลังพิจารณาอยู่)
 ϕ_F คือค่าพลังงานจากระดับพลังงานของฐานรองถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนหรือโฮลที่กำลังนำกระแสอยู่

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{1}{C_{ox}} (Q_{ox} + Q_{ss}) \tag{1.5}$$

$$\phi_{MS} = \phi_M - \phi_S \tag{1.6}$$

โดยที่ ϕ_{MS} คือฟังก์ชันงานระหว่างเกตโลหะกับชั้นซิลิกอน
 ϕ_M คือความต่างศักรีระหว่างขบถ่างของแถบความนำซิลิกอนไดออกไซด์กับระดับพลังงานเฟอร์มิของเกตโลหะ (ในที่นี้เป็นอลูมิเนียม) จะมีค่า 3.2 V
 ϕ_S คือความต่างศักรีระหว่างขบถ่างของแถบความนำซิลิกอนไดออกไซด์ กับระดับพลังงานเฟอร์มิในชั้นซิลิกอน

$$\phi_s = \phi_{so} + \left(\frac{E_g}{2} + \phi_F\right) \tag{1.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ_{so} คือความต่างศักย์ระหว่างขอบของแถบความนำซิลิกอนไดออกไซด์กับขอบของแถบความนำซิลิกอน มีค่า 3.25 V

E_g คือความกว้างของระดับพลังงานในแถบต้องห้ามของซิลิกอนมีค่า 1.1 eV ที่อุณหภูมิ 300 K

$$\phi_{Fe} = E_{Fe} - 0.62 \quad (1.8)$$

$$\phi_{Fn} = 0.62 - E_{Fn} \quad (1.9)$$

$$E_{Fe} = E_c - KT \ln(N_c/N_e) \quad (1.10)$$

$$E_{Fn} = E_v - KT \ln(N_v/N_h) \quad (1.11)$$

โดยที่ E_c และ E_v คือค่าระดับพลังงานของชั้นแถบความนำ (Conduction band) และชั้นแถบวาเลนซ์ (Valence band) ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนมีค่า 1.12 eV และ 0 eV ตามลำดับ

K คือค่าคงที่ของ โบสมาตันมีค่า 1.38×10^{-23} J/K

T คือ ค่าของอุณหภูมิ (K)

N_c และ N_v คือปริมาณประจุที่อยู่ในชั้นแถบความนำ และชั้นแถบวาเลนซ์ตามลำดับ โดยทั่วๆ ไปในแผ่นซิลิกอนจะมีปริมาณ 2.9×10^{19} และ 1.04×10^{19} ประจุตามลำดับ

$$N_c = (\rho q \mu_{nAU})^{-1} \quad (1.12)$$

$$N_h = \frac{n_i^2}{N_c} \quad (1.13)$$

โดยที่ N_c และ N_h คือค่าปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอน และ โฮลในเนื้อสารตามลำดับ

ρ คือ ค่าพิถักความต้านทานของชั้นสาร

μ_{nAU} คือค่าความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน ในเนื้อสารซิลิกอนชนิดเอ็นที่เต็มอะตอมทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n_i คือปริมาณประจุพาหะอิเล็กตรอน หรือโฮลในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ มีค่า 1.45×10^{10} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ⁽⁴⁾⁽⁵⁾

แรงดันพังทลาย (V_{BV}) เป็นการแสดงถึงความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด ในการใช้งานกับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ เมื่อเกิดแรงดันพังทลายขึ้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก ไหลผ่านรอยต่อจนไม่สามารถควบคุมได้และจะเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ได้ โดยทั่ว ๆ ไปสามารถแบ่งแรงดันพังทลาย ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เป็น 4 ชนิดคือ

1. แรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ (Avalanche Breakdown Voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าบริเวณปลดพาหะ เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ มีค่าสูงขึ้นทำให้พาหะอิสระที่วิ่งผ่าน บริเวณปลดพาหะมีพลังงานมากพอ จนทำให้เกิดการชนกับอะตอมภายใน บริเวณปลดพาหะ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนกับโฮล ขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นทวีคูณ จนไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ โดยปกติแล้วแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ จะเกิดขึ้นในขณะที่รอยต่อได้รับการไบอัสย้อนกลับมีค่าสูง ๆ

2. แรงดันพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown Voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นกับรอยต่อที่มีบริเวณปลดพาหะแคบมาก ๆ เมื่อรอยต่อนี้ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงพอ (มีค่าประมาณ 10^6 V/cm) ที่ทำให้พาหะอิสระได้รับพลังงานมากจนเกิดปรากฏการณ์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับจำนวนมากผ่านรอยต่อ

3. แรงดันพังทลายแบบพินซ์ทรู (Punch-through Breakdown Voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดจากการขยายของบริเวณปลดพาหะเมื่อ ได้รับไบอัสย้อนกลับ จนทะลุผ่านรอยต่ออีกด้านหนึ่ง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ

4. แรงดันพังทลายของไดอิเล็กทริก (Dielectric Breakdown Voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าบริเวณชั้นไดอิเล็กทริกมีค่าสูงเกินกว่าชั้นไดอิเล็กทริกจะทนได้ เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านชั้นไดอิเล็กทริกได้

ถ้าพิจารณาเป็นรอยต่อพีเอ็นเมื่อป้อนแรงดันย้อนกลับแก่รอยต่อพีเอ็นจะทำให้ความกว้างของบริเวณปลดประจุพาหะ และสนามไฟฟ้าบริเวณปลดประจุพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้บริเวณปลดพาหะมีการขยายมากขึ้น และสนามไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะทำให้เกิดการพังทลายของรอยต่อ ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-qN_D}{\epsilon_{Si}}(x_n - x) \quad (1.14)$$

โดยที่ x_n เป็นค่าความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะในด้านเอ็นมีค่าดังนี้

$$x_n = \left[\frac{2\epsilon_{Si}}{q} (V_{bi} - V_A) \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \right]^{1/2} \quad (1.15)$$

โดยที่ V_{bi} คือ Built-in Voltage

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right] \quad (1.16)$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ $x = 0$ จะได้

$$\xi(0) = - \left[\frac{qN_D}{\epsilon_{Si}} (V_{bi} - V_A) \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)} \right]^{1/2} \quad (1.17)$$

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

$$V_{BV} \cong \left(\frac{\xi_{CR}^2 \epsilon_{Si}}{2q} \right) \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] \quad (1.18)$$

โดยที่ ξ_{CR} ของซิลิกอนมีค่าประมาณ 2×10^5 V/cm ถึง 8×10^5 V/cm ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการเจือสาร

ϵ_{Si} มีค่า $11.7\epsilon_0$

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

q คือค่าประจุของอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.6×10^{-19} C

N_D คือค่าความหนาแน่นของประจุพาหะในด้านเอ็น

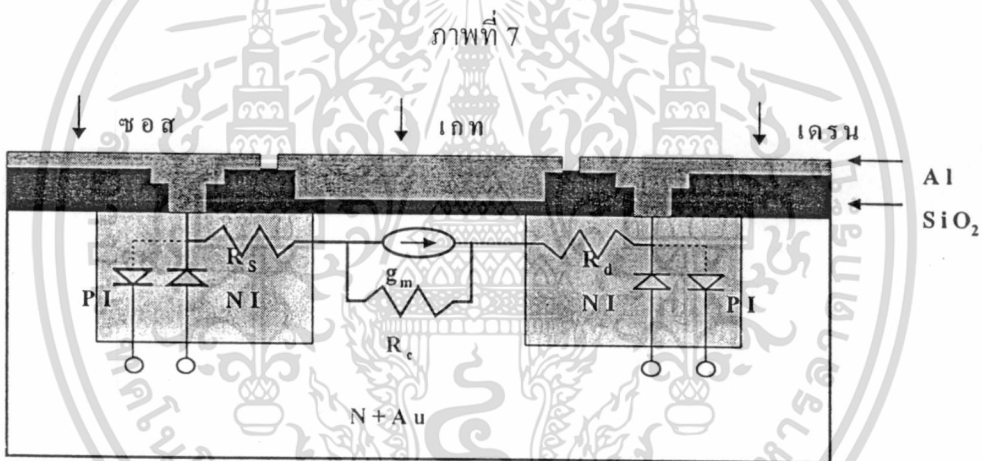
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของ MOISFET¹⁶¹

แบบจำลองของ MOISFET จะใช้เป็นตัวแทนของ MOISFET ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ในวงจรก่อนทำการสร้างวงจรจริงออสซิลเลเตอร์ และแบบจำลองของ MOISFET ยังช่วยในการวิเคราะห์การทำงานภายในได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์จะทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 แบบ คือแบบจำลองทางไฟตรงและแบบจำลองทางไฟสลับ

แบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET

พิจารณาภาพที่ 7 จะเห็นว่าโครงสร้างทั่วไปของ MOISFET เมื่อให้ไฟตรงเข้าไป พบว่าจะมีโครงสร้างแฝงเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของ MOISFET



แสดงภาพตัดขวางของ MOISFET ที่มีโครงสร้างอื่นแฝงอยู่ เมื่อพิจารณาแบบไฟตรง

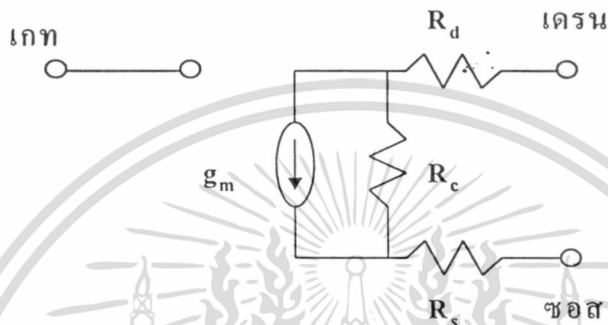
จากภาพที่ 7 สามารถสรุปโครงสร้างแฝงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ MOISFET เมื่อพิจารณาแบบไฟตรงได้ดังนี้

- 1 ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากขั้วซอส (R_s) และขั้วเดรน (R_d) ของ MOISFET
- 2 แหล่งกำเนิดกระแส (g_m) ถูกควบคุมโดยแรงดันที่เกต และแรงดันตกคร่อมขั้วซอสและขั้วเดรนซึ่งมีความต้านทานภายใน (R_c)
- 3 ไดโอดที่เกิดจากรอยต่อขั้วซอสและขั้วเดรนของ MOISFET กับฐานรอง (เป็น PI ไดโอดเมื่อเป็น PMOSFET และเป็น NI ไดโอดเมื่อเป็น NMOSFET)

จากโครงสร้างแฝงที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ชนิดพบว่าในขณะที่ใช้งานจริงไดโอดที่เกิดจากรอยต่อ ขั้วซอสและขั้วเดรนของ MOISFET จะไม่ค่านิ่งถึง เพราะว่าการใช้งานนั้นที่ฐานรองของ MOISFET เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถต่อศักดาไฟเลี้ยงหรือลงกราวนด์ได้ ดังนั้นไดโอดที่เกิดจากรอยต่อขั้วซอสและขั้วเดรนของ MOISFET จึงไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของ MOISFET จึงสรุปได้ว่าวงจรที่ใช้แทนแบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET จะเป็นดังภาพที่ 8

ภาพที่ 8

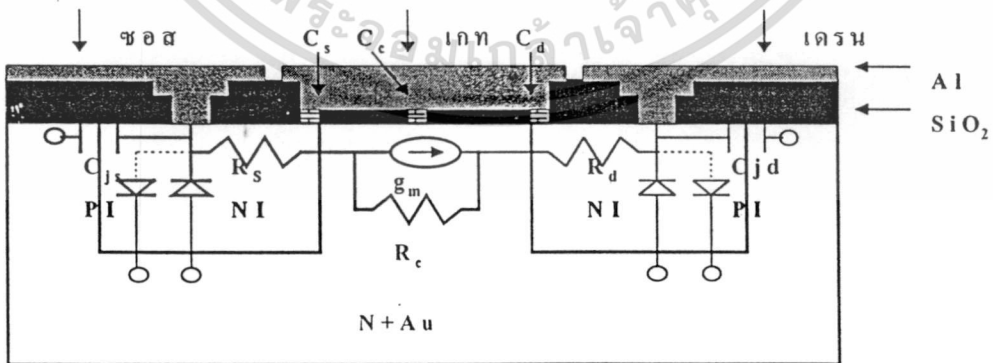


แสดงแบบจำลองทางไฟตรงของ MOISFET

แบบจำลองทางไฟสถับของ MOISFET

พิจารณาภาพที่ 9 จะเห็นว่าโครงสร้างทั่วไปของ MOISFET เมื่อให้ไฟสถับเข้าไปพบว่าจะมีโครงสร้างแฝงเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของ MOISFET

ภาพที่ 9



แสดงภาพตัดขวางของ MOISFET ที่มีโครงสร้างอื่นแฝงอยู่เมื่อพิจารณาแบบไฟสถับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

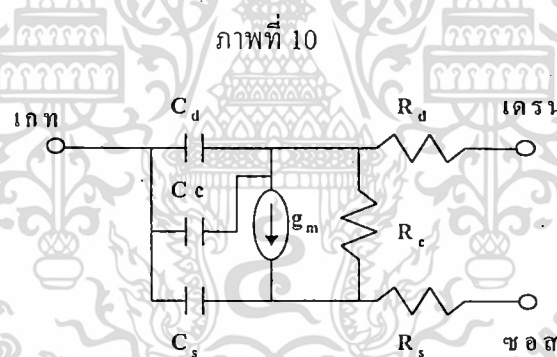
จากภาพที่ 9 สามารถสรุปโครงสร้างแผ่นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ MOISFET เมื่อพิจารณาแบบไฟสลับบจะมีโครงสร้างแผ่นที่เพิ่มขึ้นมาจากการพิจารณาแบบไฟตรงดังนี้

1. ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการออกแบบขั้วเกตที่เกินเข้าไปบนขั้วซอส (C_g) และบนขั้วเดรน (C_d) (gate overlap design) โดยทั่ว ๆ ไป แล้วส่วนเกินในแต่ละด้านจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าความจุ C_g และ C_d ส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากัน

2. ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วเกตกับฐานรองบริเวณช่องทางเดินกระแสของ MOISFET (C_o)

3. ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากรอยต่อของฐานรองกับขั้วซอส (C_{js}) และขั้วเดรน (C_{jd})

จากโครงสร้างแผ่นที่เกิดขึ้น 3 ชนิดนี้ พบว่าจะไม่คำนึงถึงค่า C_{js} และ C_{jd} เพราะในขณะที่ใช้งานนั้นที่ฐานรองของ MOISFET ไม่สามารถต่อศักดาไฟเลี้ยงหรือลงกราวนด์ได้ ดังนั้น C_{js} และ C_{jd} จึงไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของ MOISFET จึงสรุปได้ว่าวงจรที่ใช้แทนแบบจำลองทางไฟสลับบของ MOISFET จะเป็นดังภาพที่ 10



แสดงแบบจำลองทางไฟสลับบของ MOISFET

ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีป^[7]

ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีปเป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อมีความดันมากระทำแล้วจะทำให้เกิดความต้านทานของเนื้อสารเปลี่ยนไป

ในการที่จะบอกค่าวัสดุชนิดใดที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นอุปกรณ์วัดความดันมากกว่ากัน นั้นโดยมากจะใช้ค่าเกจแฟคเตอร์ (gage factor (K)) เป็นตัวบอกถ้าวัสดุชิ้นใดมีค่าเกจแฟคเตอร์สูงก็เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นตัววัดความดันมาก โดยค่าเกจแฟคเตอร์จะนิยามดังนี้

$$K = (\Delta R/R)/\epsilon_L \quad (1.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ΔR คือความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความดัน

R คือความต้านทาน

ϵ_L คืออัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของความยาว

โดยพบว่าค่าเกจแฟกเตอร์ในโลหะค่อนข้างต่ำ แต่ในการใช้งานจริง ๆ นั้น ต้องการใช้กับสัญญาณที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) สูงเมื่อขนาดความเครียดต่ำ ดังนั้นวัสดุที่มีค่าเกจแฟกเตอร์สูงจึงเป็นที่ต้องการอย่างมาก จากนั้นในปี 1960 ได้พบว่าสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอนและเจอร์มาเนียมมีค่าเกจแฟกเตอร์สูงจึงถูกนำมาใช้อย่างมาก โดยที่ Smith^[11] ได้แสดงให้เห็นว่าซิลิกอนชนิดพีจะมีค่าเกจแฟกเตอร์สูงมากถึง 175 แม้ว่าในสารชนิดเอ็นจะมีค่าสูงเช่นกันแต่มีค่าเป็นลบถึง -135 ค่าเกจแฟกเตอร์ที่สูงในสารกึ่งตัวนำนั้นเกิดจากสาเหตุเดียวคือความไวต่อความเครียดของค่าสภาพต้านทานของสารกึ่งตัวนำ

โครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน^[8]

ในกลศาสตร์ควอนตัมแบบดั้งเดิมได้แสดงว่าพลังงาน E ของอนุภาค จะเขียนในเทอมของมวล m และในโมเมนตัม p ได้ดังนี้

$$E = mv^2/2 \quad (1.20)$$

โดยที่ m เป็นมวลและ v เป็นความเร็ว ค่าโมเมนตัมมีค่าเป็น

$$p = mv \quad (1.21)$$

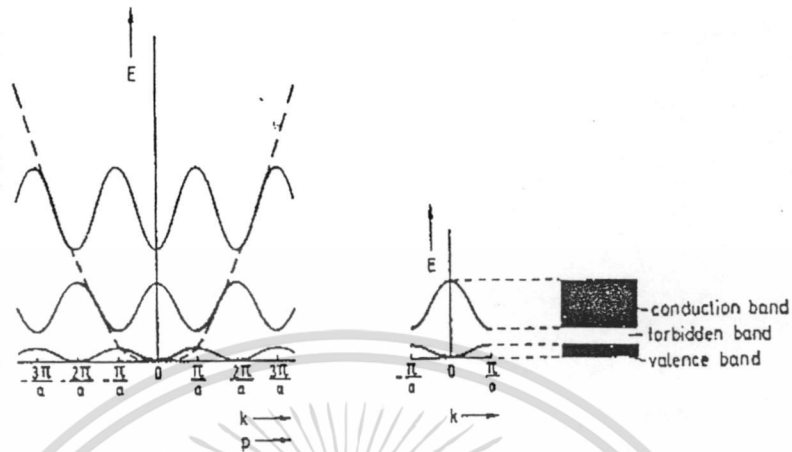
ถ้าเขียนพลังงานในรูปโมเมนตัมจะได้ว่า

$$E = p^2/2m \quad (1.22)$$

เมื่อพล็อตค่าพลังงานในรูปโมเมนตัมจะเป็นรูปพาราโบลา ดังแสดงในภาพที่ 11(ก) ซึ่งแสดงด้วยเส้นประเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในผลึกเป็นคาบค่านี้จะเปลี่ยนไปเนื่องจากผลจากการเป็นคาบนี้เอง ซึ่งผลนี้ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องที่โมเมนตัมบางจุดบนกราฟ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E และ โมเมนตัมแสดงดังภาพที่ 11(ก) ซึ่งแสดงด้วยเส้นทึบกราฟดังกล่าวจะเป็นกรณีเฉพาะในหนึ่งมิติเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 11



แสดง (ก) พลังงาน E เป็นฟังก์ชันของโมเมนตัม p สำหรับหลักการพื้นฐาน (เส้นประ) และเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น k ด้วยธรรมชาติของอนุภาค (ข) ส่วนที่แสดงค่าที่เป็นไปได้ของแถบความนำ แถบต้องห้ามและแถบวาเลนซ์

ในวิชาทศศาสตร์ควอนตัมมักแสดงค่าโมเมนตัมด้วยเลขคลื่น (Wave number) k ซึ่งมี

$$p = hk/2\pi \tag{1.23}$$

เมื่อ h เป็นค่าคงที่ของพลังค์ จากภาพที่ 11(ก) จะเห็นว่าเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นที่จุด

$$k = n\pi/a ; n = -1, -2, \dots \text{ และ } n = +1, +2, \dots \tag{1.24}$$

เมื่อ a เป็นค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) กรณีที่ค่ามากๆ จากสมการ (1.24) เส้นประกับเส้นทึบจะเริ่มทับกัน ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนเหล่านี้ประพฤติตนเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ตามเมื่อค่า k เข้าใกล้ $n\pi/a$ พลังงานส่วนนั้นจะเป็นพลังงานต้องห้าม ซึ่งเกิดจากปฏิกริยารุนแรงของผลึก

การเกิดเป็นคาบของแถบต้องห้ามนั้น เกิดจากธรรมชาติที่อิเล็กตรอนมีความเป็นคลื่นเคลื่อนที่ไปมาในผลึก มีค่า k ใด ๆ อิเล็กตรอนจะถูกกระเจิงโดยคาบของผลึก และอาจจะมีการสะท้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาบริเวณช่วงกลางของกราฟภาพที่ 11 (ข) จะเห็นว่าไม่ว่าค่า k จะเป็นเท่าใด จะเกิดแถบพลังงานยินยอม (allow band) ขึ้นสองที่ ระหว่างแถบทั้งสองนี้เรียกว่า แถบต้องห้าม ในสารกึ่งตัวนำแถบที่อยู่ด้านล่างจะเรียกว่าแถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งเกือบจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม ส่วนแถบบนเรียกว่าแถบความนำ (conduction band) ซึ่งแทบจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E และ k ที่เป็นไปตามภาพที่ 11(ข) นั้นเป็นเพียงความสัมพันธ์ในหนึ่งมิติเท่านั้น ในสารกึ่งตัวนำแบบสามมิติเช่นซิลิกอนนั้นจะเป็นไปแบบยุ่งยากมากกว่านี้ การคำนวณโดยละเอียดเพื่อหาโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นสิ่งที่ซับซ้อนมาก การแก้ปัญหาเพื่อให้ง่ายต้องยึดความจริงที่ว่าผลึกนั้นมีความสมมาตรสูง ที่ทิศทางความสมมาตรหนึ่ง ๆ ก็จะหาคำตอบได้ ในขณะที่ทิศทางอื่น ๆ สมมติว่าพลังงานจะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว ได้มีการคำนวณแถบพลังงานของซิลิกอนในทิศทาง $[100]$ ถึง $[111]$ ในภาพที่ 12(ก) และ 12(ข) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างแถบพลังงานซิลิกอน ซึ่งจะอธิบายปรากฏการณ์เปียโซรีซีตีบได้ 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

จากภาพที่ 12 จะเห็นว่าพลังงาน E รอบ ๆ จุดต่ำสุดจะเป็นฟังก์ชันของ k ในทิศทาง $[100]$ อย่างไรก็ตามก็น่าสนใจว่าที่ทิศทาง $[010]$ และ $[001]$ นั้นพลังงาน E รอบ ๆ จุดต่ำสุดจะเป็นฟังก์ชันของ k อย่างไรซึ่งสามารถคำนวณได้ แต่ผลการคำนวณจะไม่เขียนเป็นกราฟได้ง่าย ๆ แบบภาพที่ 12 ในการที่จะทราบถึงโครงสร้างพลังงานในสามมิติ มักจะพล็อตเป็นผิวพลังงานที่เท่ากันใน k -space ดังในภาพที่ 13 เป็น โคอะเจอร์มของแถบความนำในซิลิกอน จะเห็นว่าพื้นผิวสามอันเป็นรูปทรงรี ซึ่งแกนยาวจะไปตามแกนหลักของผลึก การที่เป็นรูปทรงรีนี้เองเป็นสาเหตุในการเกิดปรากฏการณ์เปียโซรีซีตีบในซิลิกอน

การจะอธิบายได้ต้องกลับไปที่สมการที่ 1.20 ในสมการนี้พลังงานจะขึ้นกับมวลและโมเมนตัมของอนุภาค ถ้าทราบพลังงาน E และโมเมนตัม p ก็สามารถคำนวณมวลด้วยการดิฟเฟอเรนเชียลสองครั้งตามสมการ

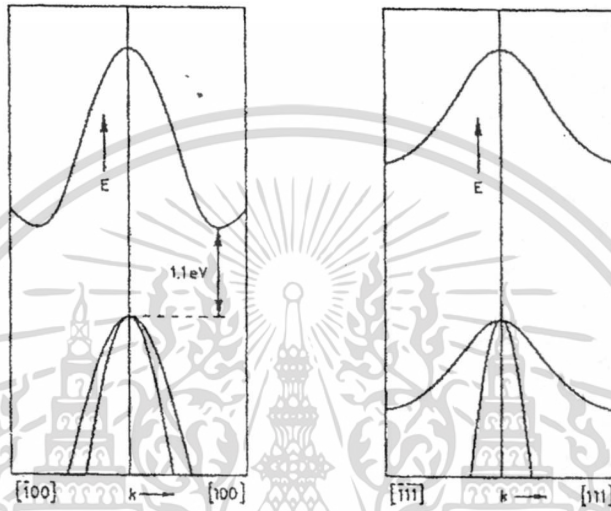
$$m^* = \frac{1}{(d^2 E / dp^2)} \quad (1.25)$$

ในวิชาฟิสิกส์ควอนตัมก็จะเขียนมวลในรูปเลขคลื่นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

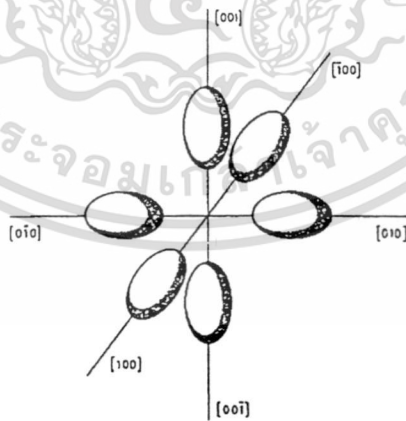
$$m^* = \frac{h^2}{4\pi^2} \frac{1}{(d^2E/dk^2)} \quad (1.26)$$

ภาพที่ 12



แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน (ก) ทิศทาง [100] (ข) ทิศทาง [111]

ภาพที่ 13



แสดง constant-energy ellipsoids ใน k-space ใกล้จุดต่ำสุดในแถบความนำของซิลิกอน

จากความรู้ตรงนี้ จะคำนวณมวลยังผลของอิเล็กตรอนในจุดต่ำสุดทั้งหก จะพบสิ่งที่น่าสนใจอย่างหนึ่งว่ามวลของอิเล็กตรอนจะไม่เท่ากันเลยในทิศทางต่าง ๆ กัน ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปตามทิศทาง [010] หรือ [001] ทรงรีในทิศทาง [100] จะต่ำลง อิเล็กตรอนในทิศทางนี้จะมีมวลยังผลสูงขึ้น มวลยังผลนี้จะขึ้นกับทิศทางการเคลื่อนที่ของมันว่าจะไปทิศทางไหนของผลึก ถ้าป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเท่านั้น มิได้อยู่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าเข้าไปตามทิศทาง [100] บางอิเล็กตรอนที่อยู่ตรงจุดต่ำสุดในทิศทาง [010] และ [001] จะเคลื่อนที่เข้ามายังทิศทาง [100] แต่จะมีมวลดน้อยกว่า (ดูภาพที่ 11) โดยทั่วไปการนำไฟฟ้าตามแกนหลักหนึ่ง ๆ นั้นจะขึ้นกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งสองในสามเป็นอิเล็กตรอนที่มีมวลดเบา และหนึ่งในสามเป็นอิเล็กตรอนที่มีมวลดมากขึ้น การที่จะเข้าใจกระบวนการนำไฟฟ้าขึ้นกับค่ามวลดได้อย่างไร จะเริ่มจากความสัมพันธ์ของมวลดยังผล m^* และความคล่องตัว (mobility, μ) ของอิเล็กตรอนดังนี้^{[8][9]}

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} = \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_i} \right)^{-1} \quad (1.27)$$

เมื่อ τ เป็นเวลาค่าเฉลี่ยของการชนเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแลตทิซ μ_1 คือความคล่องตัวเนื่องจาก acoustic phonon

$$\mu_1 = \frac{\sqrt{8}\pi q \hbar^4 c_{11}}{3E_{ds} m^{*5/2} (KT)^{3/2}} \approx (m^*)^{-5/2} T^{-3/2} \quad (1.28)$$

C_{11} เป็นค่าคงที่ความยืดหยุ่นตามแนวยาวเฉลี่ยของสารกึ่งตัวนำ

E_{ds} เป็นการแทนที่ของขอบของแถบต่อการยืดหนึ่งหน่วย (unit delation) ของผลึก

μ_i คือค่าความคล่องตัวเนื่องจากสารเจือถูกไอออนไนซ์

$$\mu_i = \frac{64\sqrt{\pi}\epsilon_s^2 (2KT)^{3/2}}{N_1 q^3 m^{*1/2}} \left\{ \ln \left[1 + \left(\frac{12\pi\epsilon_s KT}{q^2 N_1^{1/3}} \right)^2 \right] \right\}^{-1} \quad (1.29)$$

$$\approx (m^*)^{-1/2} N_1^{-1} T^{3/2}$$

N_1 เป็นความหนาแน่นสารเจือที่ถูกไอออนไนซ์

ϵ_s เป็นค่า permittivity ของซิลิกอน

จะเห็นว่าถ้ามวลดเบากว่าก็จะมี การเคลื่อนที่ได้ดีกว่าสำหรับสารชนิดเอ็นสภาพความนำ (conduction) จะแสดง ได้ดังนี้

$$\sigma = nq\mu \quad (1.30)$$

อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการนำไฟฟ้านั้นจริง ๆ แล้วขึ้นกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสองชนิดคือมวลดเบากับมวลดหนักดังนี้

$$\sigma = (2/3)nq\mu_{\perp} + (1/3)nq\mu_{\parallel} \quad (1.31)$$

เมื่อ μ_{\perp} เป็นความคล่องตัวตามแกนสั้นของทรงรี
 μ_{\parallel} เป็นความคล่องตัวตามแกนยาวของทรงรี
 ค่าเฉลี่ย μ จะเป็นดังนี้

$$\mu = (2\mu_{\perp} + \mu_{\parallel})/3 \quad (1.32)$$

ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปในซิลิกอนชนิดเอ็น¹⁷

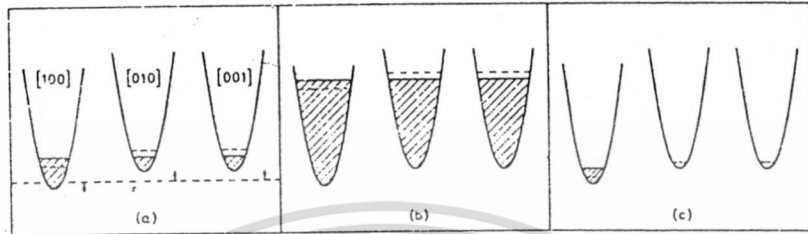
เพื่อที่จะเข้าใจปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปในซิลิกอนชนิดเอ็น จำเป็นต้องศึกษาว่าโครงสร้างแถบพลังงานนั้นมีผลกระทบจากแรงภายนอกอย่างไร แถบต้องห้ามนั้นเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีธรรมชาติคล้ายคลื่นที่เป็นคาบภายในผลึก เมื่อมีแรงกดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) มากระทำในทิศทาง [100] ระดับพลังงานต่ำสุดของทรงรีตามทิศทาง [100] จะต่ำลง แต่ระดับพลังงานต่ำสุดในอีกสองทิศทางจะสูงขึ้น อิเล็กตรอนจะมีการจัดเรียงตัวใหม่ไปตามจุดต่ำสุดทั้งหมด จะมีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในทิศทาง [100] ซึ่งได้มาจากจุดต่ำสุดของที่อื่น สมการที่ 1.32 จะใช้ไม่ได้อีก ค่าความคล่องตัวเฉลี่ยในทิศทาง [100] จะลดลงเมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางนี้ ดังแสดงในภาพที่ 14 การกดในทิศทาง [100] จะไปลดช่องว่างของแถบทิศตามแกนนี้ทำให้เกิดความเครียดลบ (negative strain) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ของผลึกในทิศทาง [100]

ค่าเฉลี่ยของความคล่องตัวหรือการนำไฟฟ้าในทิศทาง [100] จะลดลงเนื่องจากแรงอัดจากภายนอกทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น ค่าความเครียดจะเป็นลบ และการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานสัมพันธ์จะเป็นบวก ซิลิกอนชนิดเอ็นจะให้ค่าแกจแฟคเตอร์เป็นลบซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

มีการทดลองสองประการแสดงไว้ ประการแรก ค่าแกจแฟคเตอร์ K จะขึ้นกับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ค่าแกจแฟคเตอร์จะลดลงเมื่อความหนาแน่นของอะตอมสารเจือเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 15 ซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้คือ จากสมการ ที่ 1.19 ค่าแกจแฟคเตอร์เป็นค่าการหารการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์ของความต้านทานต่อค่าความเครียด เมื่อเจือสารชนิดเอ็นที่เข้มข้นมาก อิเล็กตรอนจำนวนมากจะเข้าไปจับจองสถานะพลังงานต่าง ๆ ไว้ เมื่อมีแรงอัดเข้ามาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานซึ่งขึ้นกับขนาดแรงที่อัดเท่านั้น อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่จากที่ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมายังที่ที่มีพลังงานต่ำกว่าจนกระทั่งถึงจุดสมดุลอีกครั้ง เมื่อมีอิเล็กตรอนอยู่จำนวนมากแล้ว จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกแทนที่ ก็จะน้อยลงทำให้เกิดค่าแกจแฟคเตอร์น้อย (ดูภาพที่ 14(ข)) ในสารที่มีการเจือสารชนิดเอ็นน้อย ๆ (ดูภาพที่ 14(ค)) อิเล็กตรอนจำนวนมากที่ถูกแทนที่จะมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนทั้งหมดทำให้แกจแฟคเตอร์สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

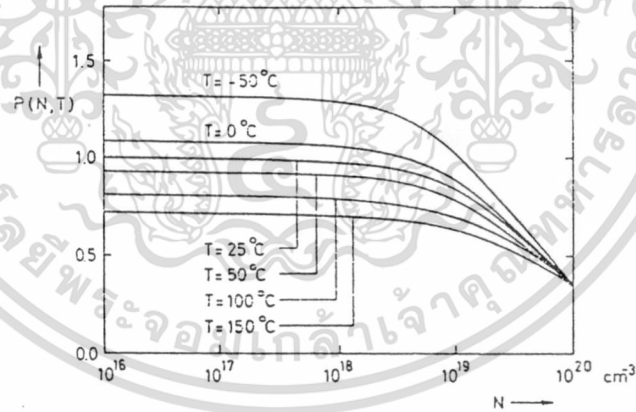
ภาพที่ 14



ก ข ค

แสดง (ก) การเปรียบเทียบในทิศทาง $[100]$ ที่เวกเตอร์ $[100]$ พลังงานน้อยสุดเป็นส่วนที่ต่ำสุดและที่เวกเตอร์ $[010]$ และเวกเตอร์ $[001]$ ส่วนที่ต่ำสุดถูกยกขึ้น อิเล็กตรอนจะไหลจากเวกเตอร์ $[010]$ และ $[001]$ ไปยังเวกเตอร์ $[100]$ (ข) และ (ค) แสดงการยึดครองของอิเล็กตรอนของแถบความนำเนื่องจากไหลของอิเล็กตรอน

ภาพที่ 15



แสดงแฟกเตอร์ $P(N, T)$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์เบี่ยงไซริชิตที่ปที่อุณหภูมิห้อง ที่มีการคูณเพื่อให้ได้แกจแฟกเตอร์ที่อุณหภูมิ T และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (donor) N ในซิลิกอนชนิดเอ็น ดังที่คำนวณโดย Kanda^[7]

การทดลองอีกอันหนึ่งพบว่าค่าแกจแฟกเตอร์จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ สารที่มีการเจือสารชนิดเอ็นน้อยจะมีค่าแกจแฟกเตอร์สูงแต่ก็ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมากเช่นกัน ในสารที่มีการเจือสารสูง อิเล็กตรอนในแถบความนำจำนวนมากจะมาจากสารเจือ เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้น และค่าแกจแฟกเตอร์ของอิเล็กตรอนจะไม่เปลี่ยนแปลง ในซิลิกอนที่มีการเจือสารน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

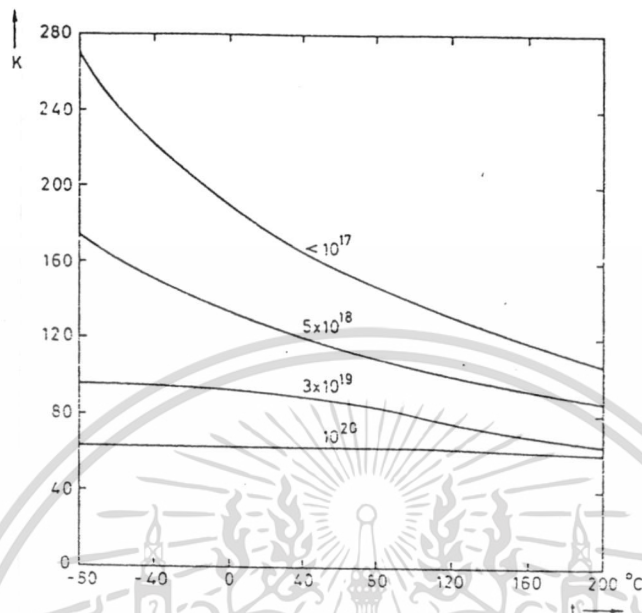
อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ในแถบความนำต้องได้มาจากการกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไป เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนในแถบความนำจึงเพิ่มสูงขึ้น ค่าแกจแฟคเตอร์จึงลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกแทนที่ลดลง

จากแบบจำลอง one-band many-valley นี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปีได้สอดคล้องกับผลการทดลอง

ปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปีในซิลิกอนชนิดพี

จากผลการทดลองได้พบว่าค่าแกจแฟคเตอร์ในซิลิกอนชนิดพีจะมีค่าสูงกว่าในซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งก็เป็นเหตุผลหนึ่งที่มีการใช้สารชนิดนี้มากกว่า จากภาพที่ 12 จะเห็นว่ารูปร่างของแถบความนำจะต่างกับแถบวาเลนซ์มาก การที่จะอธิบายได้ต้องรู้ว่าแรงเค้นและแรงเครียดจะมีผลต่อโครงสร้างแถบพลังงานอย่างไร สิ่งหนึ่งที่อธิบายต่างกับสารชนิดเอ็น ก็คือไม่มีรูปที่เขียนได้ชัดเจน จากภาพที่ 12 ในแถบวาเลนซ์นั้นจะมีความสัมพันธ์สองอย่างระหว่างพลังงานและเลขคลื่น จุดที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ $k=0$ และมีความสูงเท่ากัน สำหรับโฮลในความเป็นจริงแล้ว จะมีความสัมพันธ์ที่สามเข้ามาเกี่ยวข้อง (แต่ไม่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 12) จะอยู่ต่ำกว่าอีกสองอันเล็กน้อย และมีผลต่อปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปีน้อยมาก ในแถบวาเลนซ์นี้อาจจะมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า two-and-one band model แถบทั้งสองจะมีมวลยังผลและความคล่องตัวไม่เท่ากัน ในทิศทาง [100] จะเห็นความแตกต่างไม่ชัดเจนนัก แต่ในทิศทาง [111] จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อเกิดแรงอัดเข้ามาโฮลจะเกิดการเรียงตัวใหม่ เมื่อความคล่องตัวของแถบทั้งสองไม่ต่างกันมากนัก การเปลี่ยนแปลงความต้านทานเนื่องจากการเรียงตัวใหม่จะไม่ชัดเจน ซึ่งจะพบในทิศทาง [100] อย่างไรก็ตามในทิศทาง [111] ผลนี้จะเกิดสูงสุด ค่าแกจแฟคเตอร์ของซิลิกอนชนิดพีจะมีค่าเป็นบวก นั้นหมายความว่าเมื่อมีความเครียดบวก (การยืดตัว) จะทำให้แถบที่มีค่ามวลเบาสุดหรือค่าความคล่องตัวสูงจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแถบที่มีความคล่องตัวต่ำ จากปรากฏการณ์ดังกล่าวเมื่อโฮลจำนวนมากขึ้นมีค่าความคล่องตัวลดลง ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะตรงกับผลการทดลองเรื่องเปียโซรีซิสทีปีนี้ จากภาพที่ 16 ได้แสดงไว้ว่าค่าแกจแฟคเตอร์ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นสารเจืออย่างไร ในสารชนิดพีก็เช่นกัน แกจแฟคเตอร์จะลดลงเมื่อความเข้มข้นสารเจือสูงขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งสองกรณีอธิบายได้จากหลักที่ว่าเมื่อโฮลจำนวนน้อยได้มีการกระจายตัวเองเข้าไปในแถบทั้งสองการเปลี่ยนแปลงย่อมจะมีมากขึ้น จากความจริงที่ว่ามวลยังผลจะแตกต่างกันไปตามแกนของทรงรีในซิลิกอนชนิดเอ็น และความแตกต่างในแถบพลังงานที่ต่างกันมากในสารชนิดพี เป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปีได้

ภาพที่ 16



แสดงแถบแพคเตอร์ของซิงก์ออกไซด์ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ

ตารางที่ 1

แสดงความคล่องตัวและแถบแพคเตอร์สำหรับซิงก์ออกไซด์

m^*/m (ขนานกับแกนยาวของอิลลิปซอลด์, ซิงก์ออกไซด์เอ็น)	0.19
m^*/m (ขนานกับแกนสั้นของอิลลิปซอลด์, ซิงก์ออกไซด์พี)	0.98
m^*/m (โฮลเบา(light holes), ซิงก์ออกไซด์เอ็น)	0.16
m^*/m (โฮลหนัก(heavy holes), ซิงก์ออกไซด์พี)	0.52

ซิงก์ออกไซด์	ทิศทาง	ค่าพิกัดความต้านทาน (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
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

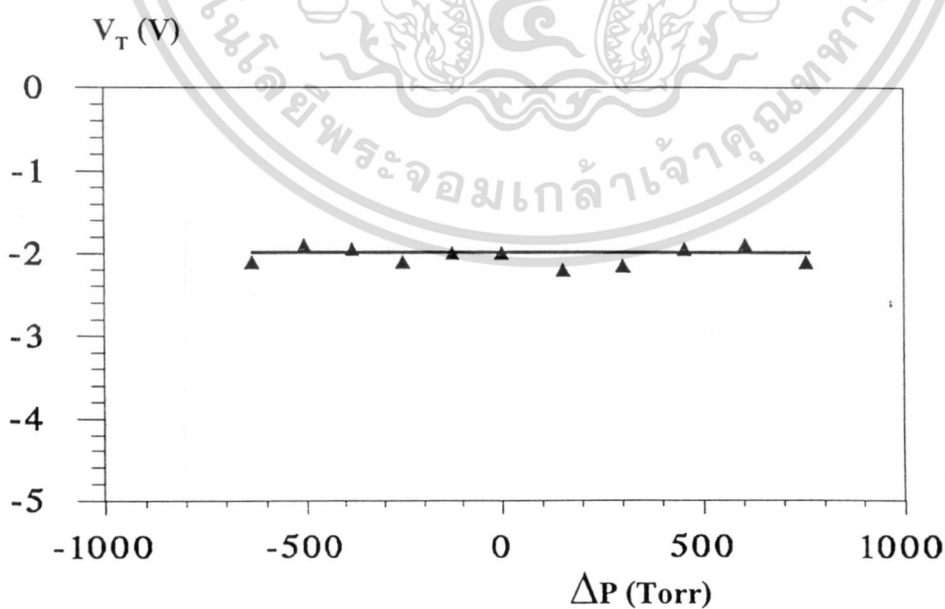
ผลของปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีปในซิลิกอนต่อพารามิเตอร์ของ MOISFET^[12]

อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีป และคุณสมบัติของ MOISFET นั้น จะมีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่สำคัญสองส่วนด้วยกันคือโครงสร้างของ MOISFET และโครงสร้างของไดอะแฟรมบาง โดย MOISFET ที่สร้างบนไดอะแฟรมนี้ได้ทำการแบ่งออกเป็น PMOISFET บนไดอะแฟรมและ NMOISFET บนไดอะแฟรมเพราะทั้งสองชนิดนี้ใช้พาหะในการนำกระแสคนละชนิดกันและนอกจากนั้นยังได้ศึกษาผลของทิศทางการไหลของกระแสเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรมโดยแบ่งเป็นทิศทางการไหลของกระแสแบบตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม และทิศทางการไหลของกระแสนานกับขอบของไดอะแฟรม เมื่อมีความดันกระทำต่อ MOISFET บนไดอะแฟรมจะมีผลต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

แรงดันขีดเริ่ม

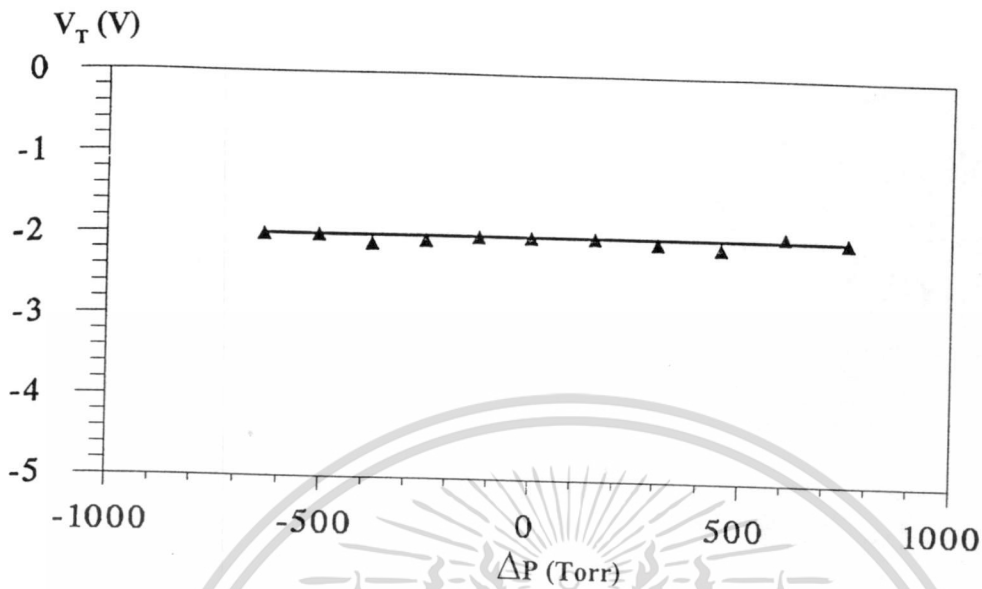
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า V_T ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET เมื่อมีความดันกระทำ พบว่าค่า V_T ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งของ PMOISFET และ NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสทั้งขนานและตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

ภาพที่ 17



ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง V_T กับความแตกต่างความดันของ PMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

จากสมการที่ 1.4

$$V_T = V_{FB} + \phi_F + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{Si} N(\phi_F)} \quad (1.33)$$

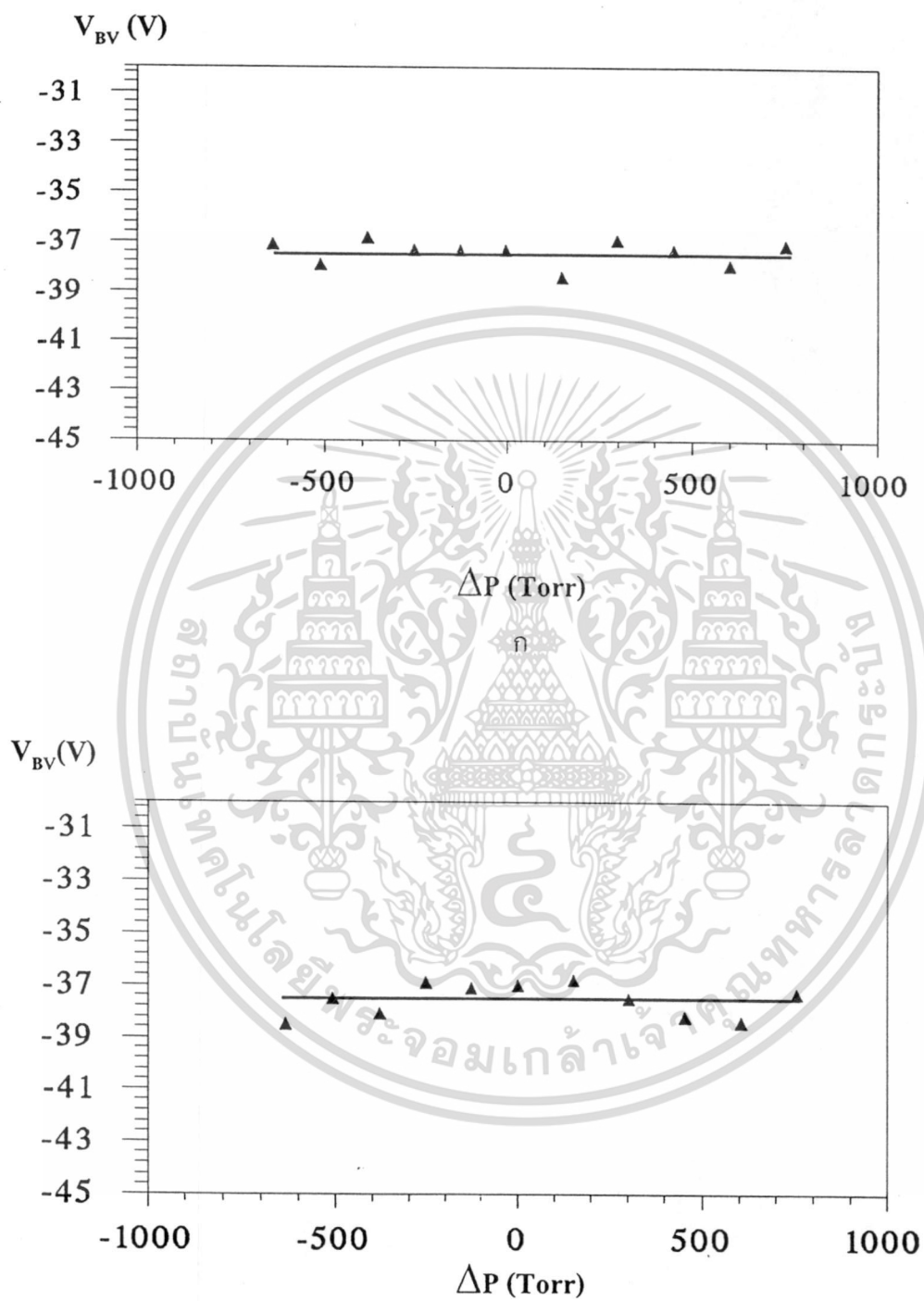
พิจารณาจากสมการจะเห็นว่าตัวแปรทุกตัวในสมการไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันมากกระทำ ดังนั้นค่าแรงดันขีดเริ่มจึงไม่เปลี่ยนแปลง

แรงดันพังทลาย

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า V_{BV} ของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET เมื่อมีความดันมากกระทำพบว่าค่า V_{BV} ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งของ PMOISFET และ NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสทั้งขนานและตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 18



ข

แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพ้งทลายกับความแตกต่างความดันของ PMOISFET(ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 1.18

$$V_{BV} \cong \left(\frac{\xi_{CR}^2 \epsilon_{Si}}{2q} \right) \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] \tag{1.34}$$

พิจารณาจากสมการจะเห็นว่าตัวแปรทุกตัวในสมการไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันมากกระทำ ดังนั้นค่าแรงดันพังทลายจึงไม่เปลี่ยนแปลง

ความจุไฟฟ้าบริเวณช่องทางเดินกระแส

จากแบบจำลองทางไฟฟ้าสลับของ MOISFET ดังภาพที่ 10 พบว่าค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกต (C_{ox}) มีค่าดังนี้

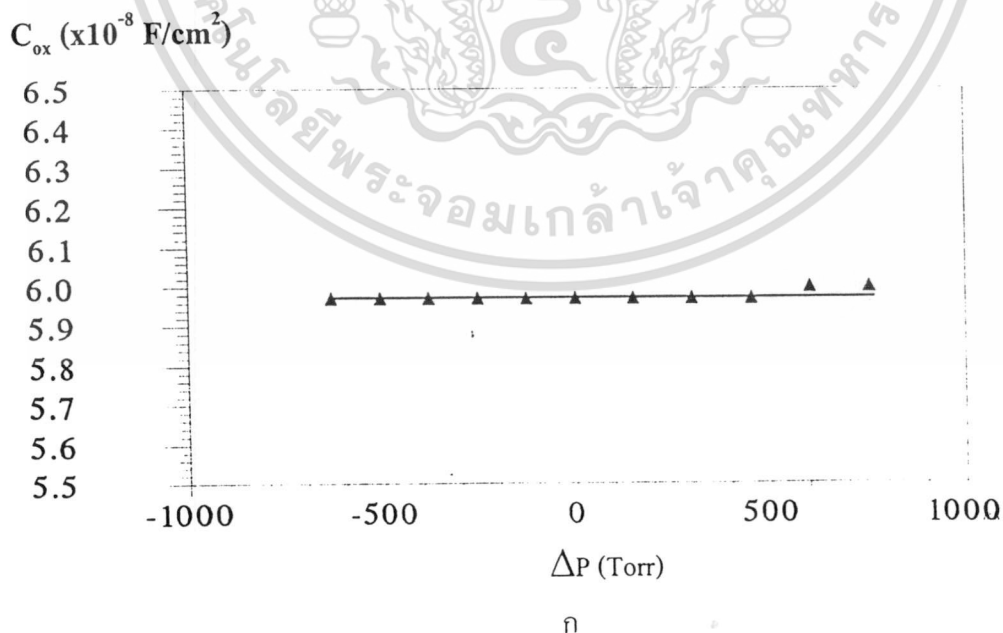
$$C_{ox} = C_s + C_c + C_d \tag{1.35}$$

แต่ค่า C_s และ C_d นั้นมีค่าน้อยมากเพราะส่วนที่ซ้อนทับที่ออกแบบไว้มีค่าน้อยมากดังนั้นจึงได้

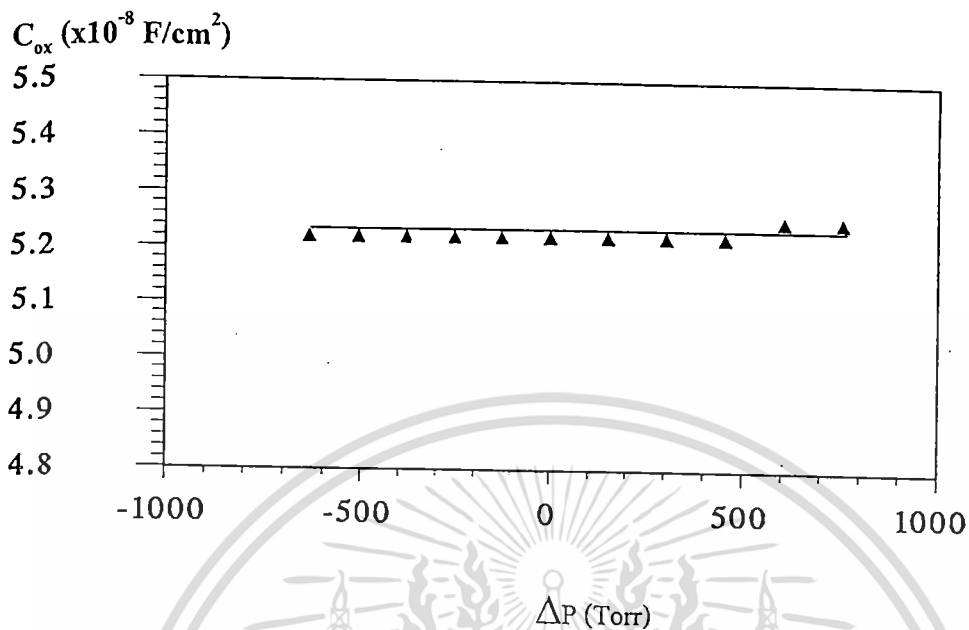
$$C_{ox} = C_c \tag{1.36}$$

ผลการทดลองหาค่า C_{ox} ของ MOISFET เมื่อมีความดันมากกระทำแสดงได้ดังภาพที่ 19

ภาพที่ 19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุกับความแตกต่างความดันของ NMOISFET (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า C_{ox} ของทรานซิสเตอร์ เมื่อมีความดันมากระทำพบว่าค่า C_{ox} ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้ง PMOISFET และ NMOISFET ที่มีทิศทางไหลของกระแสทั้งขนานและตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

ค่าทรานสคอนดักแตนซ์จากกระบวนการสร้าง

เมื่อมีความดันมากระทำต่อทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ส่งผลให้ค่ากระแส I_{Ds} ที่ได้ออกมา มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ MOISFET และทิศทางไหลของกระแส นั้น เมื่อพิจารณาสมการกระแสของ MOISFET ในช่วงอิมิต์วคือ

$$I_{Ds} = \left(\frac{\beta}{2}\right)[V_{Gs} - V_T]^2 \quad (1.37)$$

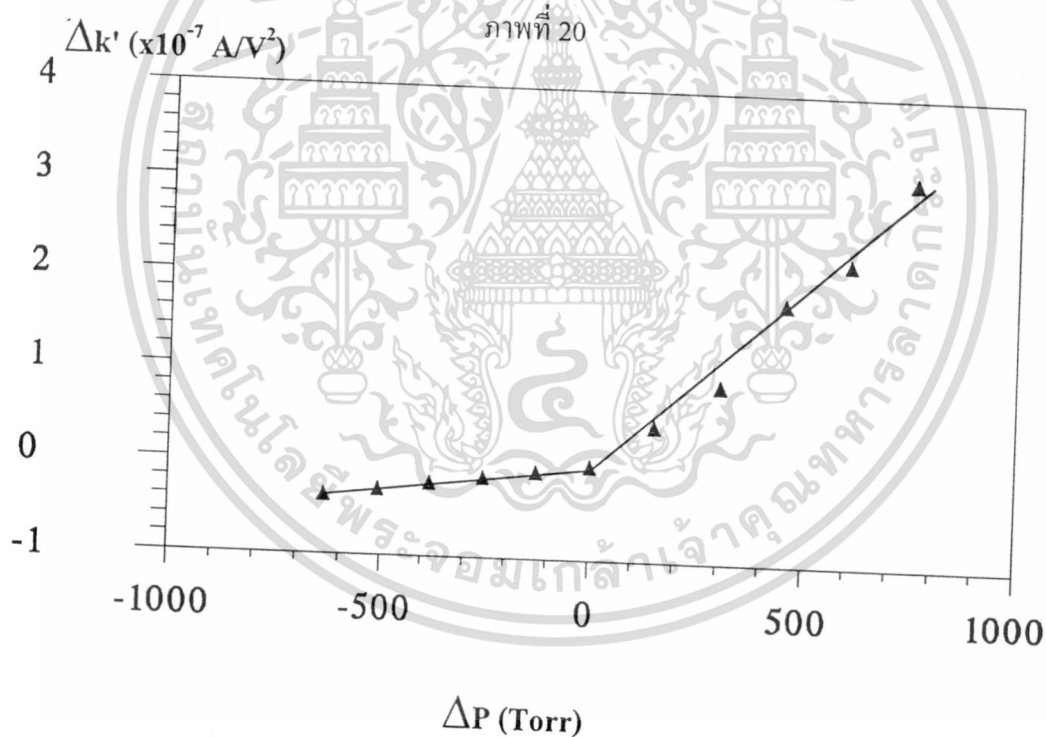
$$\beta = k' \left(\frac{W}{L}\right) \quad (1.38)$$

$$k' = \mu_{Au} C_{ox} \quad (1.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

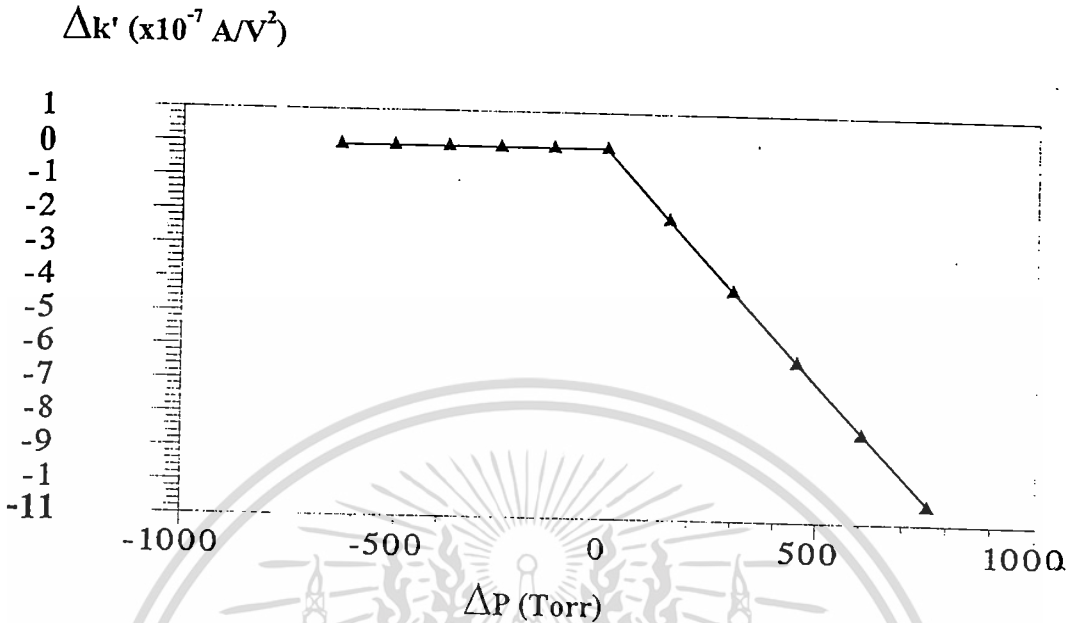
$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} = \frac{3.9\epsilon_0}{T_{ox}} \quad (1.40)$$

จากสมการ 1.37 จะเห็นว่าเมื่อให้ V_{GS} คงที่และ V_T ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความดันที่ทำการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวแปรที่ทำให้ค่ากระแส I_{DS} เปลี่ยนแปลงคือ β และจากสมการ 1.38 ค่า W/L นั้นมีค่าคงที่เนื่องจากการให้ความดันไม่ได้ให้มาจนทำให้ไดอะแฟรมเกิดการยืดตัว ดังนั้นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงคือค่า process transconductance (k') โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่าง $\Delta k'$ กับค่าความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ ΔP แสดงดังภาพที่ 20 และภาพที่ 21



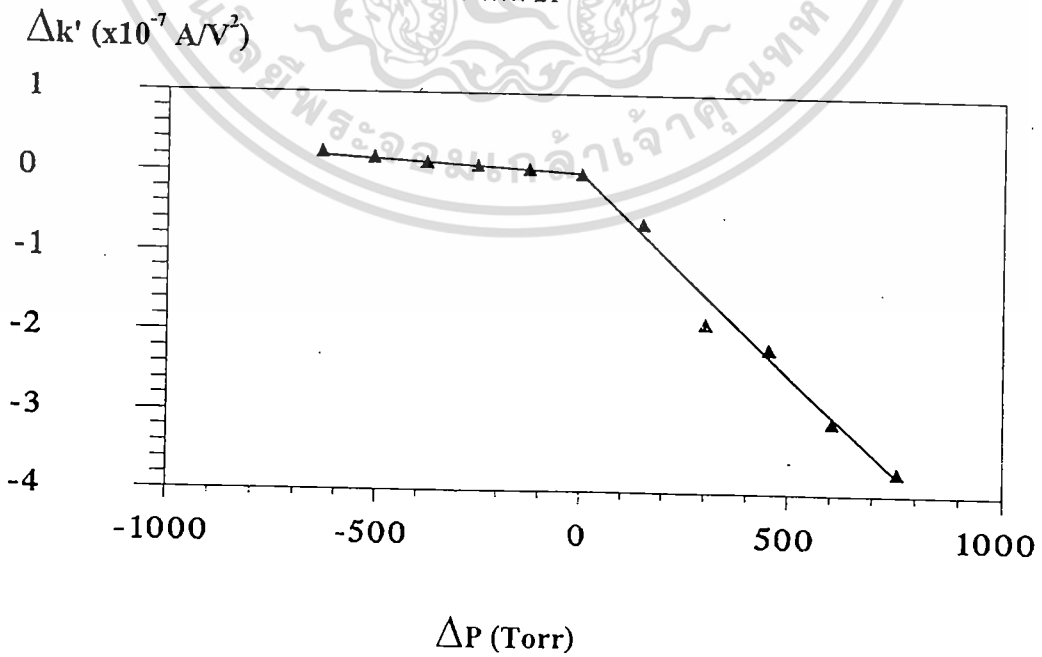
ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

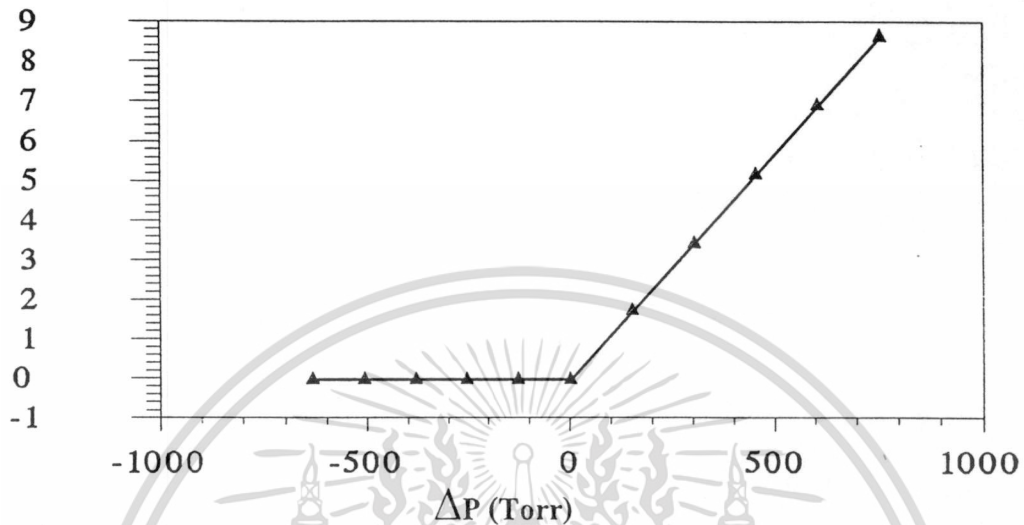


แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่าง $\Delta k'$ กับค่าความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ ΔP ของทรานซิสเตอร์ความดัน โดยที่มีทิศทางการไหลของกระแสแบบขนานกับขอบของไดอะเฟรม (ก) แบบ PMOISFET (ข) แบบ NMOISFET

ภาพที่ 21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta k' (x10^{-7} A/V^2)$


ข

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่าง k' กับค่าความแตกต่างความดันจากความดันบรรยากาศ (ΔP) ของทรานซิสเตอร์ความดัน โดยที่มีทิศทางการไหลของกระแสแบบตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ก)แบบ PMOSFET (ข) NMOISFET

จากภาพ PMOSFET ที่มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมเมื่อได้รับความดันมากขึ้นจะทำให้ $\Delta k'$ มีค่าเป็นบวกมากขึ้น ส่วนของ PMOSFET ที่มีทิศทางการไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมเมื่อได้รับความดันมากขึ้นจะทำให้ $\Delta k'$ มีค่าเป็นลบมากขึ้น ส่วนใน NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรมเมื่อได้รับความดันมากขึ้นจะทำให้ $\Delta k'$ เป็นลบมากขึ้นและใน NMOISFET ที่มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมเมื่อได้รับความดันมากขึ้นจะทำให้ $\Delta k'$ มีค่าเป็นบวกมากขึ้น

จากสมการ $k' = \mu_{Au} \cdot C_{ox}$ แต่ค่า C_{ox} ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีความดันมากกระทำ ดังนั้นจึงได้ว่าตัวที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความดันแล้วทำให้ค่ากระแส I_{DS} เปลี่ยนไปคือ μ_{Au} นั่นเอง

ความไวของทรานซิสเตอร์ความดัน^[12]

จากการศึกษาพบว่าทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET นี้ ค่าความไวจะขึ้นอยู่กับความหนาของไดอะแฟรม และตำแหน่งการวาง MOISFET บนไดอะแฟรม นั่นคือถ้าความหนาของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอะแฟรมมีค่ามากขึ้นความไวจะมีค่าลดลง โดยความหนาของไดอะแฟรมที่น้อยที่สุดของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET ที่สามารถสร้างโดยใช้เทคโนโลยีนี้ คือ $20 \mu\text{m}$ นี้ จะมีความไวมากที่สุด ส่วนตำแหน่งที่วาง MOISFET บนไดอะแฟรม แล้วมีความไวมากที่สุด คือ ที่ใกล้ ๆ กับขอบของไดอะแฟรม โดยจากการศึกษามาแล้วพบว่าจะมีค่าความไวมากกว่าบริเวณกึ่งกลางไดอะแฟรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วงจรกำเนิดความถี่ (oscillator)

วงจรออสซิลเลเตอร์ คือวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยปราศจากอินพุต ซึ่งลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมานั้นเรียกว่า “รูปคลื่น” วงจรออสซิลเลเตอร์ที่แตกต่างกันออกไปนั้นจะให้สัญญาณเอาต์พุต หรือรูปคลื่น แตกต่างกันมีทั้งคลื่นรูปไซน์ (sine waves) คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (square waves) คลื่นรูปสามเหลี่ยม (triangular waves) และคลื่นรูปฟันเลื่อย (sawtooth waves) ดังนั้นจึงใช้ออสซิลเลเตอร์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ

พื้นฐานการทำงานของออสซิลเลเตอร์จะใช้หลักการของการป้อนกลับแบบบวก (positive feedback) คือส่วนหนึ่งของสัญญาณเอาต์พุต จะถูกป้อนกลับไปยังอินพุต ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเสริมสัญญาณด้วยตัวมันเอง ดังนั้น จึงทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีความต่อเนื่องเรื่อย ๆ จึงมีการใช้ออสซิลเลเตอร์กันอย่างกว้างขวางในระบบการสื่อสารต่าง ๆ ในอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น โทรศัพท์ วิทยุ ฯลฯ รวมถึงระบบดิจิทัล เช่น คอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นตัวให้กำเนิดความถี่และสัญญาณเวลาตามที่ต้องการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของวงจรออสซิลเลเตอร์โดยทั่วไป จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์ ที่สร้างจากทรานซิสเตอร์ โครงสร้างแบบ MOISFET

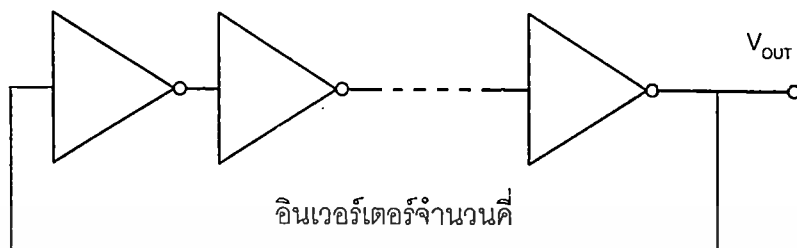
หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์เป็นวงจรที่ให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซ้ำ ๆ กันเป็นเอาต์พุต ด้วยการจ่ายแรงดัน DC ที่เสมือนกับเป็นอินพุตตัวหนึ่ง โดยที่ไม่ต้องการให้สัญญาณอินพุตเข้าไปเลย ซึ่งแรงดันเอาต์พุตสามารถเป็นได้ทั้ง sinusoidal และ nonsinusoidal ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์คือวงจรกำเนิดความถี่ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โดยรูปแบบของวงจรออสซิลเลเตอร์คือการนำเอาวงจรอินเวอร์เตอร์มาต่ออนุกรมกันเป็นจำนวนคี่โดยนำเอาสัญญาณเอาต์พุตป้อนกลับเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรดังแสดงดังภาพที่ 22 การกระทำเช่นนี้จะทำให้วงจรเกิดการออสซิลเลตขึ้นมาได้โดยที่ไม่ต้องมีสัญญาณอินพุตจากภายนอกเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 22



แสดงวงจรพื้นฐานของวงจรริงออสซิลเลเตอร์

จากภาพถ้าอินพุตที่เข้าที่อินเวอร์เตอร์ชุดแรกมีแรงดันไฟฟ้าสูง ดังนั้นเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชุดแรกที่ป้อนเข้าไปยังอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชุดที่สอง จะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำ และเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชุดที่สองก็จะป้อนสัญญาณเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ชุดต่อไปจนถึงอินเวอร์เตอร์ชุดสุดท้ายซึ่งจะมีสัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำซึ่งตรงกันข้ามกับสัญญาณอินพุตที่เข้ามาที่อินเวอร์เตอร์ชุดแรก จากนั้นทำการป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชุดสุดท้ายไปยังอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชุดแรกซึ่งก็จะมี การส่งผ่านสัญญาณลักษณะเช่นนี้ต่อเนื่องกันไปตลอดเวลา ดังนั้น จึงพบว่าเกิดการออสซิลเลชันขึ้นมาได้

วงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET

ในการออกแบบวงจรรวมริงออสซิลเลเตอร์นั้น ต้องทำการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่นำมาประกอบเป็นวงจร ซึ่งต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของริงออสซิลเลเตอร์นั้นด้วย ดังนั้น ในส่วนแรกจะกล่าวถึงหลักการของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากนั้นจึงจะกล่าวถึงวงจรริงออสซิลเลเตอร์ต่อไป

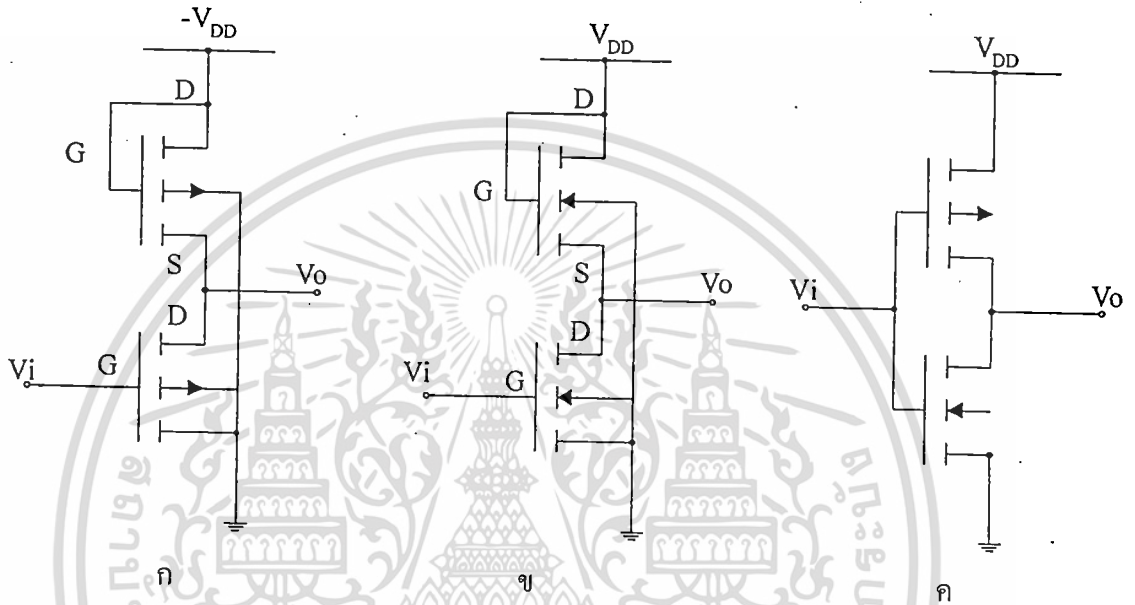
วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET

มอสอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรรวมเบื้องต้น ที่มีประกอบรวมอยู่ในวงจรรวมอื่น ๆ อยู่เสมอ โดยตัววงจรจะประกอบด้วยมอสเฟต 2 ตัวคือ มอสตัวโหนด และมอสตัวขับเคลื่อน ซึ่งมอสเฟตทั้งสองตัวนี้จะ เป็นแบบแซนแนลเหมือนกันหรือต่างกันได้ ถ้าใช้มอสเฟตชนิด PMOSFET ทั้งสองตัวจะเรียกว่า มอสอินเวอร์เตอร์แบบพีแซนแนลซึ่งมีวงจรแสดงดังในภาพที่ 23 ก หรือถ้าเป็นมอสเฟตชนิด NMOSFET ทั้งสองตัวจะเรียกว่ามอสอินเวอร์เตอร์แบบเอ็นแซนแนล ซึ่งมีวงจรแสดงดังในรูปที่ 23 ข และถ้าแซนแนลต่างกันจะเรียกเป็นมอสอินเวอร์เตอร์แบบซีมอส ซึ่งมีวงจรแสดงดังในภาพที่ 23 ค สำหรับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสตัวโหนดจะแตกต่างไปจาก มอสตัวขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

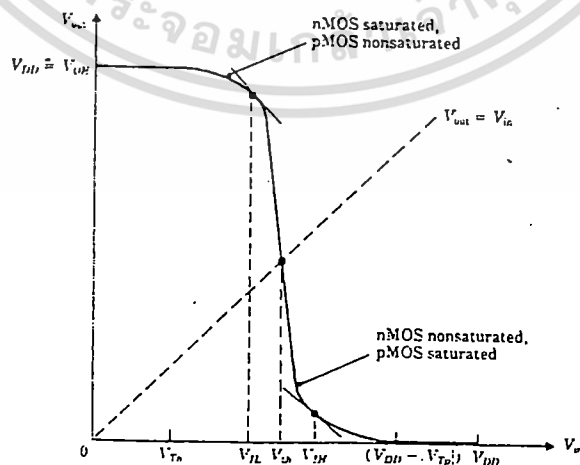
โดยมอสโหนดจะต้องมีค่าความต้านทานของเซนแนลสูงกว่ามอสตัวขับ จึงจะได้คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ที่ดี

ภาพที่ 23



แสดงวงจรมอสอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ (ก) มอสอินเวอร์เตอร์แบบพีเซนแนล (ข) มอสอินเวอร์เตอร์แบบเอ็นเซนแนล (ค) มอสอินเวอร์เตอร์แบบซีมอส

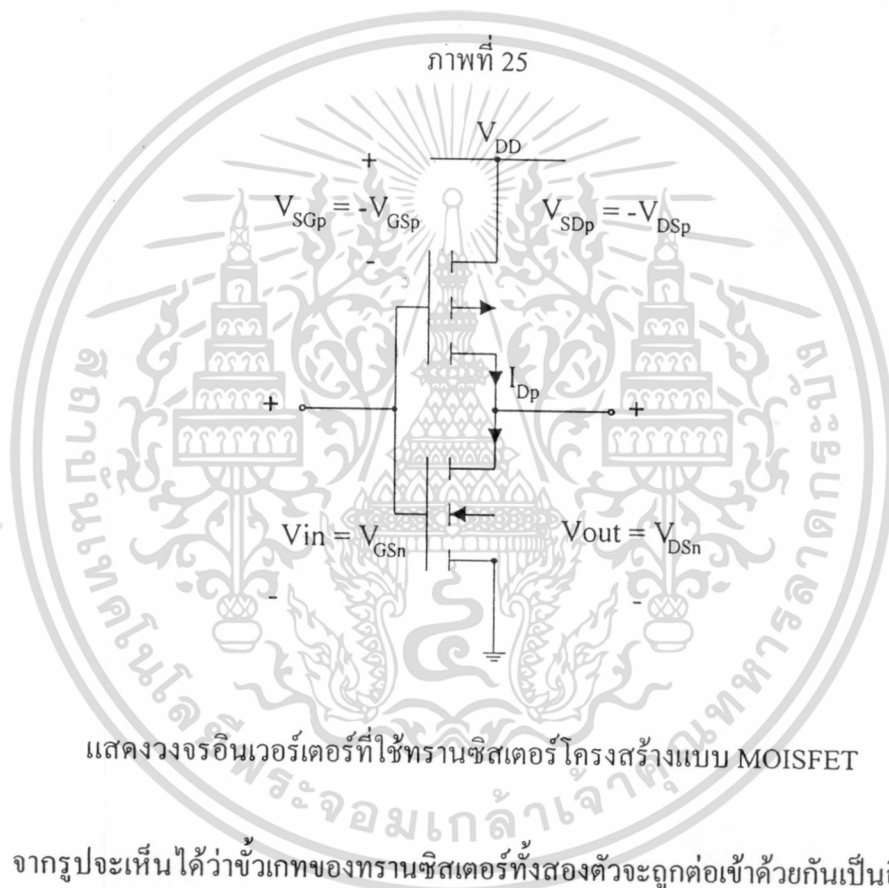
ภาพที่ 24



แสดงคุณสมบัติโดยทั่ว ๆ ไป ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของมอสอินเวอร์เตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเบเซบระโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของมอสอินเวอร์เตอร์ จะให้ระดับแรงดันไฟฟ้าทางเอาต์พุต(V_{out}) ตรงกันข้ามกับทางอินพุต(V_{in}) เช่นถ้าอินพุตมีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำทางเอาต์พุตจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงคั่งแสดงในภาพที่ 24

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เฉพาะมอสอินเวอร์เตอร์แบบซีมอส ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET โดยวงจรจะประกอบด้วย PMOISFET เป็นมอยซ์ต์ัวโหลด และ NMOISFET เป็นมอยซ์ต์ัวขับเคลื่อนแสดงในภาพที่ 25



แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET

จากรูปจะเห็นได้ว่าขั้วเกตของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวจะถูกต่อเข้าด้วยกันเป็นอินพุตโดยที่แรงดันอินพุตกำหนดได้ดังนี้

$$V_{in} = V_{GSn} = V_{DD} - V_{SGp} \quad (2.1)$$

ในขณะเดียวกันในการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง (V_{DD}) ที่สูงกว่าค่าแรงดันอ้างอิง (GND) จะทำให้ขั้วของทรานซิสเตอร์ชนิดพีที่ต่ออยู่กับแรงดันไฟเลี้ยงคือขั้วซอส ดังนั้นขั้วที่เหลือของ PMOISFET จึงเป็นขั้วเดรน และในทำนองเดียวกันขั้วทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นที่ต่อกับกราวด์ ก็เป็นขั้วซอสและขั้วที่ต่อกับทรานซิสเตอร์ชนิดพีเป็นขั้วเดรน โดยถูกกำหนดให้เป็นแรงดันเอาต์พุตดังนี้

$$V_{out} = V_{DSn} = V_{DD} - V_{SDp} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET และทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET ในวงจรมีค่าอัตราขยายและแรงดันขีดเริ่มเป็น β_n , β_p , V_{Tn} และ V_{Tp} ตามลำดับ การวิเคราะห์หาค่าแรงดันที่จุดต่าง ๆ ของกราฟ การส่งผ่านสัญญาณแรงดันในภาพที่ 24 พิจารณาได้ดังนี้คือ เมื่อ $V_{in} < V_{Tn}$ ขณะนี้ทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET กำลังอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลผ่าน ทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET แต่ขณะนี้ทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET เกิดขึ้นกลับบริเวณช่องทางเดินกระแสแล้วและกำลังทำงานในช่วงอิมิตัว ดังนั้นค่าแรงดันขาออกของวงจรมีค่าดังสมการที่ 2.3

$$V_{OUT} = V_{OH} = V_{DD} - V_{SD(P)} = V_{DD} \quad (2.3)$$

เมื่อ V_{in} เพิ่มสูงมากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET เล็กน้อยจะทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มทำงานในช่วงอิมิตัว และทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET กำลังเข้าสู่การทำงานในช่วงไม่อิมิตัวและในขณะนี้มีกระแสไหลผ่านวงจรเนื่องจากทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET เริ่มนำกระแสแล้ว และเมื่อพิจารณาจากวงจรพบว่า กระแสที่ไหลในวงจรคือ ค่ากระแสเดรนจากทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET ผ่านไปยังทรานซิสเตอร์ NMOISFET ดังนั้นกระแสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองจึงมีค่าเท่ากัน และถ้าคิดว่าไม่มีกระแสรั่วจากทรานซิสเตอร์ทั้งสองแล้ว จะได้

$$(\beta_n/2)(V_{in} - V_{Tn})^2 = (\beta_p/2)[2(V_{DD} - V_{in} - V_{Tp})(V_{DD} - V_{out}) - (V_{DD} - V_{out})^2] \quad (2.4)$$

เมื่อถึงจุดนี้ค่าแรงดันขาออกของวงจรจะมีค่าลดลงจนถึงจุด $(V_{DD} - V_{out}) > (V_{DD} - V_{in} - V_{Tp})$ ทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองทำงานในสภาวะอิมิตัวพร้อมกัน เรียกจุดนี้ว่าจุดเปลี่ยนสถานะของวงจร (Threshold voltage ; V_T) ในช่วงนี้กระแสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองยังคงเท่ากันดังนั้น

$$(\beta_n/2)(V_{in} - V_{Tn})^2 = (\beta_p/2)(V_{DD} - V_{in} - V_{Tp})^2 \quad (2.5)$$

เมื่อแรงดันขาออกมีค่าลดลงจนถึงจุด $V_{out} < V_{in} - V_{Tn}$ ทรานซิสเตอร์ NMOISFET จะทำงานในช่วงไม่อิมิตัว และทรานซิสเตอร์ PMOISFET จะทำงานในช่วงอิมิตัว ดังนั้น

$$(\beta_n/2)[2(V_{in} - V_{Tn})V_{out} - V_{out}^2] = (\beta_p/2)(V_{DD} - V_{in} - V_{Tp})^2 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนกระทั่งแรงดันขาเข้าของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุด $(V_{DD} - V_{in}) < V_{Tp}$ แล้วทรานซิสเตอร์ PMOSFET จะเข้าสู่สภาวะหยุดนำกระแส ดังนั้นกระแสที่ไหลในวงจรจึงเป็นศูนย์ ทำให้ค่าแรงดันขาออกมีค่าดังสมการที่ 2.7

$$V_{out} = V_{oL} = V_{DS(n)} = 0 \quad (2.7)$$

จากการวิเคราะห์วงจรจะพบว่า วงจรจะมีกระแสไหลผ่านเมื่อทรานซิสเตอร์ทั้งสองของวงจรมีค่ากำลังนำกระแสพร้อม ๆ กันซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ CMOS และในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์จะพิจารณาจุดที่วงจรเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นสำคัญ เนื่องจากในทางทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์แล้วข้างต้นพบว่า ค่าแรงดันขาออกสถานะสูงและค่าแรงดันขาออกสถานะต่ำของวงจรมีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟเลี้ยงและค่าแรงดันกราวด์ตามลำดับ และค่าแรงดันการเปลี่ยนแปลงของวงจรตามคำนิยามในบทที่ 1 จะพิจารณาที่จุด $V_{in} = V_{out} = V_{th}$ ของวงจร ดังนั้นในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองกำลังทำงานในช่วงอิมิตัวดังสมการที่ 2.5 เมื่อแทนค่า $V_{in} = V_{out} = V_{th}$ ลงในสมการแล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$V_{th} = \frac{V_{Tn} + \sqrt{(\beta_p / \beta_n)(V_{DD} - V_{Tp})}}{1 + (\beta_p / \beta_n)} \quad (2.8)$$

คุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราว (Transient Response) ^[16]

ช่วงสัญญาณชั่วคราว (Transient) คือค่าเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณเอาต์พุต เช่น จากแรงดันสูง (V_{OH}) เป็นแรงดันต่ำ (V_{OL}) หรือจากแรงดันต่ำเป็นแรงดันสูง ดังแสดงในภาพที่ 26 จากภาพที่ 26 ก เมื่อแรงดันอินพุตคือแรงดันสูง (V_{OH}) ทรานซิสเตอร์ NMOISFET จะทำงานขณะที่ PMOSFET จะไม่ทำงาน ซึ่งจะได้สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนจากแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำ กรณีนี้ ตัวเก็บประจุที่เอาต์พุต (C_{out}) จะถูกคายประจุด้วยค่าเวลาคงที่ t_{HL} หรือเรียกว่า Fall time ซึ่งขึ้นกับมอสตัวขับ ซึ่งในที่นี้คือ NMOISFET เมื่อกำหนดให้ t_{HL} เป็นค่าเวลาการคายประจุจาก V_1 (ที่จุด 90 %) ไปยัง V_0 (ที่จุด 10 %) ซึ่งสามารถหาค่า t_{HL} ได้ดังสมการ

$$t_{HL} = \tau_n \left\{ \frac{2V_{Tn}}{(V_1 - V_{Tn})} + \ln \left[\frac{2(V_1 - V_{Tn})}{V_0} - 1 \right] \right\} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

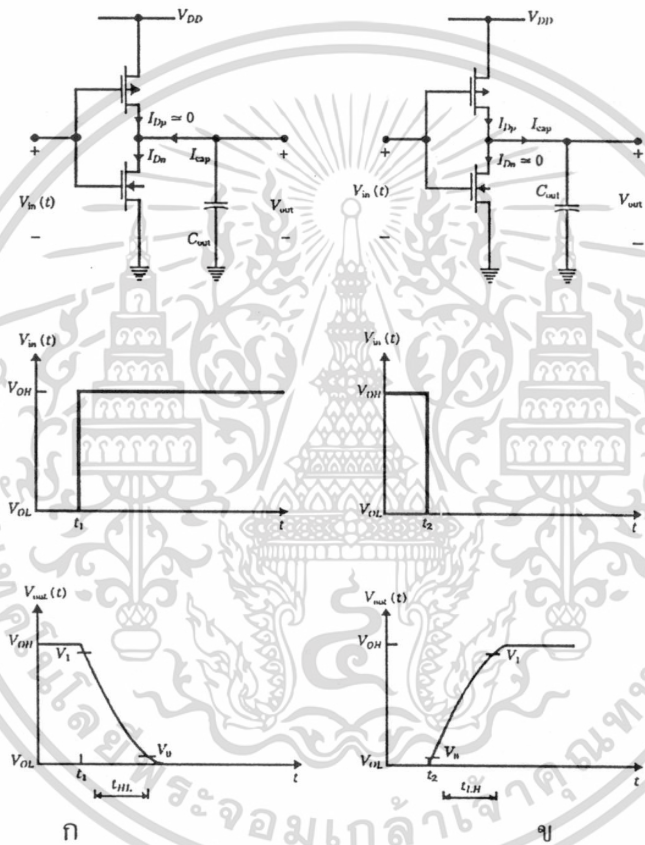
โดยที่

$$\tau_n = \frac{C_{out}}{\beta_n (V_1 - V_{Tn})} \tag{2.10}$$

เมื่อ β_n เป็นอัตราขยายของ NMOISFET

V_{Tn} เป็นค่าแรงดันขีดเริ่มของ NMOISFET

ภาพที่ 26



แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราว (ก) การดิสรจาร์จ (ข) การชาร์จ

จากภาพที่ 26 ข กรณีที่สัญญาณอินพุตเปลี่ยนเป็นแรงดันต่ำ (V_{OL}) จะได้ว่าทรานซิสเตอร์ NMOISFET ไม่ทำงานแต่ PMOISFET จะทำงาน ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุ (C_{out}) จะถูกชาร์จด้วยค่าเวลาคงที่ t_{LH} หรือเรียกว่า Rise time หรือจะได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนจากแรงดันต่ำเป็นแรงดันสูง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมอดูลคือ PMOISFET ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ t_{LH} เป็นค่าเวลาการชาร์จจาก V_0 (ที่จุด 10%) ไปยัง V_1 (ที่จุด 90%) ซึ่งสามารถหาค่า t_{LH} ได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_{LH} = \tau_P \left\{ \frac{2|V_{TP}|}{(V_1 - |V_{TP}|)} + \ln \left[\frac{2(V_1 - |V_{TP}|)}{V_O} - 1 \right] \right\} \quad (2.11)$$

โดยที่
$$\tau_P = \frac{C_{out}}{\beta_P (V_1 - |V_{TP}|)} \quad (2.12)$$

เมื่อ β_P เป็นอัตราขยายของ PMOSFET

V_{TP} เป็นค่าแรงดันขีดเริ่มของ PMOSFET

เวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation delay time) หรือเวลาหน่วง ¹⁶¹

Propagation delay time คือ เวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราวอีกแบบหนึ่งที่วัด จากขอบของแรงดันอินพุตไปยังจุดที่ สัญญาณเอาต์พุตเป็น 50 % หรือที่

$V_{OUT} = \frac{1}{2} (V_{OL} + V_{OH}) = V_{OH/2}$ โดยที่ทำการแบ่งค่าเวลาออกเป็น 2 ช่วงเช่นเดียวกันคือ

t_{PHL} และ t_{PLH} ซึ่ง t_{PHL} เป็นค่าเวลาการดีสชาร์จจาก V_{OH} ลงมาสู่ $V_{OH/2}$ และ t_{PLH} เป็นค่าเวลาการชาร์จของ C_{out} จาก V_{OL} ขึ้นไปสู่ $V_{OH/2}$ โดยสามารถคำนวณค่า t_{PHL} และ t_{PLH} ได้ดังสมการ

$$t_{PHL} = \tau_n \left\{ \frac{2V_{Tn}}{(V_{OH} - V_{Tn})} + \ln \left[\frac{4(V_{OH} - V_{Tn})}{(V_{OH} + V_{OL})} - 1 \right] \right\} \quad (2.13)$$

$$t_{PLH} = \tau_P \left\{ \frac{2|V_{TP}|}{(V_{OH} - |V_{TP}|)} + \ln \left[\frac{4(V_{OH} - |V_{TP}|)}{(V_{OH} + V_{OL})} - 1 \right] \right\} \quad (2.14)$$

จะเห็นว่าค่า t_{PHL} จะขึ้นอยู่กับทรานซิสเตอร์ชนิด NMOSFET ส่วน t_{PLH} จะขึ้นอยู่กับ PMOSFET และจากสมการ (2.13) และ (2.14) จะทำให้หาค่าเฉลี่ยของเวลาหน่วง (average propagation delay time) ได้ดังนี้

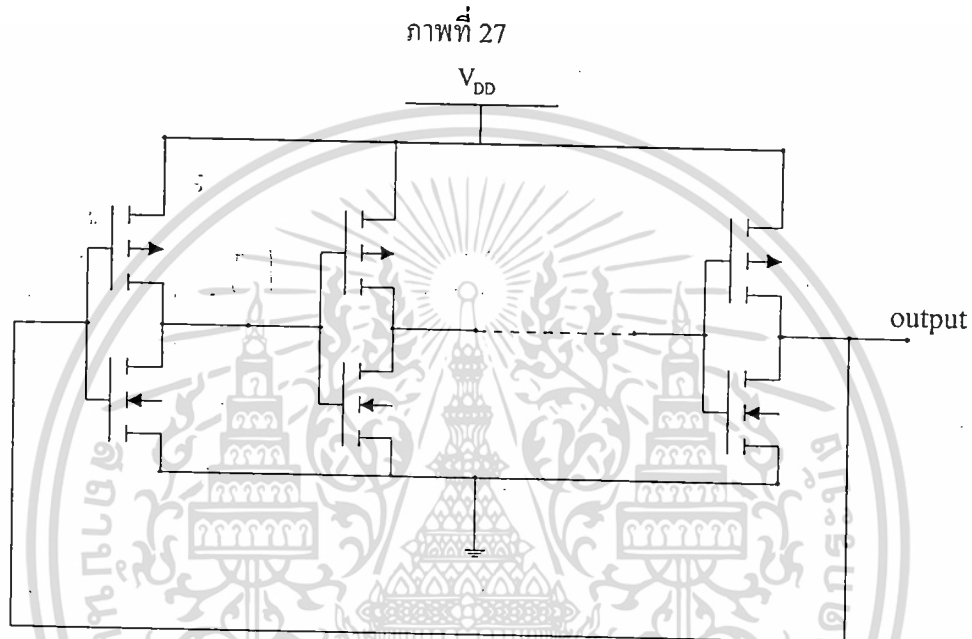
$$t_P = \frac{1}{2} (t_{PHL} + t_{PLH}) \quad (2.15)$$

ค่าเวลา t_P นี้จะเป็นตัวที่ใช้แสดงคุณลักษณะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CMOIS ริงออสซิลเลเตอร์²¹

วงจรริงออสซิลเลเตอร์ คือวงจรกำเนิดความถี่ชนิดหนึ่ง ลักษณะของวงจรจะประกอบด้วย วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกันเป็นวง โดยที่มีจำนวนของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นจำนวนคี่ แล้วนำสัญญาณ เอาท์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดสุดท้ายป้อนกลับเป็นสัญญาณขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ดัง แสดงในภาพที่ 27



แสดงวงจรริงออสซิลเลเตอร์ โครงสร้างแบบ CMOIS

จากภาพ การใช้งานจะทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงแก่วงจรค่าหนึ่งและวงจรจะกำเนิดสัญญาณ ความถี่ออกมา จุดเริ่มต้นของการทำงานของวงจรคือ จุดที่แรงดัน V_{SG} ของทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET ของวงจรอินเวอร์เตอร์ สูงกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET นั้น (แรงดันขาเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ทุกชุดมีค่าเป็นศูนย์เมื่อเริ่มพิจารณา) เมื่อทรานซิสเตอร์ ชนิด PMOISFET ของวงจรอินเวอร์เตอร์ทุกชุดนำกระแสในขณะที่ทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET ของวงจรอินเวอร์เตอร์ทุกชุดเช่นเดียวกัน ยังไม่นำกระแส ดังนั้นค่าแรงดันขาออกของวงจร อินเวอร์เตอร์ทุกชุดที่ประกอบเป็นวงจรริงออสซิลเลเตอร์จะมีสถานะสูง และค่าแรงดันขาออก ของวงจรชุดที่ 1 นี้จะทำให้แรงดันขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 มีค่าเป็นศูนย์ โดยใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะเท่ากับเวลาหน่วง (propagation delay time) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 และส่ง ผลต่อแรงดันขาออกต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ในสถานะต่อ ๆ ไปจนถึงวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดสุดท้าย และในขณะที่วงจรอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ส่งสถานะสัญญาณขาออกของวงจรไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดที่ 2 ให้ทำงาน วงจรอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ก็จะถูกวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดสุดท้ายส่งสถานะสัญญาณขาออกสถานะสูงมาที่สัญญาณขาเข้าของวงจรด้วย ดังนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์ ชุดที่ 1 จึงเกิดการเปลี่ยนสถานะในทันทีที่วงจรส่งสถานะสัญญาณขาออกไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าแรงดันขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดเลขที่ จะมีค่าแรงดันตรงกันข้ามกับแรงดันขาเข้าของวงจรชุดที่ 1 เมื่อวงจรอินเวอร์เตอร์ทุกชุดทำงานตามสถานะที่ส่งมาจากวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ครบเรียบร้อยแล้ว ค่าแรงดันขาออกของวงจรจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเกิดเป็นสัญญาณความถี่ค่าหนึ่ง

ค่าความถี่ของวงจรที่ได้ออกมาสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้คือ สัญญาณขาออกสถานะสุดท้ายของวงจรริงออสซิลเลเตอร์จะช้ากว่าสัญญาณขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ในชุดที่ 1 เท่ากับช่วงเวลาหน่วงสัญญาณของวงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดรวมกัน กล่าวคือ

$$T_{\text{total}} = Nt_p \quad (2.16)$$

โดยที่ T_{total} คือค่า propagation delay time ของวงจรริงออสซิลเลเตอร์
 N คือจำนวนชุดของวงจรอินเวอร์เตอร์
 t_p คือค่า propagation delay time ของวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 ชุด

ค่าเวลา T_{total} ที่กล่าวนี้คือค่าเวลาที่สัญญาณขาออกของวงจรริงออสซิลเลเตอร์เปลี่ยนแปลงจากสถานะสูงไปเป็นสถานะต่ำ หรือเปลี่ยนแปลงจากสถานะต่ำไปเป็นสถานะสูง ซึ่งค่าความต่างเฟสของสัญญาณขาออกมีค่า 180 องศา ดังนั้นเวลาที่สัญญาณขาออกเปลี่ยนแปลงไปครบ 360 องศา คือ $2T_{\text{total}}$ จะได้ค่าความถี่ของสัญญาณขาออกของวงจรริงออสซิลเลเตอร์มีค่า

$$f = (2T_{\text{total}})^{-1} \quad (2.17)$$

ในการออกแบบวงจรริงออสซิลเลเตอร์จึงต้องทำการออกแบบให้วงจรมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่เทคโนโลยีจะอำนวยให้ การออกแบบให้ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวในวงจรมีค่าอัตราขยายสูงเพื่อจ่ายประจุแก่ตัวเก็บประจุที่แฝงในวงจรได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ถ้าคำนึงถึงความสมมาตรของสัญญาณขาออกของวงจรระหว่างช่วงเวลาในการเปลี่ยนแปลงสถานะสูงไปสถานะต่ำ หรือช่วงเวลาในการเปลี่ยนสถานะต่ำไปสถานะสูงให้มีค่าเท่ากัน นั่นคือ จะต้องออกแบบให้จุดเปลี่ยนแปลง

สถานะของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบเป็นวงจรรีจอสวิตเตอร์เปลี่ยนแปลงที่จุดกึ่งกลางของแรงดันไฟเลี้ยงนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง CMOIS ริงออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมด้วยความดัน

การออกแบบต้นแบบ จะต้องพิจารณาโครงสร้างและทฤษฎีของ MOISFET โดยเริ่มต้นจากการกำหนดคุณสมบัติของ MOISFET ที่นำมาสร้างเป็นวงจรรวมแบบอินเวอร์เตอร์ แล้วจึงนำ วงจรอินเวอร์เตอร์ ที่ได้มาออกแบบต่อเป็นวงจรริงออสซิลเลเตอร์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการออกแบบโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการกำหนดขนาดชิปฐานรอง การกำหนดขนาด ความหนา และการวางตัวของ ไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนชิปฐานรอง การกำหนดขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส PMOISFET และ NMOISFET การกำหนดการวางตัวของ MOISFET ชนิดของ MOISFET และจำนวนของ MOISFET บน ไดอะแฟรม การกำหนดทิศทางการไหลของกระแสของ MOISFET เมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรม และการกำหนดขนาดและตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า (aluminium pad)

เมื่อได้สไลด์ลายต้นแบบแล้วจึงนำไปผลิตเป็นกระจกมาสก์ (photographic masks) โดยการถ่ายย่อส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างบนผลึกซิลิกอน ซึ่งกระบวนการสร้างจะเริ่มต้นจากการเลือกชนิดความหนา และพิกัดความต้านทานของผลึกฐานรองซิลิกอน หลังจากนั้นจะนำแผ่นผลึกเข้าไปในกระบวนการสร้างที่เป็นลำดับขั้นตอนที่แน่นอนเช่น การทำความสะอาดแผ่นผลึกเริ่มแรก กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ กระบวนการกัดฐานรองเพื่อสร้างไดอะแฟรม กระบวนการแพร่สารเจือ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี กระบวนการแพร่ทองคำ กระบวนการการเมทัลไลเซชัน เป็นต้น ซึ่งเมื่อจบขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้ แล้วจึงนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของ MOISFET ทดสอบคุณสมบัติของวงจรรวมอินเวอร์เตอร์ และทดสอบคุณสมบัติของวงจรรวมออสซิลเลเตอร์ที่ทำการสร้างขึ้น ก่อนที่จะนำไปตัดแยกออกเป็นชิ้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ชิพ หรือคาย (chip or die) แล้วนำไปทำการเก็บบรรจุเพื่อที่จะทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรวมความดันต่อไป

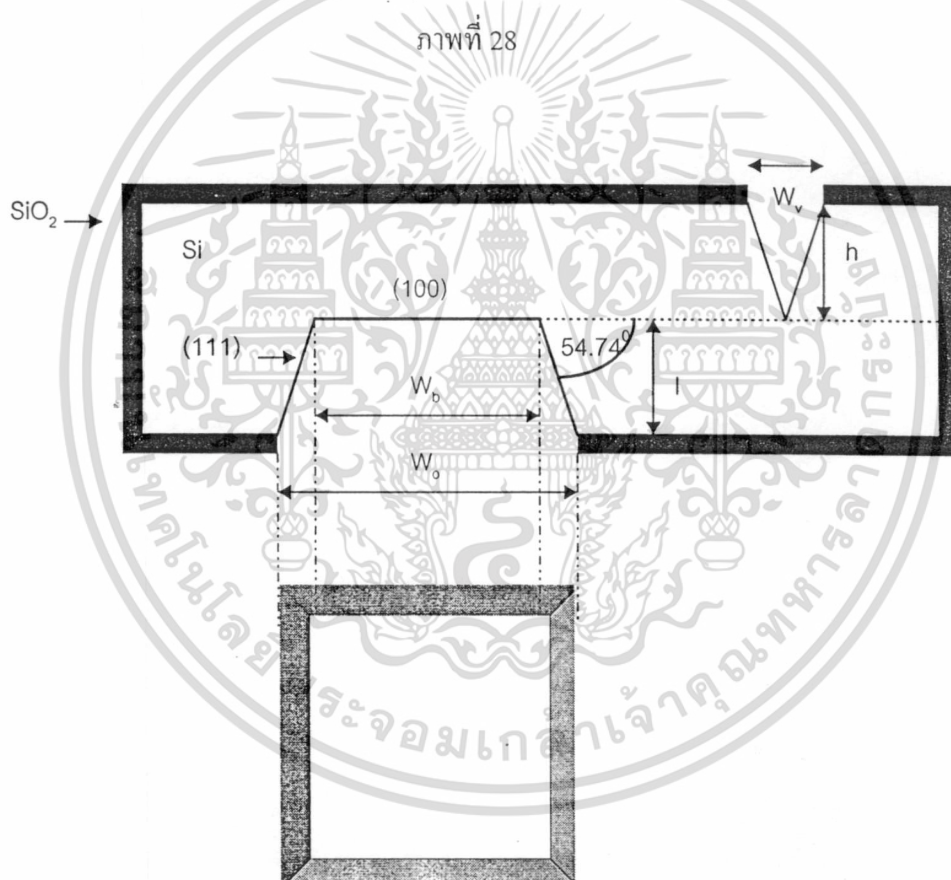
ดังนั้นจากที่กล่าวมาสามารถลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างวงจรรวมออสซิลเลเตอร์ที่ ควบคุมความถี่ด้วยความดัน โครงสร้างแบบ CMOIS ได้ดังนี้คือ

1. การออกแบบและผลิตกระจกต้นแบบ
2. กระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก
3. กระบวนการแอสแซมบลีและการเก็บบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบไดอะแฟรม

ไดอะแฟรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของซิลิกอนซึ่งเกิดจากการกัดฐานรองซิลิกอนระนาบ (100) ในสารละลายซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก^[17] ให้เป็นไดอะแฟรมบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดย มีผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) โดยต้นแบบของไดอะแฟรมได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) หลุมที่เกิดจากการกัดจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยจะต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมจัตุรัสนาน



แสดงรายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิกอนระนาบ (100)หรือตั้งฉากกับทิศทาง [110] ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

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

$$\approx w_0 - \sqrt{2}l \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ W_0 คือ ขนาดของต้นแบบ

W_0 คือ ขนาดของไดอะแฟรมหลังการกัด

l คือ ความลึกของไดอะแฟรม

ในการควบคุมความหนาของไดอะแฟรมจะใช้เทคนิคร่องตัววี และใช้แสงเป็นมอโนเตอร์ ดังในภาพที่ 28 โดยจะสามารถคำนวณความลึกร่องตัววีดังสมการต่อไปนี้

$$W_v \equiv \sqrt{2h} \quad (3.2)$$

W_v คือ ขนาดของต้นแบบ

h คือ ร่องตัววีหรือคือความหนาของไดอะแฟรม

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดค่าความหนาของไดอะแฟรมเป็น 20 ไมโครเมตร โดยต้องการให้ขนาดของช่องไดอะแฟรมหลังการกัดมีขนาด 1000×1000 ไมโครเมตร หรือค่า $W_0 = 1000$ เมื่อใช้แผ่นฐานรองซิลิกอนหนา 400 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขนาดไดอะแฟรมต้นแบบ (W_0) จากสมการ 3.1 ซึ่งได้เป็น 1532 ไมโครเมตร

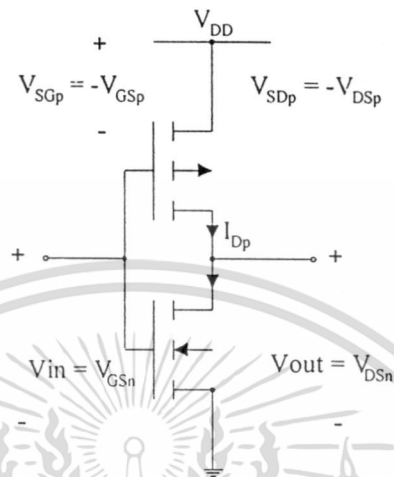
การออกแบบวงจรรีจิสเตอร์บนไดอะแฟรม¹⁸¹

จากที่กล่าวมาแล้วว่าวงจรรีจิสเตอร์ประกอบไปด้วยวงจรรีจิสเตอร์ที่ต่อเข้าด้วยกันเป็นจำนวนที่ ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรีจิสเตอร์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ที่ประกอบเป็นวงจรได้รับความดันสูงขึ้น โดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการหาคือคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราวของวงจร

วงจรรีจิสเตอร์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมีโครงสร้างประกอบด้วย MOISFET สองตัว คือ PMOISFET เป็นมอยซ์ตัวโหลด และ NMOISFET เป็นมอยซ์ตัวขับ ดังแสดงในภาพที่ 29 โดยที่ MOISFET แต่ละตัวจะถูกออกแบบให้มีขนาดของโครงสร้างทางเรขาคณิตดังนี้คือ กำหนดให้ความกว้างของช่องทางเดิน กระแส (W) และความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) ของ PMOISFET มีค่าเป็น 60 และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ และกำหนดให้ความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) และความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) ของ NMOISFET มีค่าเป็น 120 และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 29



แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์

จากภาพจะเห็นว่าขั้วเกทของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวจะถูกต่อเข้าด้วยกันเป็นอินพุท โดยที่แรงดันอินพุทกำหนดได้ดังนี้

$$V_{in} = V_{GSn} = V_{DD} - V_{GSp} \quad (3.3)$$

ในขณะที่เดียวกันขั้วเดรนของทรานซิสเตอร์ทั้งสองก็ถูกต่อเข้าด้วยกัน โดยกำหนดแรงดันเอาต์พุทเป็นดังนี้

$$V_{out} = V_{DSn} = V_{DD} - V_{SDp} \quad (3.4)$$

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแอกวางบนไดอะแฟรม

ทำการออกแบบโดยการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มี NMOISFET แยกวางไว้บนส่วน ที่เป็นไดอะแฟรม ซึ่งแบ่งการวางตัว NMOISFET ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของ ไดอะแฟรมและขนานกับขอบของไดอะแฟรม ซึ่งในการวางตัว NMOISFET บนไดอะแฟรมที่มีทิศทางการไหลของกระแสต่างกัน ก็จะทำให้เมื่อมีความเค้นมากกระทำจะทำให้ค่าความคล่องตัวเปลี่ยนไป โดยจะได้รับการเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานที่ช่องทางเดินกระแสในแนวนอน และแนวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานของช่องทางเดินกระแสในแนวสัมผัส

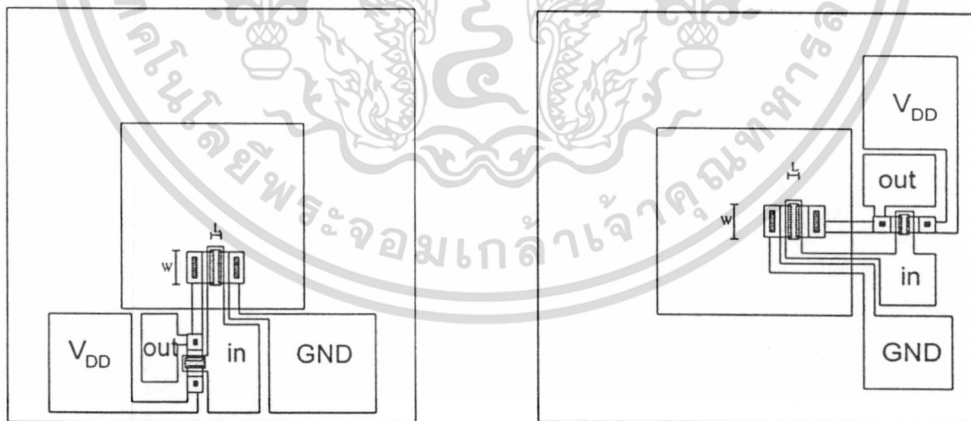
$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i = \pi_{\parallel} \sigma_i + \pi_{\perp} \sigma_i \quad (3.5)$$

การเปลี่ยนแปลง ของตัวต้านทานของช่องทางเดินกระแสในแนวรัศมี

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r = \pi_{\parallel} \sigma_p + \pi_{\perp} \sigma_i \quad (3.6)$$

ในการออกแบบจะทำการวาง NMOISFET ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร และมีค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) เป็น 120 ไมโครเมตร และความยาวของทางเดินกระแส (L) เป็น 20 ไมโครเมตร วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบจะแสดงดังในภาพที่ 30 และ ภาพที่ 31 แสดงภาพตัดขวางของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการแยกวาง NMOISFET ไว้บนไดอะแฟรม

ภาพที่ 30



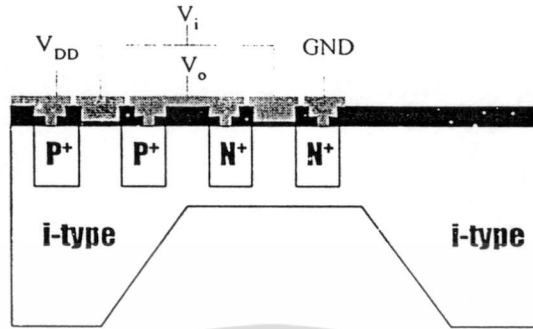
ก

ข

แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำการแยกวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 31



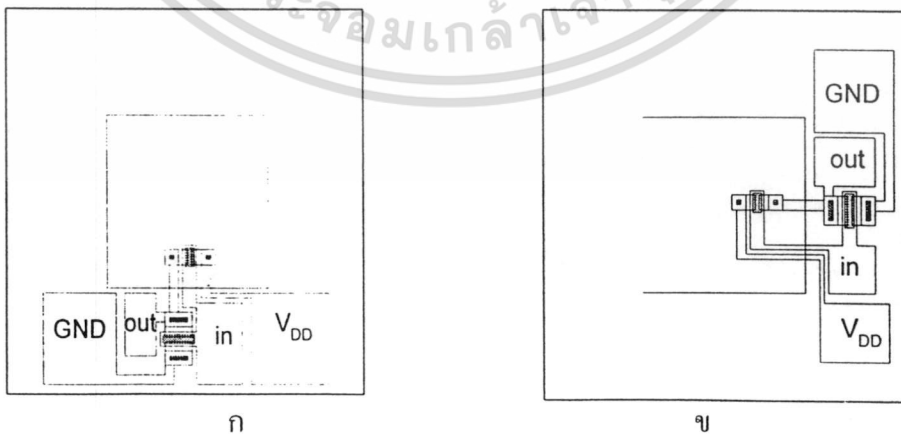
แสดงภาพตัดขวางของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่ทำการแยก NMOISFET วางไว้บนไดอะแฟรม

วงจรรินเวอร์เตอร์ที่มีทรานซิสเตอร์ชนิดพีแยกวางบนไดอะแฟรม

ทำการออกแบบโดยสร้างวงจรรินเวอร์เตอร์ให้มี PMOISFET แยกวางไว้บนส่วนที่เป็นไดอะแฟรม ซึ่งแบ่งการวางตัว PMOISFET ให้มีทิศทางกระแสไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมและขนานกับขอบของไดอะแฟรม

ในการออกแบบจะทำการวาง PMOISFET ห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร และมีความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) เป็น 60 ไมโครเมตร และความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) เป็น 20 ไมโครเมตร วงจรรินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบจะแสดงดังในภาพที่ 32 และภาพตัดขวางแสดงดังในภาพที่ 33

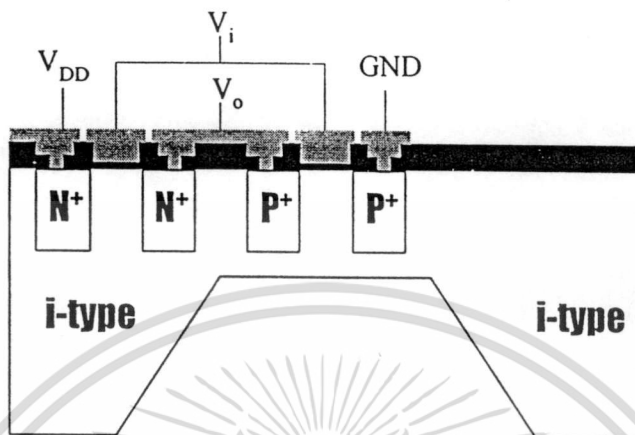
ภาพที่ 32



แสดงวงจรรินเวอร์เตอร์ที่ทำการแยกวาง PMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 33

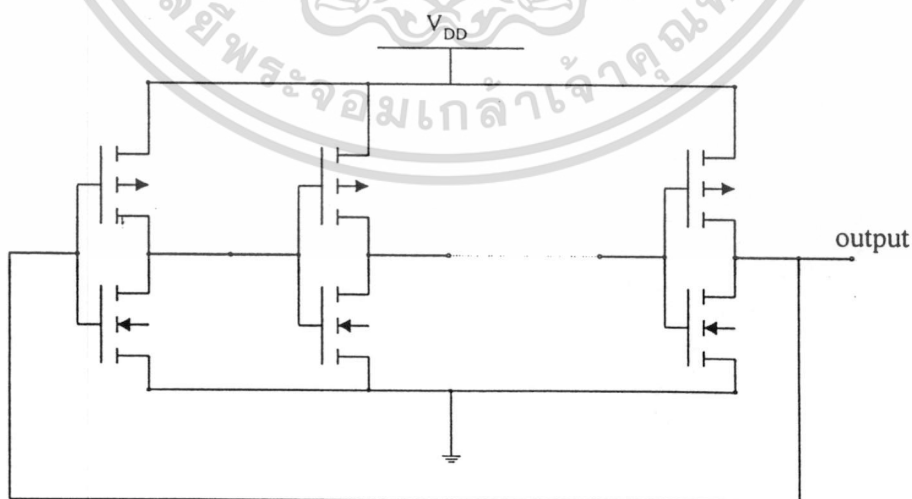


แสดงภาพตัดขวางของวงจรรวมอินเวอร์เตอร์ที่ทำจาก PMOSFET วางไว้บนไดอะแฟรม

การออกแบบริงออสซิลเลเตอร์บนไดอะแฟรม

วงจรรวมออสซิลเลเตอร์หรือวงจรถูกกำเนิดความถี่ ชนิดหนึ่งจะประกอบด้วยวงจรรวมอินเวอร์เตอร์ต่อกัน โดยที่จำนวนของวงจรรวมอินเวอร์เตอร์เป็นจำนวนคี่แล้ว นำสัญญาณของ ขาออกของวงจรรวมอินเวอร์เตอร์ ชุดสุดท้ายป้อนกลับเป็นสัญญาณขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ดังภาพที่ 34

ภาพที่ 34

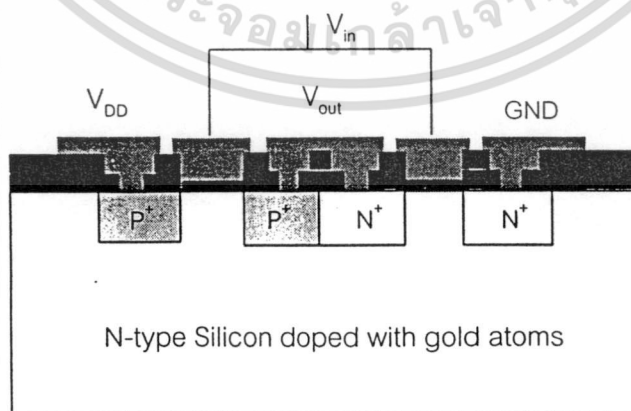


แสดงวงจรรวมออสซิลเลเตอร์โครงสร้างแบบ CMOIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบวงจรรวมเพื่อใช้ในการผลิตเพื่ออุตสาหกรรมนั้น จำเป็นต้องออกแบบวงจรให้มีความหนาแน่นอุปกรณ์สูง จึงจะทำให้ปริมาณของวงจรที่ใช้งานได้มีปริมาณมาก และในการทำให้วงจรมีความหนาแน่นของอุปกรณ์สูง นอกจากทำการลดขนาดของทรานซิสเตอร์ให้เล็กลงแล้ว การขยับเลื่อนทรานซิสเตอร์แต่ละชนิดแต่ละตัวในวงจรให้เข้ามาใกล้ชิดกันมากยิ่งขึ้นก็เป็นแนวทางหนึ่งในการทำให้วงจรมีความหนาแน่นของอุปกรณ์สูงเช่นกัน เนื่องจากฐานรองทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นและทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรวมด้วยโครงสร้าง คือ แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ดังนั้น NMOISFET และ PMOISFET จึงแยกออกจากกันด้วยช่วงปลอดประจุพาหะระหว่าง ขั้วเกรนหรือขั้วซอสกับฐานรอง ซึ่งเป็น รอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือชนิดพีกับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ไม่มีการต่อสัปดาห์ไฟฟ้าให้เท่านั้น แต่ถ้าทรานซิสเตอร์คู่ดังกล่าวต่อกันทางไฟฟ้า ดังภาพที่ 34 จุดที่เชื่อมต่อกันคือขั้วเกรนของทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นกับขั้วเกรนของทรานซิสเตอร์ชนิดพี โดยเชื่อมต่อกันด้วยโลหะที่ใช้ในการเดินลายวงจรและขั้วเกรนของทรานซิสเตอร์ทั้งสองยังแยกออกจากกันด้วยฐานรองชั้นเดียวกัน ดังนั้นถ้าเลื่อนขั้วเกรนของทรานซิสเตอร์ทั้งสองให้เข้ามาอยู่ชิดติดกัน ดังภาพที่ 35 จะทำให้ขั้วเกรนของทรานซิสเตอร์ทั้งสองถูกแยกจากกันด้วยช่วงปลอดประจุพาหะของรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี และช่วงปลอดประจุพาหะนี้จะไม่มีการกระทบใด ๆ ต่อวงจร เนื่องจากสัปดาห์ไฟฟ้าของขั้วเกรนของทรานซิสเตอร์ทั้งสองไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจากโครงสร้างภาพตัดขวางดังกล่าว ทำให้ทราบว่าไม่จำเป็นต้องเว้นระยะห่างระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดในการออกแบบ^[2] ซึ่งทำไม่ได้ในทรานซิสเตอร์ โครงสร้างแบบ CMOS ดังนั้นจึงลดพื้นที่ของวงจรรวมแบบ CMOIS ไปได้ส่วนหนึ่ง

ภาพที่ 35



แสดงภาพตัดขวางของ NMOISFET และ PMOISFET ที่มีขั้วของทรานซิสเตอร์ต่อกันหนึ่งคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบวงจรจริงออสซิลเลเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยจำนวนชุดของวงจรรีโอสซิลเลเตอร์มีค่าเป็น 3, 5, 7 และ 9 ชุด โดยมีค่าความกว้างและค่าความยาวของช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวที่ประกอบเป็นวงจรรีโอสซิลเลเตอร์คือ NMOISFET มีค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) 120 ไมโครเมตร ความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) 20 ไมโครเมตร ส่วน PMOISFET มีค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) 60 ไมโครเมตร ความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) 20 ไมโครเมตร

การวางตำแหน่งของทรานซิสเตอร์ของวงจรรีโอสซิลเลเตอร์บนไดอะแฟรม

ในการออกแบบจะทำการวาง MOISFET แต่ละตัวห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร โดยทำการออกแบบวางทรานซิสเตอร์แบ่งเป็นเงื่อนไขในแบบต่างๆ กัน ดังต่อไปนี้คือ

1. แยกวางทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET บนไดอะแฟรม โดยแปรค่าจำนวนของทรานซิสเตอร์ในแต่ละชุดของวงจรรีโอสซิลเลเตอร์ที่วางบนไดอะแฟรม ให้มีทิศทางการไหลของกระแสเป็นแบบขนานกับขอบของไดอะแฟรม และตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมด้วย โดยเงื่อนไขต่างๆแสดงดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

แสดงการออกแบบวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม

จำนวนชุดของ อินเวอร์เตอร์	จำนวนของทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET ที่แยกวางบนไดอะแฟรม			
	เมื่อวางให้ทิศทางการไหลของกระแสวิกขนานกับขอบของไดอะแฟรม		เมื่อวางให้ทิศทางการไหลของกระแสวิกตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	
3	1	3	1	3
5	1	5	1	5
7	1	7	1	7
9	1	9	1	9

ในกรณีนี้ระยะห่างระหว่าง NMOISFET ที่แยกวางบนไดอะแฟรม โดยเงื่อนไขเมื่อให้กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมระยะห่างมีค่าเป็น 40 ไมโครเมตร และเงื่อนไขเมื่อให้กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมระยะห่างมีค่าเป็น 80 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แยกวางทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET บนไดอะแฟรม โดยแปรค่าจำนวนของทรานซิสเตอร์ในแต่ละชุดของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่วางบนไดอะแฟรม ให้มีทิศทางการไหลของกระแสเป็นแบบขนานกับขอบของไดอะแฟรม และตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม โดยเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 3

แสดงการออกแบบ PMOISFET บนไดอะแฟรม

จำนวนชุดของอินเวอร์เตอร์	จำนวนของทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET ที่แยกวางบนไดอะแฟรม			
	เมื่อวางให้ทิศทางการไหลของกระแสนานกับขอบของไดอะแฟรม		เมื่อวางให้ทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม	
3	1	3	1	3
5	1	5	1	5
7	1	7	1	7
9	1	9	1	9

ในกรณีนี้ระยะห่างระหว่าง PMOISFET ที่แยกวางบนไดอะแฟรม โดยเงื่อนไขเมื่อให้กระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรมระยะห่างมีค่าเป็น 40 ไมโครเมตร และเงื่อนไขเมื่อให้กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมระยะห่างมีค่าเป็น 140 ไมโครเมตร

3. จากจำนวนชุดของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเป็น 3,5,7 และ 9 นั้น ได้ทำการออกแบบโดยนำอินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ของแต่ละวงจรริงออสซิลเลเตอร์นี้ แยกวางบนไดอะแฟรม ซึ่งอินเวอร์เตอร์ชุดนี้มีเงื่อนไขการวางตัว PMOISFET และ NMOISFET ให้มีทิศทางการไหลของกระแสเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรมเป็นแบบต่างๆ กันดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4

แสดงการออกแบบวางอินเวอร์เตอร์ 1 ชุดของวงจรริงออสซิลเลเตอร์บนไดอะแฟรม

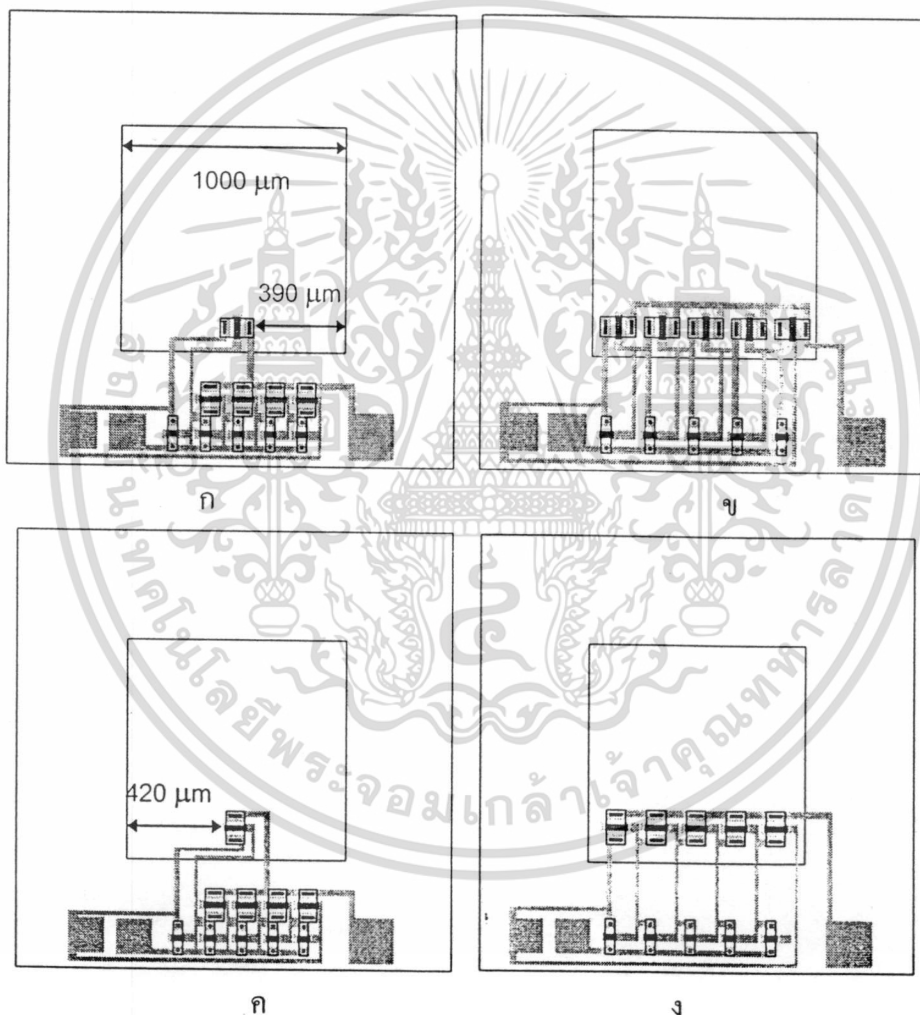
ทิศทางการไหลของกระแสเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรมของทรานซิสเตอร์ที่ประกอบเป็นวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่แยกวางบนไดอะแฟรม	
ทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET	ทรานซิสเตอร์ชนิด NMOISFET
ขนาน	ขนาน
ตั้งฉาก	ตั้งฉาก
ขนาน	ตั้งฉาก
ตั้งฉาก	ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดัน

ต้นแบบของวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดันโดยใช้โครงสร้าง CMOIS นี้ประกอบด้วยชิปฐานรองรับสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความหนา 400 ไมโครเมตร ไดอะแฟรมเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1000x1000 ตารางไมโครเมตร มีความหนาของไดอะแฟรมบาง 20 ไมโครเมตร และห่างจากขอบของไดอะแฟรม 20 ไมโครเมตร โดยทำการออกแบบโครงสร้างแบ่งเป็นแบบต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 36 ถึง ภาพที่ 38

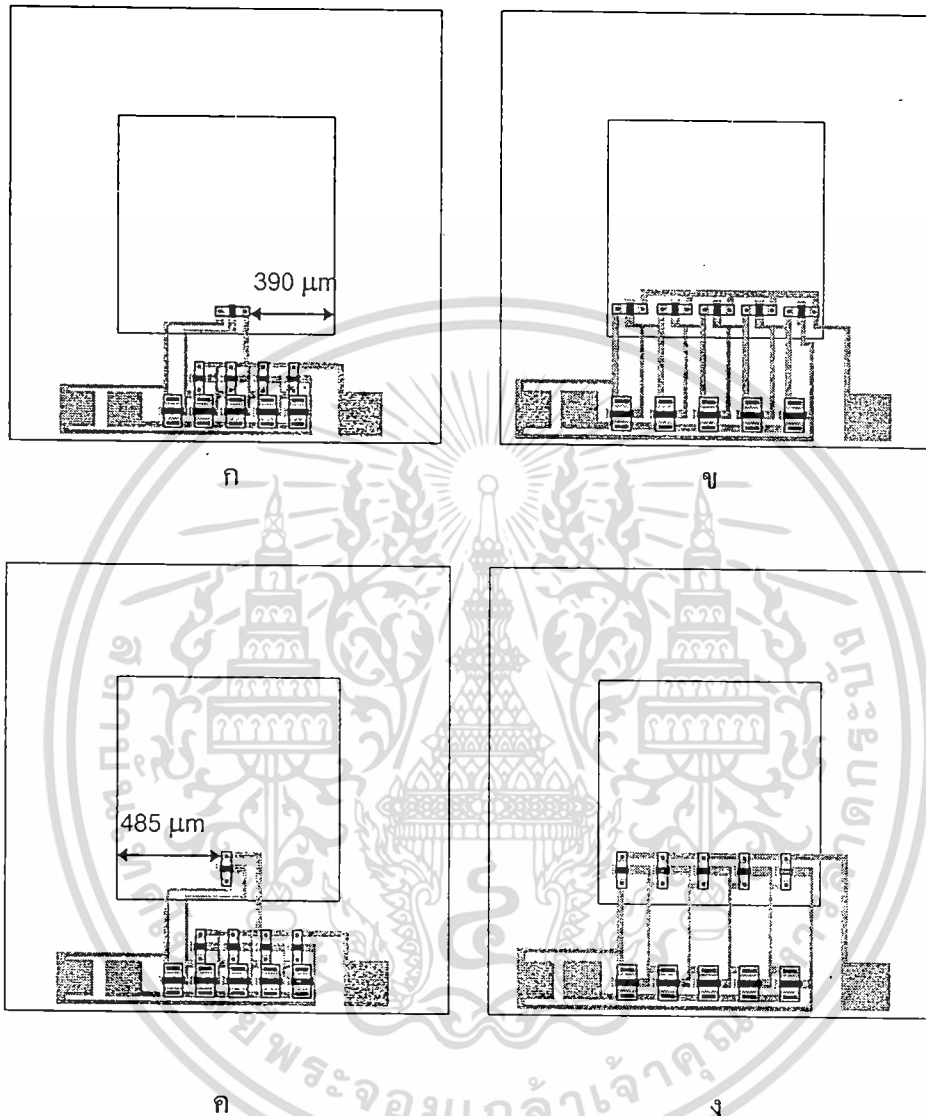
ภาพที่ 36



แสดงตัวอย่างต้นแบบของวงจรกำเนิดความถี่แบบ 5 stages ที่ควบคุมด้วยความดันอากาศโดยทำการวาง NMOISFET บนไดอะแฟรม (ก) วาง NMOISFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) วาง NMOISFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ค) วาง NMOISFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ง) วาง NMOISFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

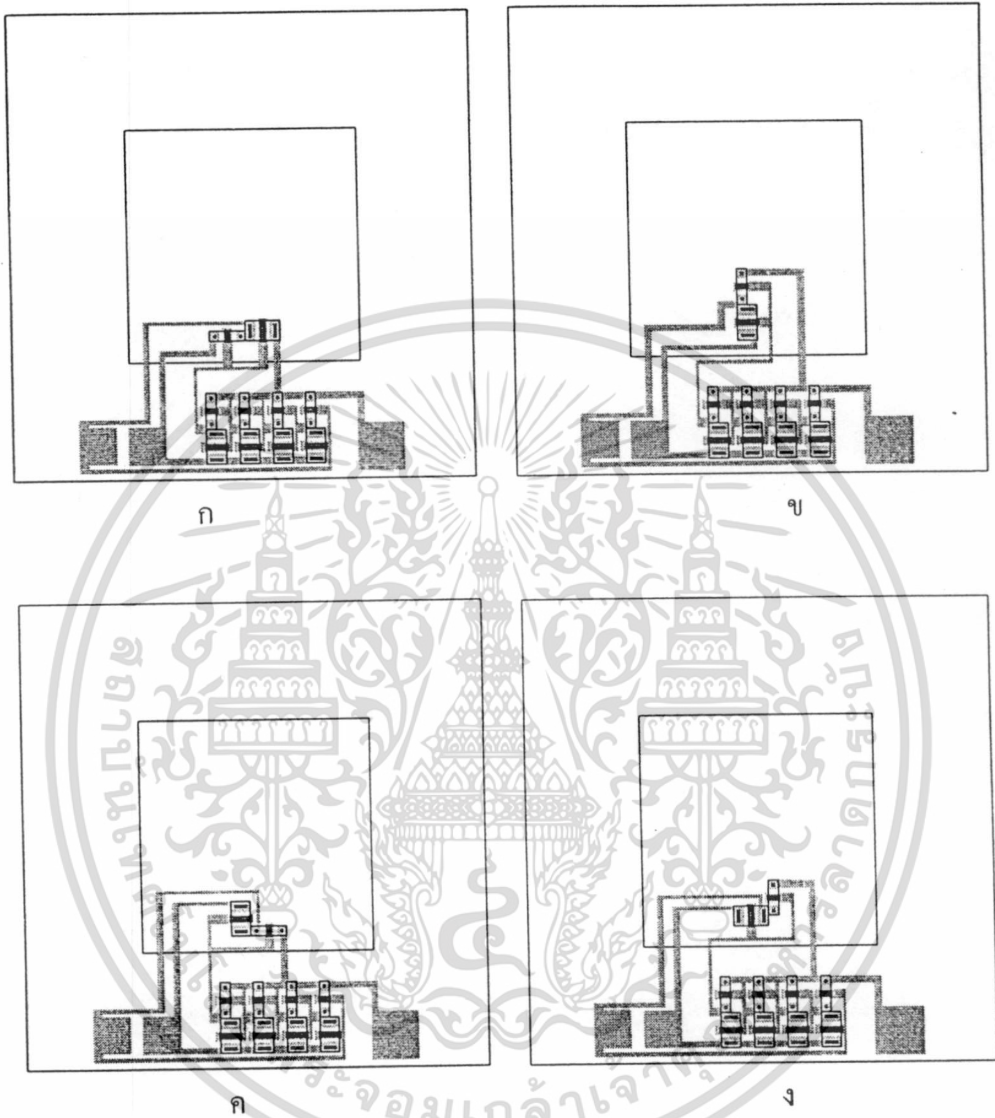
ภาพที่ 37



แสดงตัวอย่างต้นแบบของวงจรกำเนิดความถี่แบบ 5 stage ที่ควบคุมด้วยความดันอากาศโดยทำการวาง PMOSFET บนไดอะแฟรม (ก) วาง PMOSFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) วาง PMOSFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ค) วาง PMOSFET 1 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ง) วาง PMOSFET 5 ตัว ให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 38



แสดงตัวอย่างต้นแบบของวงจรกำเนิดความถี่แบบ 5 stage ที่ควบคุมด้วยความดันอากาศโดยอาศัยทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS โดยทำการวางอินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ของวงจรแหล่งกำเนิดความถี่บนไดอะแฟรม (ก) ทำการวางโดยให้ PMOISFET และ NMOISFET มีทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) ทำการวางโดยให้ PMOISFET และ NMOISFET มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ค) ทำการวางโดยให้ PMOISFET มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม และ NMOISFET มีกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ง) ทำการวางโดยให้ PMOISFET มีกระแสไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม และ NMOISFET มีการไหลของกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างวงจรกําเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดัน

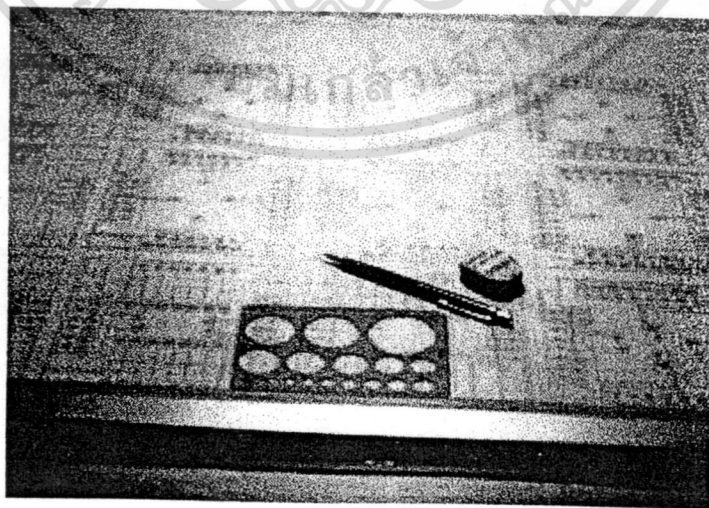
ในกระบวนการสร้างวงจรกําเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดันโดยใช้โครงสร้าง CMOIS บนโคอะแพรมนั้น จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนการผลิตกระจกมาส์กต้นแบบและ ขั้นตอนการสร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอน

การผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ

เมื่อได้ต้นแบบของวงจรกําเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดันโดยใช้โครงสร้าง CMOIS แล้ว จึงนำต้นแบบนั้นมาเขียนลวดลายต่าง ๆ ลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยการออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริง ด้วยการออกแบบลวดลายทุกชิ้นลงบนกระดาษกราฟต้นแบบแผ่นเดียวกัน เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อน จากนั้นจึงนำไปทาบบด้วยแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาร์ซีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตนั้นจะใช้ไมโครคัตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์กต้นแบบทั้งหมด 6 มาส์ก ด้วยกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

- มาส์กที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างโคอะแพรม
- มาส์กที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอนสำหรับ PMOISFET
- มาส์กที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัสสำหรับ NMOISFET
- มาส์กที่ 4 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วนเกต
- มาส์กที่ 5 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสสอูมิเนียม
- มาส์กที่ 6 ใช้สำหรับสร้างลวดลายออลูมิเนียม

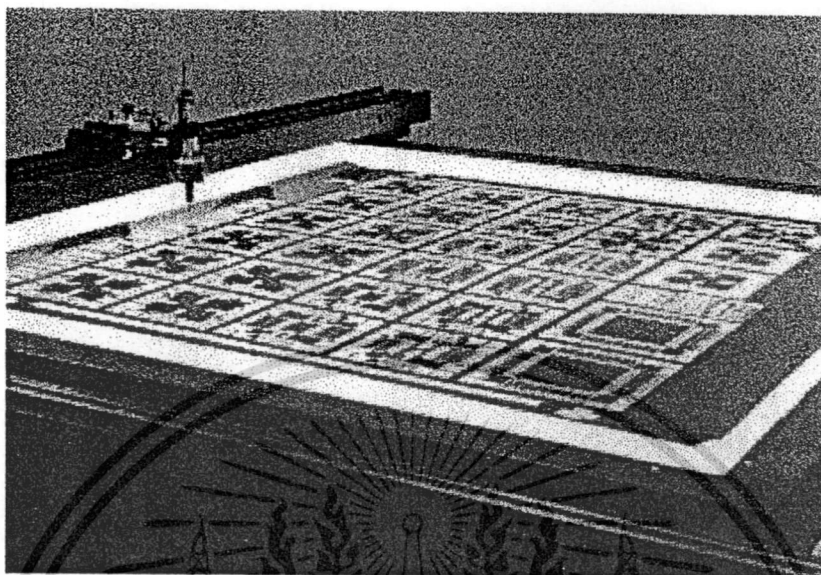
ภาพที่ 39



แสดงการออกแบบลวดลายต้นแบบลงบนกระดาษกราฟไว้

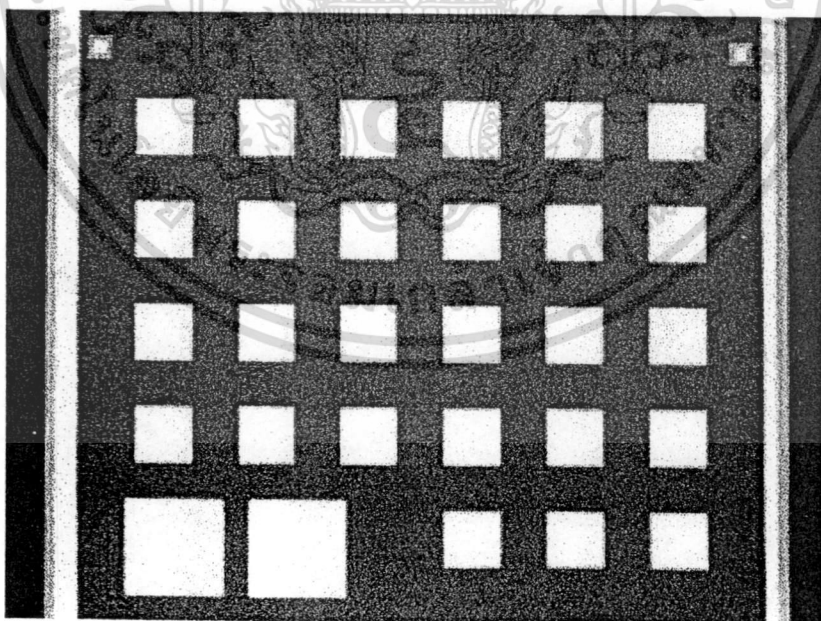
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 40



แสดงการตัดลวดลายคั่นแบบบนแผ่นพลาสติกมิลิเมตรด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์

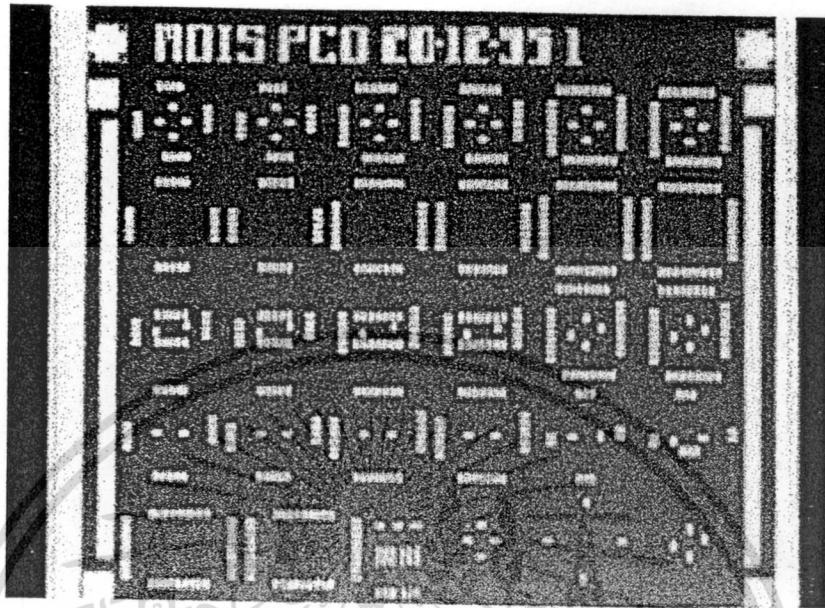
ภาพที่ 41



แสดงคั่นแบบมาส์กเริ่มต้นใช้สำหรับกระบวนการสร้างไออะแฟรม

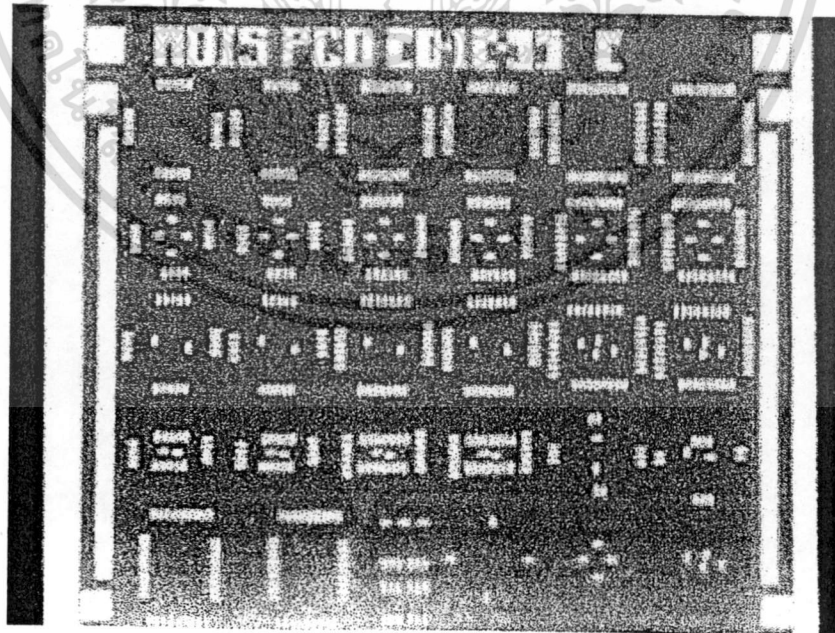
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 42



แสดงต้นแบบมาส์กที่ 1 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือ โบรอนสำหรับ PMOSFET

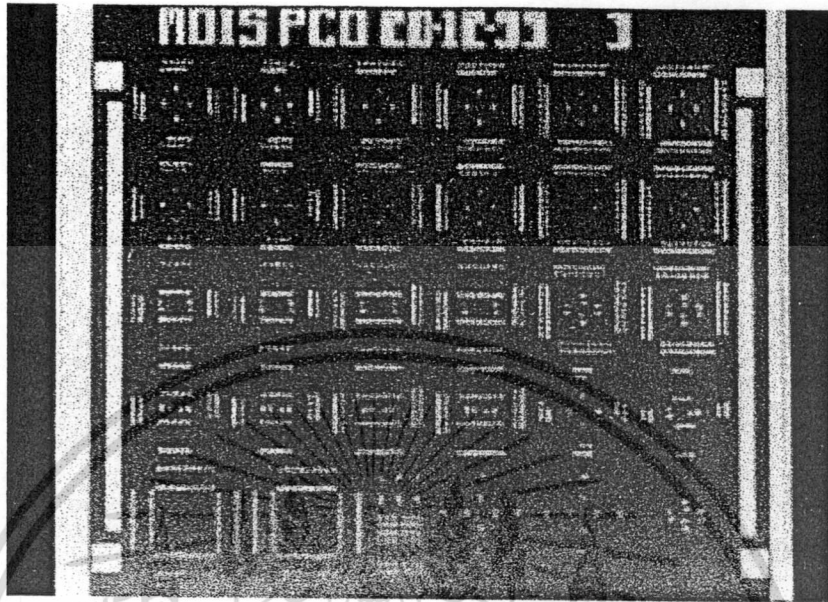
ภาพที่ 43



แสดงต้นแบบมาส์กที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัสสำหรับ NMOISFET

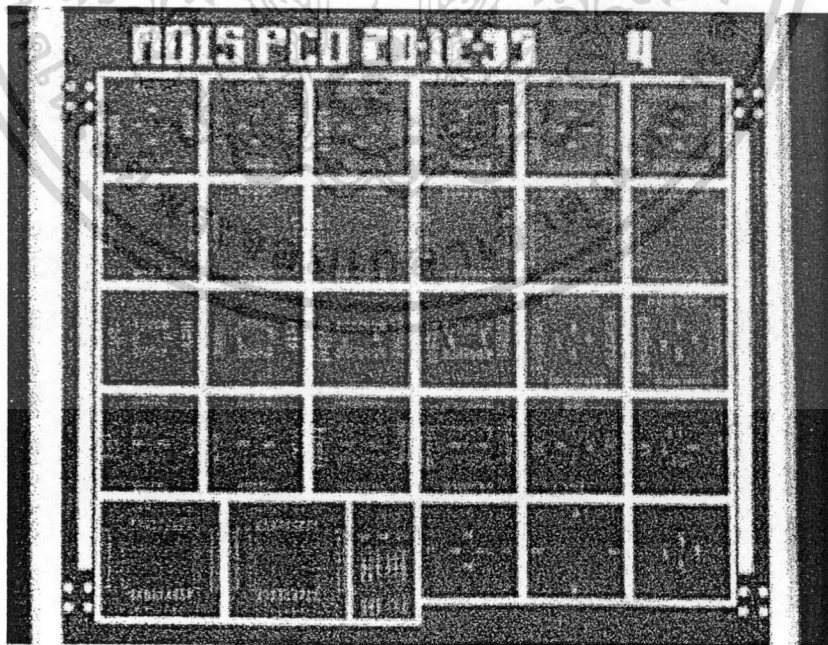
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 44



แสดงต้นแบบมาส์กที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วนเกท

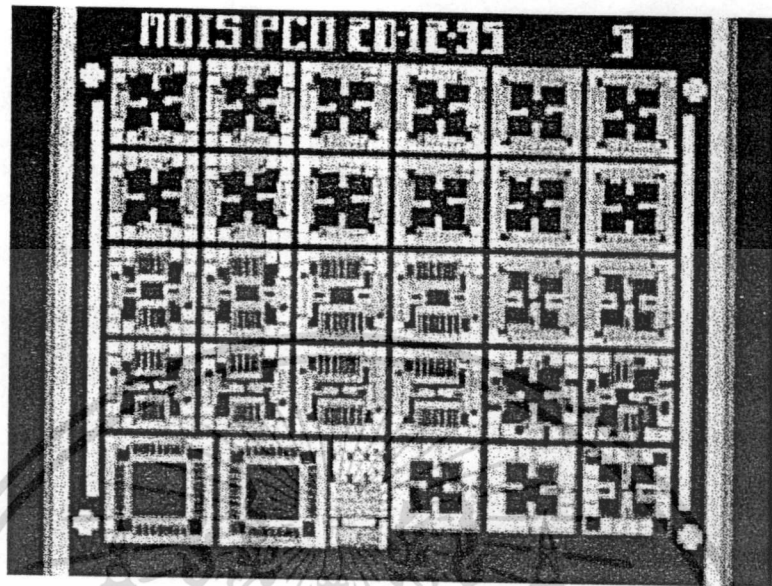
ภาพที่ 45



แสดงต้นแบบมาส์กที่ 4 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

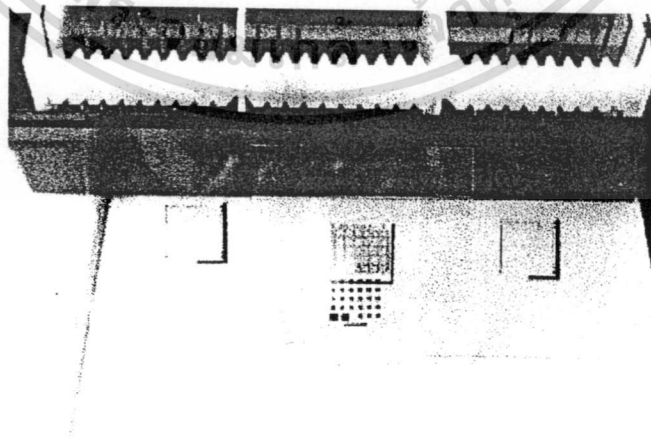
ภาพที่ 46



แสดงต้นแบบมาสก์ที่ 5 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอคูมิเนียม

เมื่อได้ต้นแบบบนแผ่นไมลาร์ซีทดังแสดงในภาพที่ 41 ถึง 46 แล้วก็นำต้นแบบมาย่อส่วนลงบนกระจก ด้วยกล้องถ่ายภาพย่อส่วนที่เรียกว่า step and repeat camera ซึ่งจะได้ลวดลายบนแผ่นฟิล์มกระจกเรียบขนาด 3x3 ตารางนิ้ว ดังแสดงในภาพที่ 47 เพื่อเป็นโฟโตมาสก์ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ภาพที่ 47



แสดงภาพถ่ายของกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นโฟโตมาสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการสร้างแผ่นผลึกซิลิกอน

ในการสร้างวงจรรำเนิดความถี่ควบคุมความดันโดยใช้โครงสร้าง CMOIS บนไดอะแฟรมแผ่นผลึกซิลิกอนนั้นก็จะทำการออกแบบเป็นสองขั้นตอน คือ การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง และลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

การสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ ได้ใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่นิยมกันมาก โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิกอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีขั้นตอนการสร้างพื้นฐานดังนี้ คือ

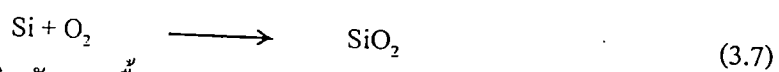
1. การออกซิเดชัน (oxidation)
2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
3. การแพร่สารเจือ
4. การสร้างลวดลายโลหะ

แต่เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดนี้มีไดอะแฟรมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ด้วย ดังนั้นจึงมีขั้นตอนเพิ่มมาอีก คือ เทคนิคการกัดเนื้อซิลิกอนเพื่อสร้างเป็นไดอะแฟรม ซึ่งกล่าวถึงรายละเอียด ในภาคผนวก แต่กระบวนการที่กล่าวถึงในข้างต้นทั้ง 4 ขั้นตอนสามารถที่จะอธิบายแยกในแต่ละขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

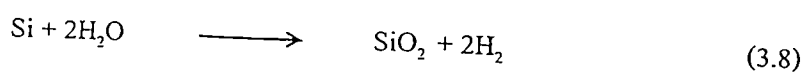
กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในอุณหภูมิ $1000-1200^\circ\text{C}$ โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไปนี้

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประเภทแรกคือใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิกอน และป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ทำให้ทำปฏิกิริยากับผิวซิลิกอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนเกทที่เรียกว่าเกตออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนียวทำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิกอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวของซิลิกอนในส่วนอื่น ๆ และจากวัตถุประสงค์ในการใช้งานชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ที่กล่าวมา ทำให้ต้องการที่จะใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกันเช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนของเกตออกไซด์จะมีความหนาประมาณ 1000 Å และต้องเป็นออกไซด์ที่มีคุณภาพดีจึงจำเป็นที่จะต้องใช้กระบวนการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์แบบแห้ง ส่วน ซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนที่จะใช้เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่อะตอมสารเจือ จำเป็นที่จะต้องมีความหนาประมาณ 4000-5000 Å ขึ้นไปและชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้เป็นหน้ากักป้องกันสารเคมีที่ซึ่กัดซิลิกอนให้เป็นโคอะเฟรมต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 10000 Å ซึ่งความหนาขนาดนี้ การสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียว จะทำให้ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีของออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากักจะทำการสร้าง โดยใช้วิธีการสร้างโดยวิธีการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบชื้นและแบบแห้งทีบอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้าง ซิลิกอนไดออกไซด์แบบชื้นสามารถสร้างความหนาได้เร็ว แต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นจะต้องสร้างสลับกับการสร้างแบบแห้ง

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพต้นแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้น้ำยาไวแสง เพื่อเปิดช่องซิลิกอนสำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและมีความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับการปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีจะกล่าวถึงในหัวข้อลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น โดยที่แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งได้ตามประเภทของอะตอมสารเจือ 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดอื่น เช่น พลวง , สารหนู , ฟอสฟอรัสและแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เช่น โบรอน โดยในแต่ละประเภทก็จะสามารถแบ่งได้ตามสถานะของแหล่งจ่ายสารเจือ 3 ประเภท คือ 1) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็งอย่างเช่น SB_2O_3 , As_2O_3 และ SiP_2O_7 เป็นต้น 2) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของเหลวอย่างเช่น POCl_3 หรือ BBr_3 เป็นต้น 3) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดก๊าซอย่างเช่น AsH_3 , PH_3 และ B_2H_2 เป็นต้น สำหรับในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลือกที่จะใช้แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดอื่นเป็น SiP_2O_7 และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เป็น BN ซึ่งทั้งสองชนิดมีสถานะเป็น ของแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็ง ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษเนื่องจากก๊าซพิษที่แพร่ออกมาจากปฏิกิริยาน้อยที่สุด และยังคงสะดวกอย่างยิ่งในการใช้งาน

สำหรับขั้นตอนในการปฏิบัติของกระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การ Predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ
2. การ Drive-in เป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อและกำหนดการกระจายของสารเจือ ที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวมหรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่จะเคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ทำให้เกิดรอยผิวสัมผัสกับซิลิกอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิกอนไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี

สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะเลือกใช้โลหะ (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสุญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ 1 ไมครอน แล้วจึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยขบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกัดเป็นลวดลายตามที่ต้องการแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านขบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ประมาณ 15 นาที เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง¹⁹¹

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิกอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดเอ็นระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิคัดความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกเป็น 400 ไมโครเมตร โดยภาพตัดขวางแสดงดังในภาพที่ 48

ภาพที่ 48



แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มแรก

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องต้นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO₃) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- 1 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

เพื่อการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ให้มีความหนาไม่ต่ำกว่า 10000 Å จึงทำ การออกซิเดชัน โดยการนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที เมื่อจบขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดง ในภาพที่ 49

ภาพที่ 49



แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิกอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการอบให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาสก์ I สำหรับรายละเอียดของ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat มีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 - เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาทีที่ด้านหลัง
 - อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
 - ฉายแสงผ่านกระจกมาสก์ที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลตออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ เป็นเวลา 10 วินาทีที่ด้านหลัง
 - การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1 นาที จุ่มน้ำยาทำความสะอาด (Isopropyl) 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เคลือบอยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
 - ทาด้านหน้าแผ่นผลึกด้วย Waycoat
 - อบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที
5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

6. การลอกชั้นสารไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ดมในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ดมในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

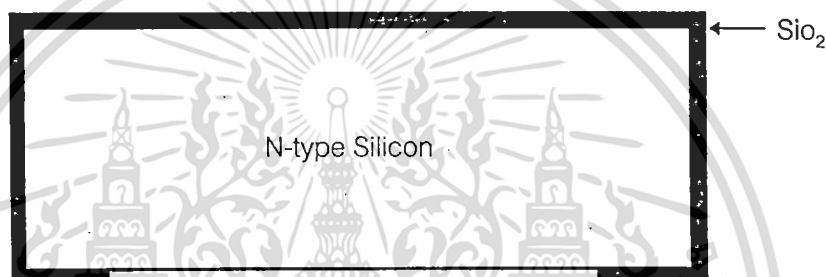
7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ดมในไตรโครโลเอททีลินเป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- เมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงในภาพที่ 50

ภาพที่ 50



แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

8. กระบวนการกัดเป็น ไดอะเฟรมบาง (กัดหนาง)

ใช้น้ำยาส่วนผสมของ Ethylene diamine : Pyrocatechol : DI Water (EPD) ในอัตราส่วน 50:8:16 ในขณะที่จะใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กัดให้ได้ไดอะเฟรมตามขนาดที่ต้องการ

9. การลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

ทำเหมือนข้อ 5

10. ทำความสะอาดผิวผลึก

ทำเหมือนข้อ 7

11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

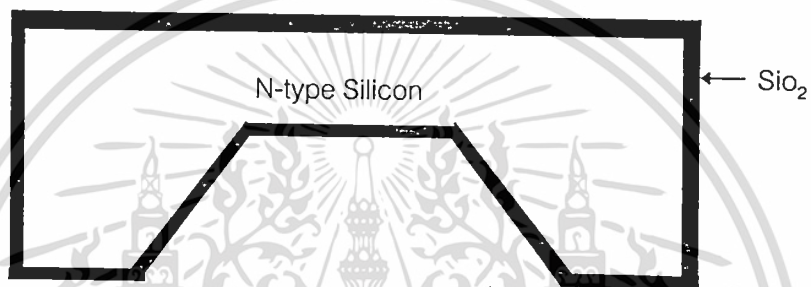
เมื่อได้ไดอะเฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ได้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อ นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร ต่อนาที
 - ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที
- เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงในภาพที่ 51

ภาพที่ 51



แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

12. กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี 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 ลิตร ต่อนาที

- ทำการ Stabilize 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตรต่อ นาที
- ทำการ Predeposition 40 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตรต่อ นาที เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วต้องมีอะตอมสารเจือประมาณ 10^{15} - 10^{16} อะตอมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร

17. การลอกชั้น Boron glass

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

18. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

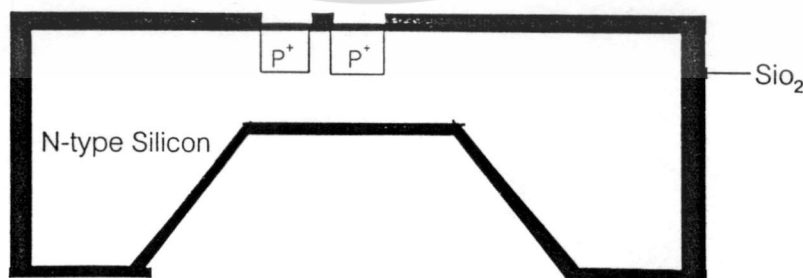
19. กระบวนการ p⁺ drive-in

ทำการขับลิแกนด์อะตอมสารเจือโบรอน พร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นด้วย ที่ อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ที่มีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตรต่อ นาที เป็นเวลา 60 นาที โดยมีขั้นตอนของกระบวนการดังนี้

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

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังภาพที่ 52

ภาพที่ 52



แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี III

ใช้กระจกมาส์กที่ III ถ่ายลงที่ด้านหน้า โดยมีชั้นตอนเหมือนข้อ 4

21. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

22. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

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

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

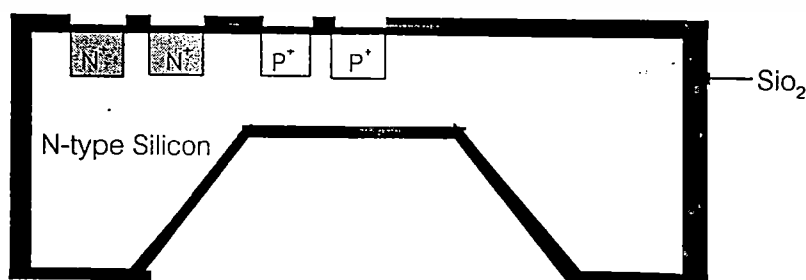
26. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

27. กระบวนการ n^+ drive-in

ทำการขับลึกฟอสฟอรัสพร้อมทั้งทำสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ โดยทำเหมือนข้อ 19 เมื่อผ่านชั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังภาพที่ 53

ภาพที่ 53



แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี IV

ใช้กระจกมาสก์ IV เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์ บริเวณส่วนเกทออกเพื่อทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่ รายละเอียดเหมือนกับขั้นตอนที่ 4

29. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

30. การลอกชั้นไวแสง

เหมือนข้อ 6

31. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

32. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับส่วนเกท

ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณส่วนเกท โดยใช้การออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที โดยมีอัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที จำได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 700 Å เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังภาพที่ 54

ภาพที่ 54



แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 32

33. ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหลัง

ทำเหมือนข้อ 5

34. การเคลือบทองคำ (Au) ในสุญญากาศ

โดยใช้เครื่องเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นของทองคำที่ด้านหลัง

35. กระบวนการ Au drive-in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการขับลึกลงมาของค่าที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1.2 ลิตรต่อนาที แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว จะทำให้ฐานรองที่ใช้เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ

36. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี V

ใช้กระจกมาสก์ที่ V เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกที่บริเวณที่จะทำส่วนสัมผัสของขั้วไฟฟ้า รายละเอียดเหมือนข้อ 4

37. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

38. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

39. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

40. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร

41. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี VI

ใช้กระจกมาสก์ที่ VI เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของอลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก ชั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ VI ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์

แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เคลือบอยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

42. การกัดชั้นอลูมิเนียม

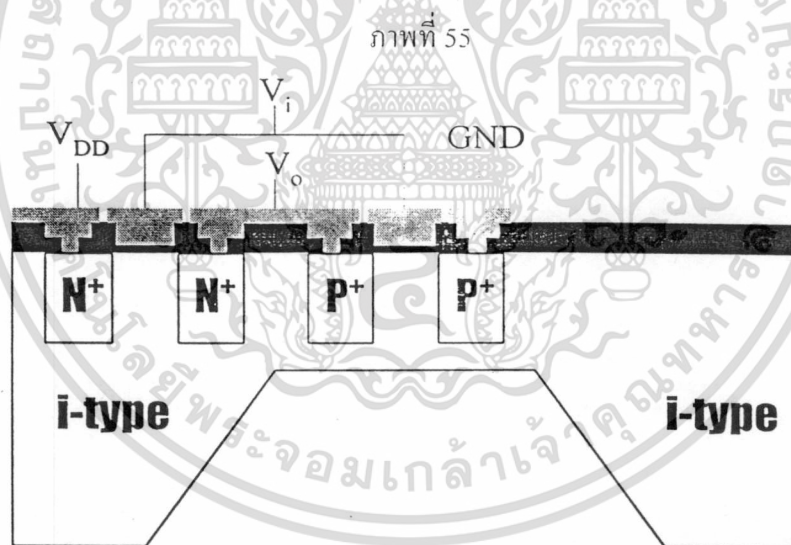
สารละลายที่ใช้กักชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 นาที

43. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

44. กระบวนการ Sintering

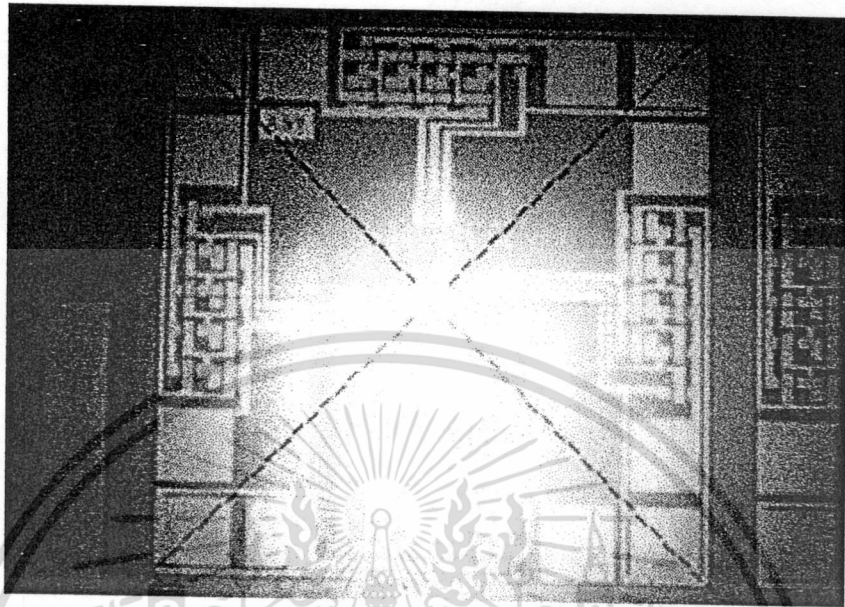
ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิกอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังภาพที่ 55 และจะได้ตัวอย่างภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วดังภาพที่ 56 ,57 และ 58



แสดงภาพตัดขวาง ของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านขั้นตอนที่ 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 56

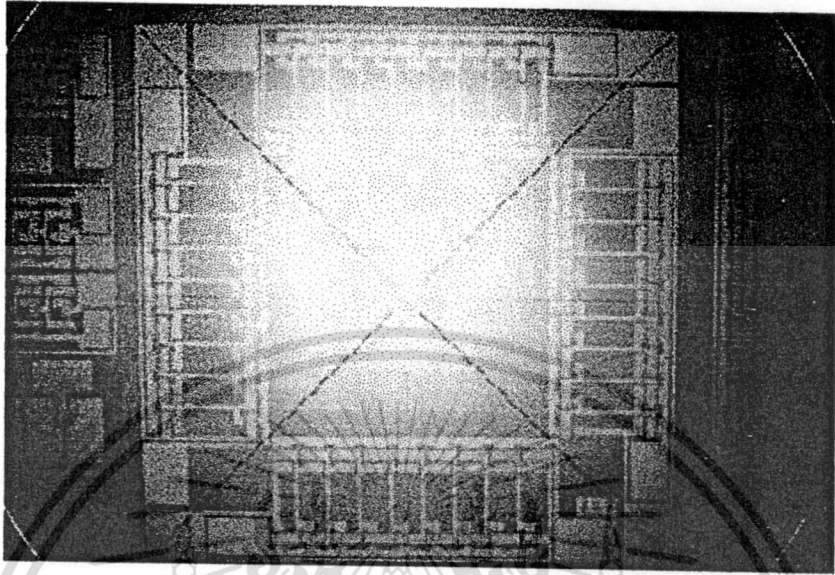


ข

แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของวงจรกำเนิดความถี่ ที่สร้างเสร็จแล้ว (ก) แบบ 5 สถานะที่มี NMOISFET 1 ตัวอยู่บนไดอะแฟรม (ข) แบบ 7 สถานะที่มี PMOISFET 1 ตัวอยู่บนไดอะแฟรม

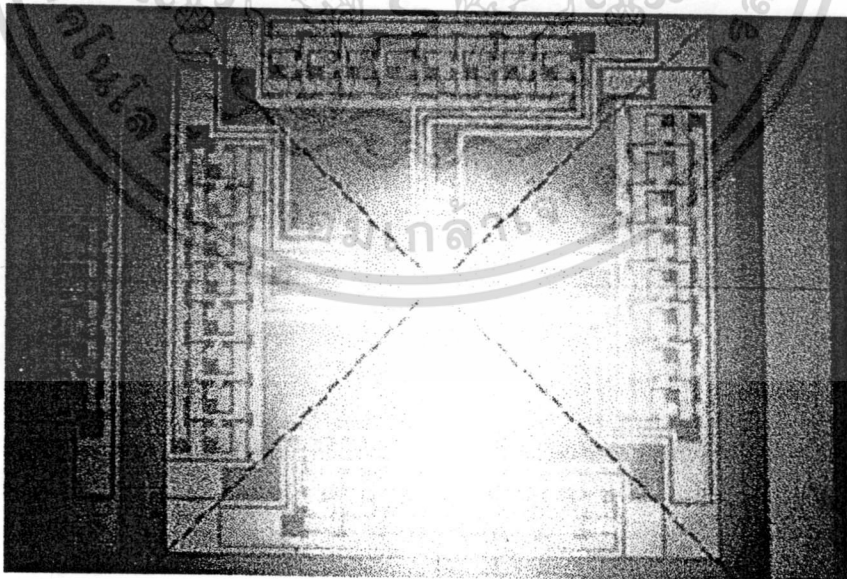
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 57



แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของวงจรกำเนิดความถี่ 9 สถานะ ที่สร้างเสร็จแล้วแบบที่ทำกรวาง NMOISFET 9 ตัว และ PMOISFET 9 ตัว ไว้บนไดอะแฟรม

ภาพที่ 58



แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของวงจรกำเนิดความถี่ 9 สถานะ ที่สร้างเสร็จแล้ว โดยที่ทำกรวางวงจรรวมอินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ไว้บนไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บบรรจุ

เมื่อเสร็จขั้นตอนในการสร้างบนแผ่นผลึกแล้ว ก่อนที่จะนำแผ่นผลึกไปเข้ากระบวนการแอสเซมบลี (Assembly Processing) และการเก็บบรรจุ (Packing) จะต้องมีการตรวจสอบลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการทำงานของวงจรกำเนิดความถี่ก่อน หลังจากนั้นจึงตัดแยกชิปแล้วมาติดตั้งบนตัวถัง จากนั้นทำการปิดผนึกและนำไปทดสอบคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ โดยขั้นตอนดังกล่าวมานั้นสามารถแยกอธิบายโดยสังเขปดังนี้

การตัดแยกชิป (chip separation)

เป็นการตัดแบ่งแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นชิ้นย่อย ๆ แต่ละตัวเพื่อให้สามารถติดตั้งบนตัวถังได้และยังเป็นการเลือกเฉพาะอุปกรณ์ที่ใช้งานได้ใช้งาน - สำหรับการตัดแยกชิปที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ จะทำการตัดโดยใช้ใบมีดหัวเพชรที่ตกลงบนแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำแล้วหักตามรอยตัดจากนั้นจึงนำชิปที่ใช้งานได้ดี ไปติดตั้งลงบนตัวถังต่อไป

การติดชิปฐานรอง (chip - attach or chip bonding)

เป็นขั้นตอนการนำชิปมาติดบนตัวถังโลหะ TO-5 ด้วยการหลอมเหลวของทองบนฐานรองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นชิปก็จะติดกับฐานรองต่อจากนั้นทำการหยอดด้วยอีพอกซีตามขอบของชิปกับฐานรองอีกทีหนึ่ง

การต่อสายลวด (Wire bonding)

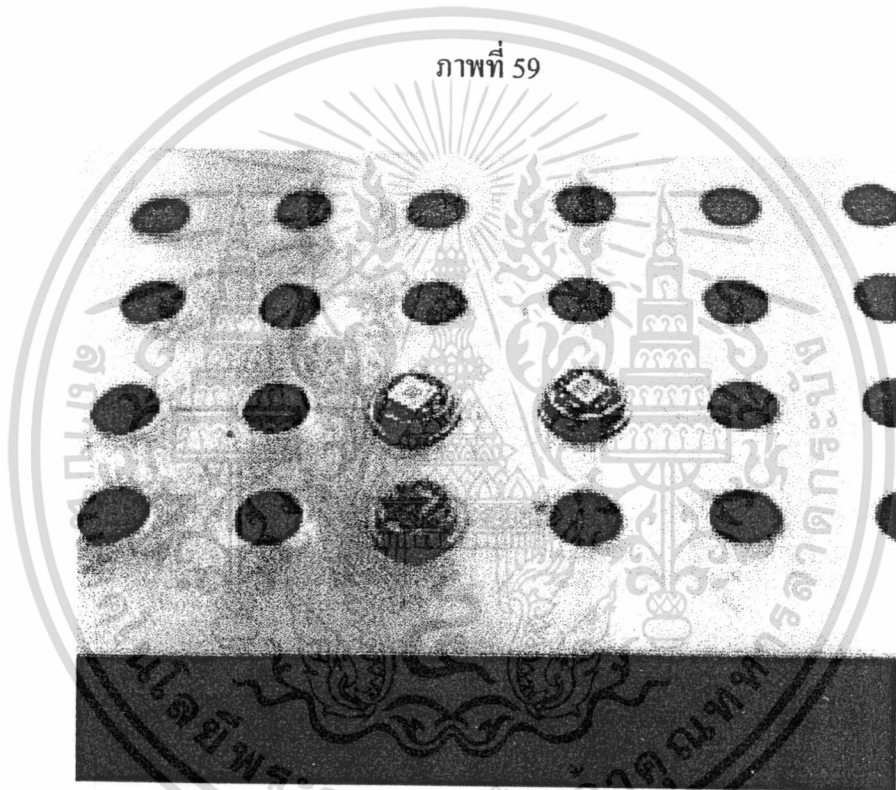
เป็นการเชื่อมลวดโลหะที่มีสภาพความนำสูงอย่างเช่น อลูมิเนียม หรือ ทองคำ ระหว่างขั้วสัมผัสโลหะของอุปกรณ์กับขาของตัวถัง ซึ่งทำได้โดยการใช้เครื่องเชื่อมลวดอลูมิเนียมแบบหัวต้นความถี่สูง โดยทั่วไปตัวถังโลหะแบบ TO-5 จะใช้ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ไมโครเมตร

เมื่อผ่านขั้นตอนเหล่านี้แล้ว ชิปก็จะถูกติดอยู่บนตัวถังโลหะแบบ TO-5 พร้อมทั้งต่อสายแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 65 หลังจากนั้นจึงนำไปทำการเก็บบรรจุเป็นขั้นตอนสุดท้าย

การเก็บบรรจุ (packaging)

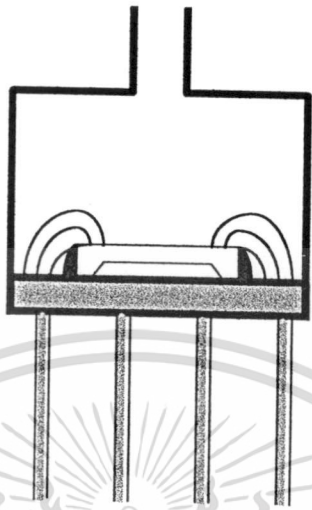
เป็นขั้นตอนการปิดฝาของตัวถังโลหะแบบ TO-5 ด้วยฝาปิดที่ทำการเจาะรูตรงกลางสำหรับให้ความดันเข้าออก เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ สามารถแสดงด้วยภาพตัดขวางดังในภาพที่ 60

ระหว่างฝาปิดกับตัวถังจะใช้กาวอีพอกซีติดเพื่อป้องกันอากาศรั่ว ดังนั้นอุปกรณ์กำเนิดความถี่ที่ควบคุมด้วยความดันโดยใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS ที่เสร็จสมบูรณ์ที่พร้อมจะนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ มีลักษณะดังภาพที่ 61



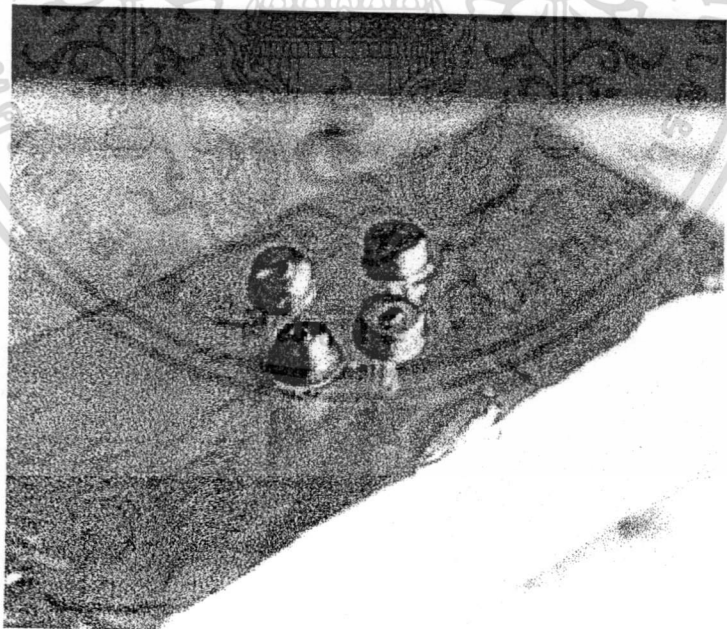
แสดงภาพถ่ายชิปวงจรถ่ายกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดัน ที่ติดอยู่บนตัวถังโลหะแบบ TO-5 พร้อมทั้งต่อสายระหว่างขั้วสัมผัสโลหะของอุปกรณ์กับขาโลหะของฐานรอง

ภาพที่ 60



ภาพตัดขวางแสดงการเก็บบรรจุชิปวงจรรักษาเน็ดความถี่ควบคุมด้วยความดัน ด้วยตัวถังโลหะ แบบ TO-5

ภาพที่ 61



แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์กำเนิดความถี่ ที่ควบคุมด้วยความดันโดยใช้ทรานซิสเตอร์ โครงสร้าง CMOIS ที่เก็บบรรจุเรียบร้อย

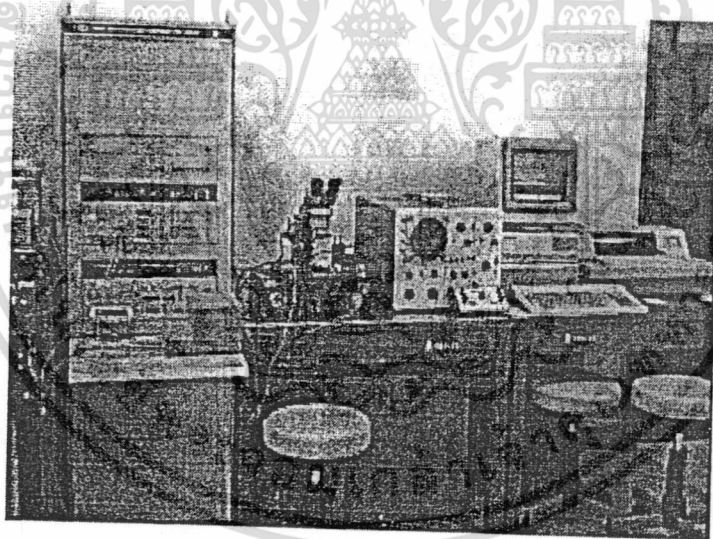
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ซึ่งก่อนที่จะหาค่าความถี่ของวงจรกำเนิดความถี่โครงสร้าง MOISFET นั้น จะต้องทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของ MOISFET ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่จะต้องรู้ ก่อนที่จะนำ MOISFET นี้ไปออกแบบวงจรรวม โดยในการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบค่ากระแสและแรงดันของ Hewlett packard รุ่น 4061 A Semiconductor/component test system ดังแสดงในภาพที่ 62

ภาพที่ 62



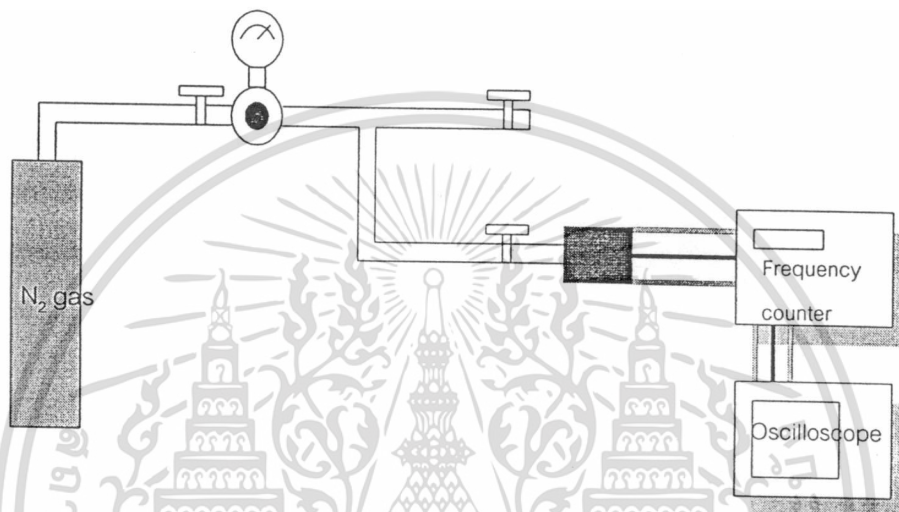
ภาพถ่ายแสดงการทดสอบ MOISFET ด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ Hewlett packard

เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MOISFET แล้ว ต่อไปจึงทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการแยกวาง MOISFET ไว้บนไดอะแฟรมบางในแบบต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยทำการทดสอบที่ความถี่มีค่าต่าง ๆ จากนั้นจึงทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบหาค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรกำเนิดความถี่ที่มีการแยก MOISFET บางตัวใน
วงจรวางไว้บนไดอะแฟรมบาง เมื่อมีความดันมากกระทำ โดยจะใช้ชุดทดสอบที่สามารถให้ความ
แตกต่างของความดันคังแผนผังในภาพที่ 63 และภาพถ่ายดังในภาพที่ 64

ภาพที่ 63



แผนผังแสดงชุดการทดลอง

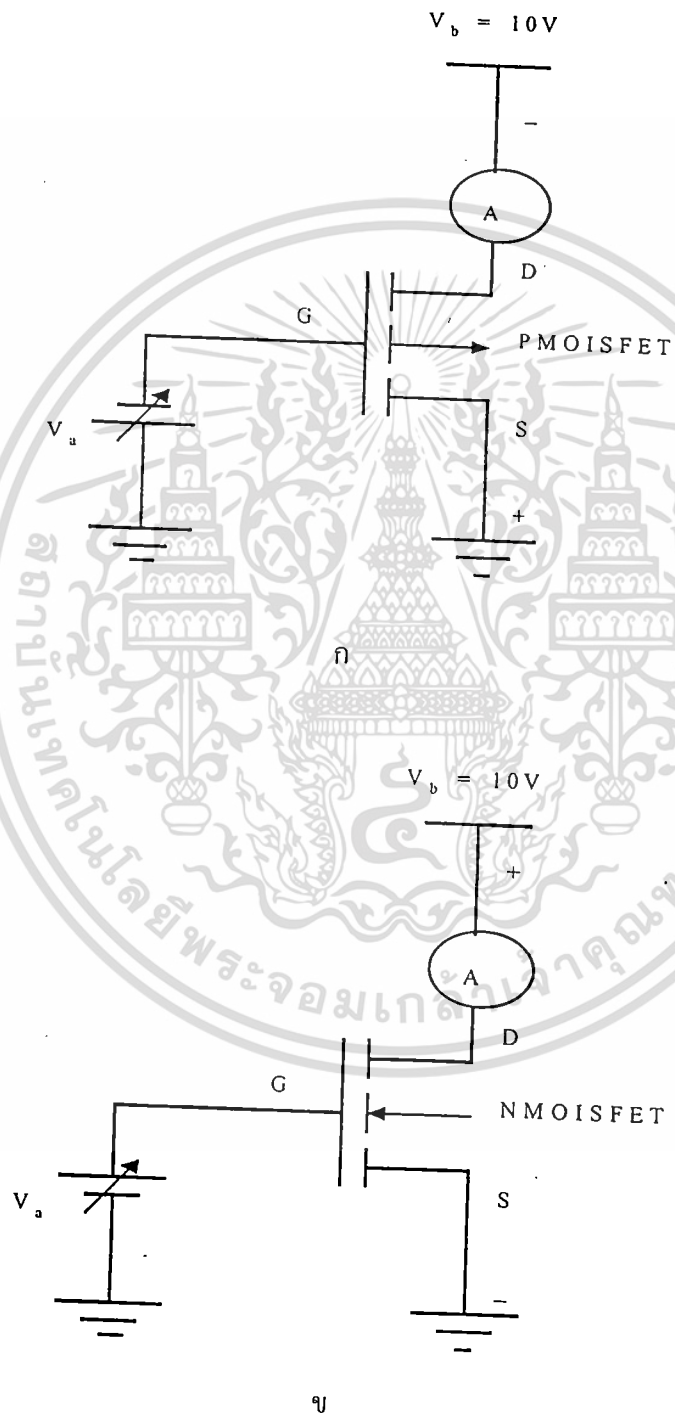
ภาพที่ 64



ภาพถ่ายแสดงชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 65



แสดงวงจรในการหาค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOISFET (ก) PMOSFET (ข) NMOSFET

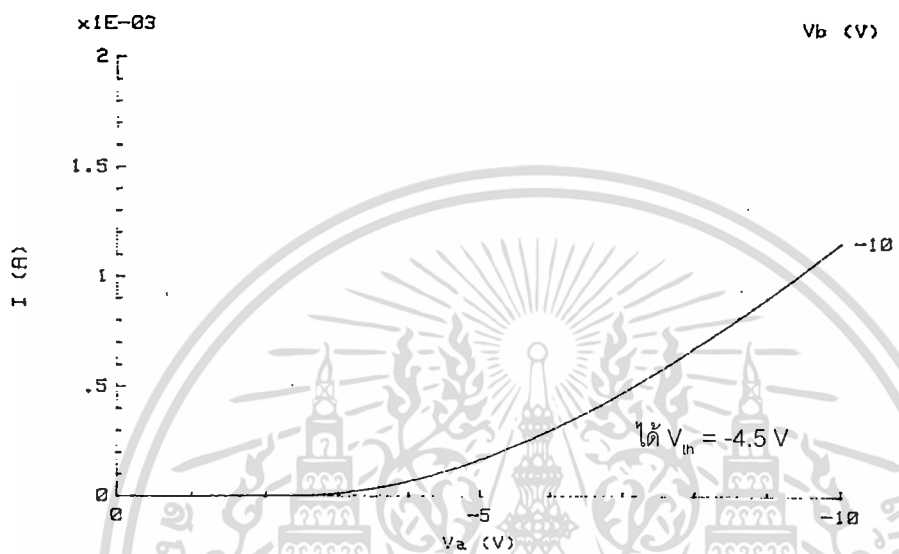
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 66

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

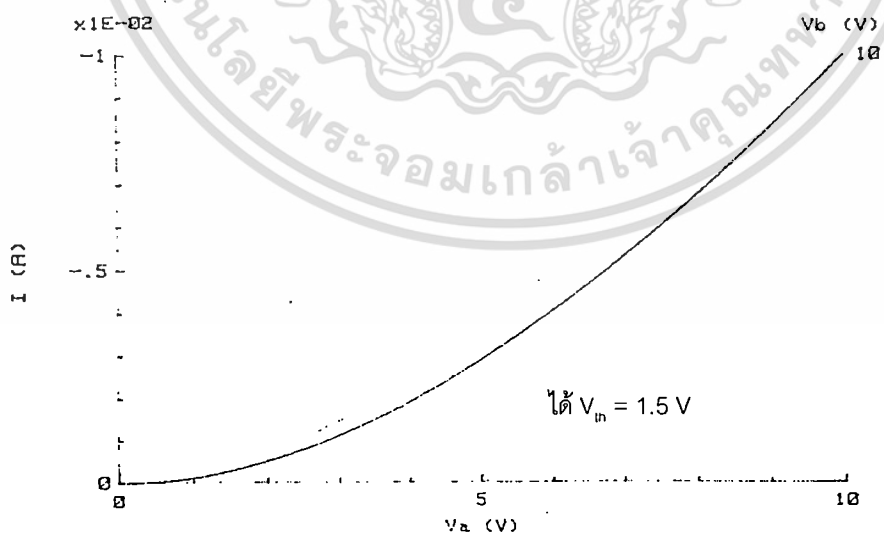
SAMPLE= PМОIS 80/20 ที่ความดัน 0 kg/cm²



I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= NМОIS 120/20 ที่ความดัน 0 kg/cm²



ข

แสดงผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOISFET (ก) PМОISFET (ข)

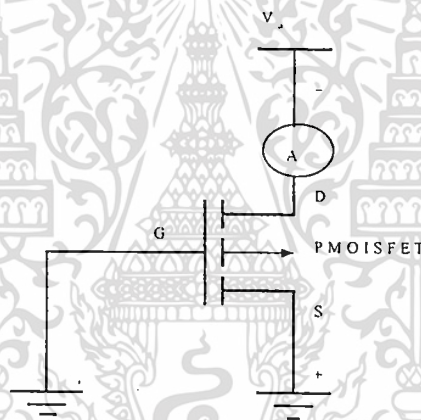
NМОISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันพังทลาย (V_{BV})

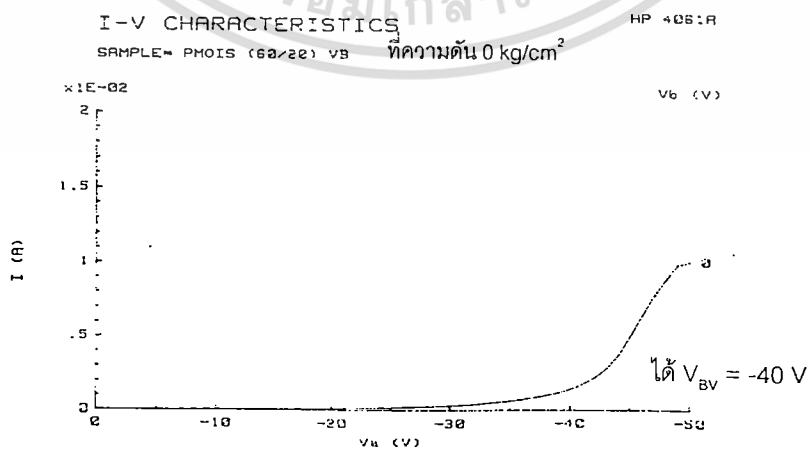
ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่ว ๆ ไป ค่าแรงดันพังทลายของแต่ละอุปกรณ์ จะเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด เมื่อเกิดแรงดันพังทลายขึ้น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ จนไม่สามารถควบคุมได้และจะเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ได้ ดังนั้นในการออกแบบวงจร กำหนดความถี่ที่มีโครงสร้างแบบ CMOIS นั้นจำเป็นต้องรู้จักความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดของวงจรมี จึงทำการทดสอบค่าแรงดันพังทลายของ PMOISFET และ NMOISFET โดยทดสอบด้วยเครื่องวัดกระแสและแรงดันของ Hewlett packard ได้เป็นดังนี้ ในการทดสอบค่าแรงดันพังทลายของ PMOISFET จะทำการต่อวงจรวัดดังแสดงในภาพที่ 67 การทดสอบจะแปรค่า V_g จาก 0 โวลต์ไปจนถึง -50 โวลต์ ซึ่งตัวอย่างผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 68

ภาพที่ 67



แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันพังทลายของ PMOISFET

ภาพที่ 68

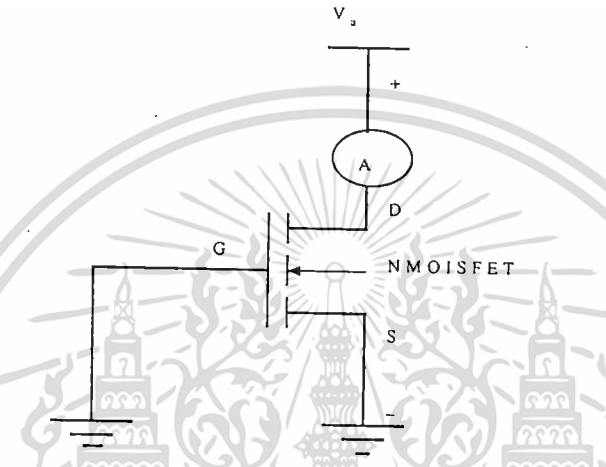


แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าแรงดันพังทลายของ PMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

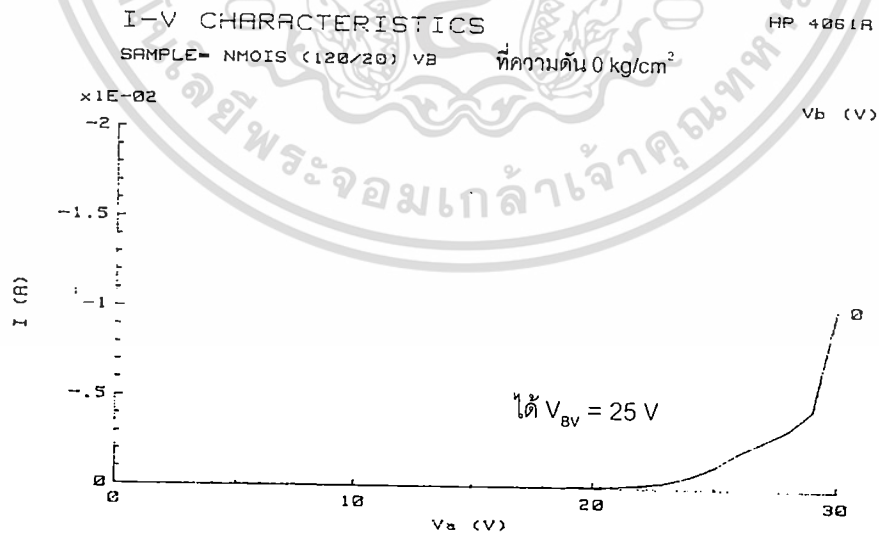
และในการทดสอบค่าแรงดันพ้งทลยของ NMOISFET จะทำการต่อวงจรวัดดังแสดงในภาพที่ 69 การทดสอบจะแปรค่า V_g จาก 0 โวลต์ไปจนถึง 30 โวลต์ ซึ่งตัวอย่างผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 70

ภาพที่ 69



แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันพ้งทลยของ NMOISFET

ภาพที่ 70



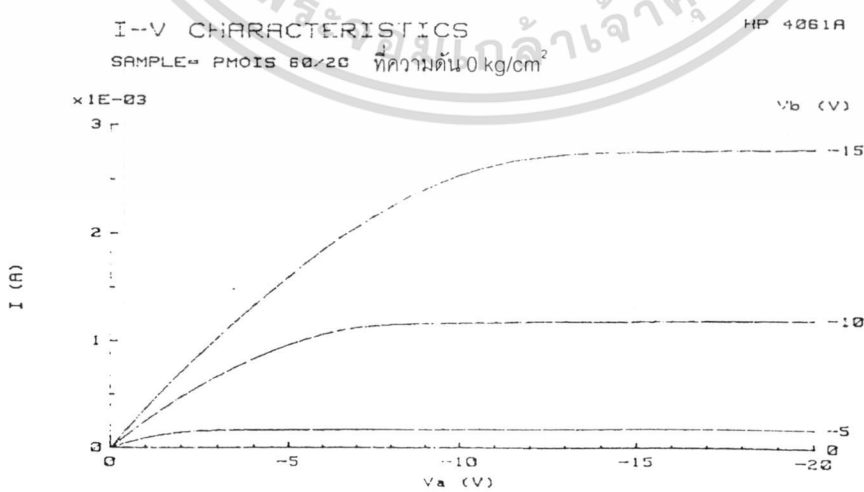
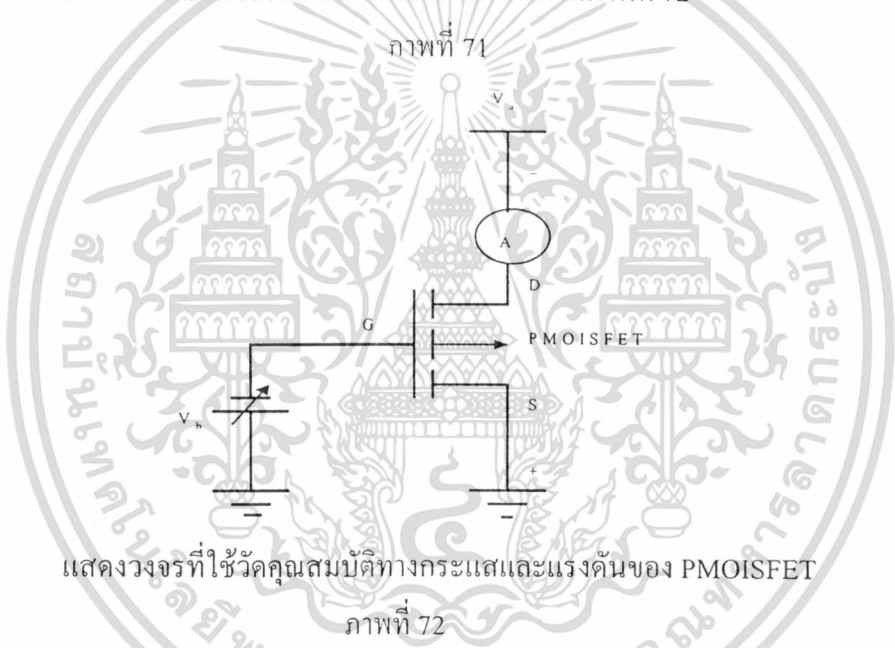
แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าแรงดันพ้งทลยของ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าทรานสคอนดักแตนซ์

การหาค่าทรานสคอนดักแตนซ์หรือ K' กระทำโดยนำทรานซิสเตอร์ที่ทำการออกแบบและสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว แล้วมาทำการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันด้วย เครื่องวัดกระแสและแรงดันของ Hewlett packard ซึ่งแสดงได้ดังนี้

ในการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ PMOISFET จะทำการต่อวงจรวัดดังแสดงในภาพที่ 71 การทดสอบจะแปรค่า V_b จาก 0 ถึง -20 โวลต์ และทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_a ที่จ่ายแก่ขั้วเดรนและซอสของทรานซิสเตอร์ ในขณะที่เปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟเลี้ยงแต่ละครั้งเครื่องจะทำการบันทึกค่ากระแสที่ไหลผ่านและเก็บข้อมูลคู่ลำดับกระแสและแรงดันไว้ เพื่อแสดงผลด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังในภาพที่ 72

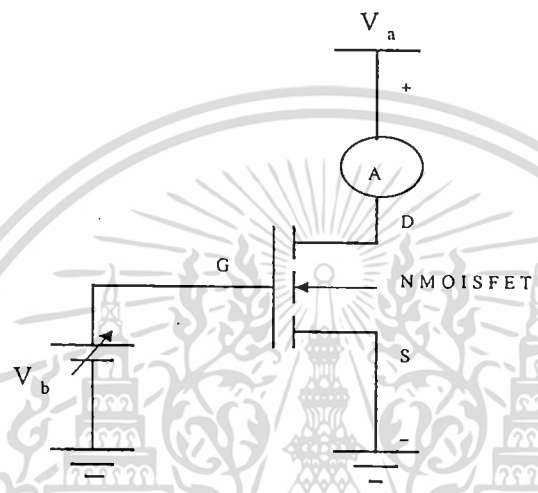


แสดงตัวอย่างผลการทดสอบค่ากระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ PMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

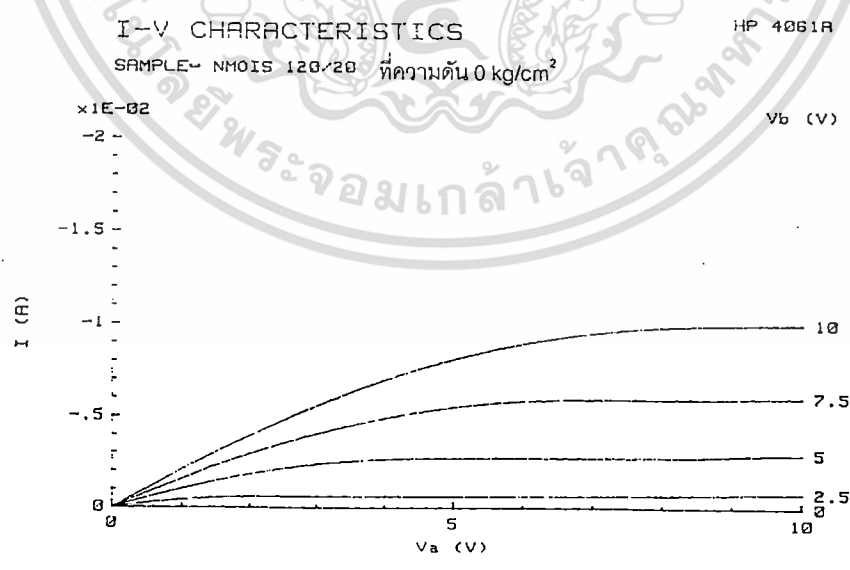
ในการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ NMOISFET จะทำการต่อวงจรวัดดังแสดงในภาพที่ 73 โดยในการทดสอบจะแปรค่า V_b จาก 0 ถึง 10 โวลต์ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังในภาพที่ 74

ภาพที่ 73



แสดงวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ NMOISFET

ภาพที่ 74



แสดงตัวอย่างผลการทดสอบค่ากระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการคำนวณโดยนำค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดัน แทนค่าลงในสมการกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET ดังสมการที่ 1.2 ในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัว และสมการที่ 1.3 ในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิ่มตัว เมื่อแทนค่า $\beta = k' \left(\frac{W}{L} \right)$ ลงไปจะหา k' ได้ดังสมการต่อไปนี้

สำหรับการทำงานในช่วงไม่อิ่มตัว

$$k' = \frac{2I_D L}{w \left[2(V_G - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2 \right]} \quad (4.1)$$

สำหรับการทำงานในช่วงอิ่มตัว

$$k' = \frac{2I_D L}{W(V_G - V_T)^2} \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาในช่วงอิ่มตัว โดยพิจารณาที่ $V_{GS} = -10$ โวลต์ สำหรับ PMOISFET และ $V_{GS} = 10$ โวลต์ สำหรับ NMOISFET แทนค่าต่างๆลงในสมการ 4.2 ดังนั้นจะได้ค่า k' ของ PMOISFET เป็น $2.424 \times 10^{-5} \text{ A/V}^2$ และค่า k' ของ NMOISFET เป็น $4.382 \times 10^{-5} \text{ A/V}^2$

ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณช่องทางเดินกระแส

จากแบบจำลองทางไฟสถับของ MOISFET พบค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกต (C_{ox}) มีค่าดังนี้

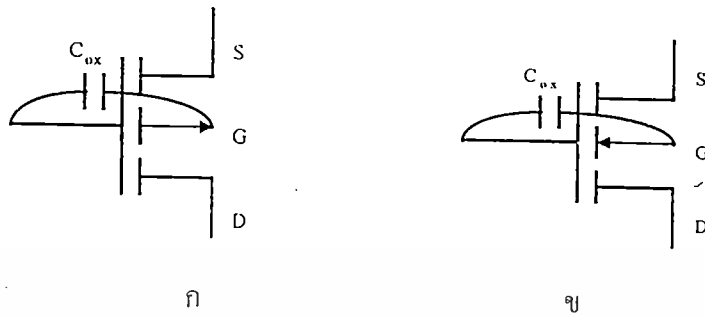
$$C_{ox} = C_s + C_c + C_d \quad (4.3)$$

ซึ่ง C_s และ C_d มีค่าน้อยมากเพราะส่วนที่ซ้อนทับมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงได้

$$C_{ox} = C_d \quad 4.4$$

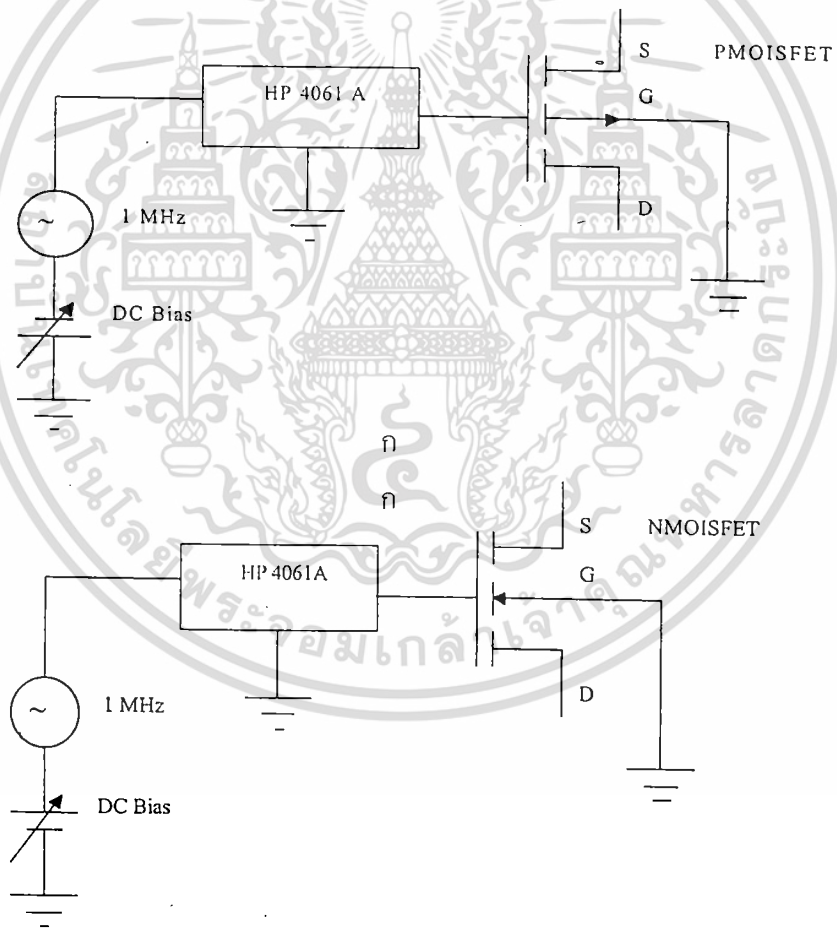
ดังนั้นวงจรสมมูลย์ของ MOISFET ที่มี C_{ox} จะเป็นดังภาพที่ 75

ภาพที่ 75



แสดงวงจรสมมูลย์ของ MOISFET ที่มี C_{ox} แฝงอยู่ (ก)PMOISFET (ข) NMOISFET
 ในการทดลองนี้ทำการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกต โดยใช้วงจรดังภาพที่ 76

ภาพที่ 76

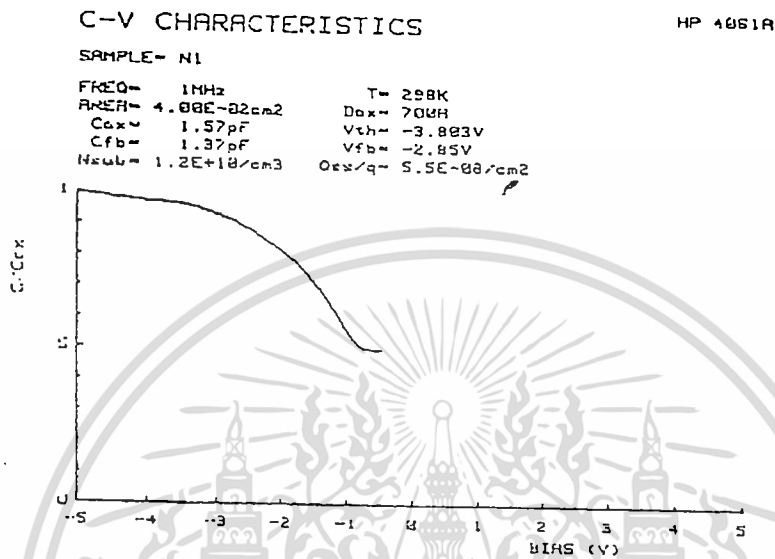


แสดงวงจรที่ใช้วัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ MOISFET (ก) สำหรับทดสอบ PMOISFET (ข)
 สำหรับทดสอบ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบสำหรับ PMOISFET จะแปรค่าแรงดัน DC ที่ไบอัสจาก 0 ถึง -5 โวลต์ แล้วทำการวัดค่าตัวเก็บประจุออกมา ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 77

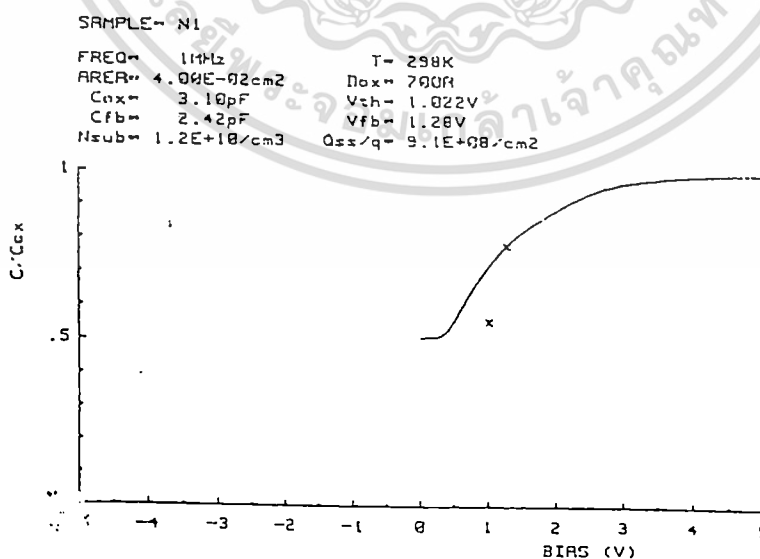
ภาพที่ 77



แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ PMOISFET

ในการทดสอบสำหรับ NMOISFET จะแปรค่าแรงดัน DC ที่ไบอัสจาก 0 ถึง 5 โวลต์ แล้วทำการวัดค่าตัวเก็บประจุออกมา ซึ่งตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 78

ภาพที่ 78

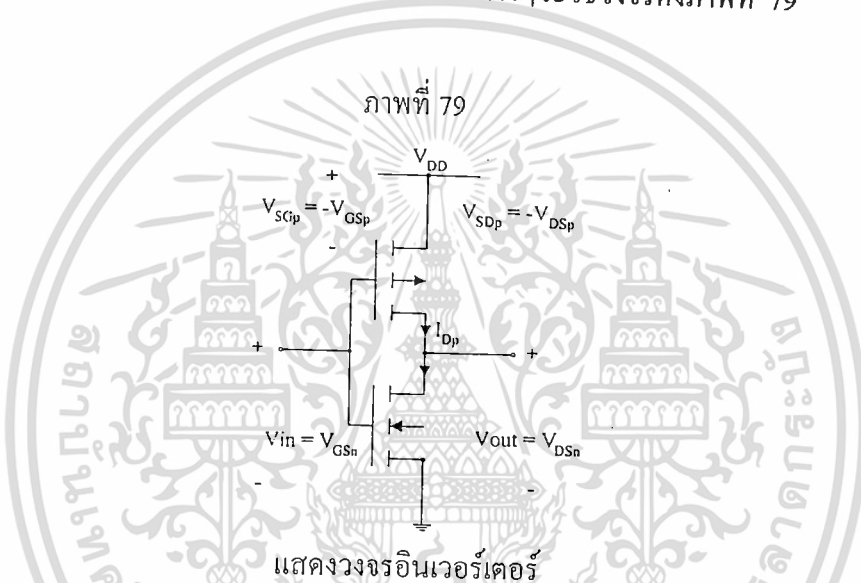


แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าตัวเก็บประจุที่ส่วนเกตของ NMOISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรมอนิเตอร์ที่มีทรานซิสเตอร์แบบ MOISFET แยกวางบนไดอะแฟรม เมื่อมีความดันมากระทำ

เมื่อทำการสร้างอินเวอร์เตอร์ จากทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOISFET บนไดอะแฟรม เสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะทำการตัดแยกชิปมาติดบนตัวถังแบบ TO-5 เพื่อนำมาทำการทดสอบวัดค่าเวลาของการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราว (transient response) และค่าเวลาหน่วง (propagation delay time) กับที่ความดันค่าต่างๆ ซึ่งการวัดค่าเวลาต่างๆจะใช้วงจรดังภาพที่ 79



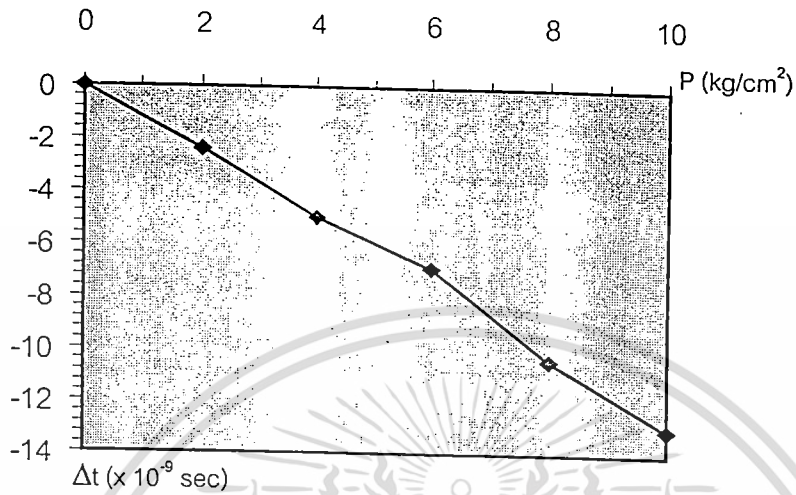
โดยกำหนดให้แรงดัน V_{DD} เท่ากับ 10 โวลต์ แล้วทำการป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมขนาด $10 V_{pp}$ ที่มีความกว้างของพัลส์ขนาด $200 \mu s$ เข้าทางอินพุตและวัดสัญญาณเอาต์พุตจากนั้นอ่านค่าเวลา t_{HL} , t_{LH} , t_{PHL} และ t_{PLH} ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อให้ค่าความดันที่มากกระทำบนไดอะแฟรมเพิ่มขึ้นจาก 0 kg/cm^2 ไปจนถึง 10 kg/cm^2 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 2 kg/cm^2

ซึ่งทำการแบ่งเงื่อนไขของการวางทรานซิสเตอร์บนไดอะแฟรมเป็นดังนี้

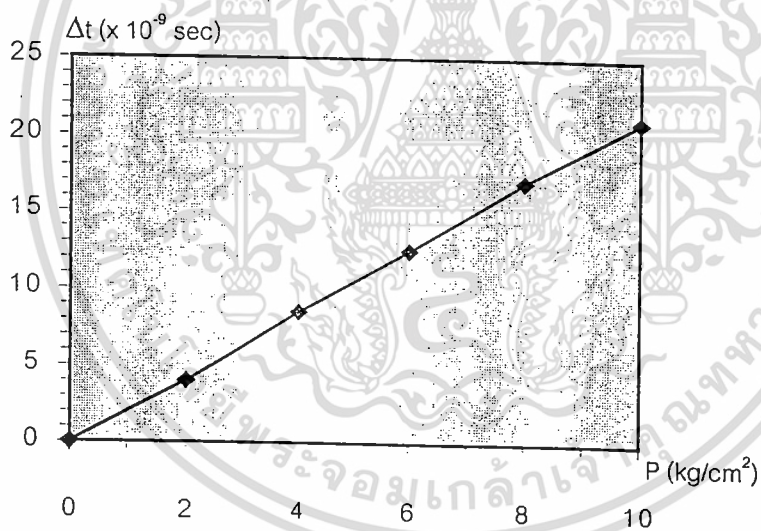
การทดลองและผลการทดลองหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรมอนิเตอร์ที่มี PMOSFET แยกวางบนไดอะแฟรมที่ความดันค่าต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทำการออกแบบวงจรมอนิเตอร์ดังภาพที่ 32(ก) และ 32(ข) ซึ่งมีการแยกวาง PMOSFET บนไดอะแฟรมแล้วทำการวัดค่าเวลา t_{LH} และ t_{PHL} ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดัน จากนั้นจึงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของเวลา (Δt) กับค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไป จะได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 80 และ 81

ภาพที่ 80



ก

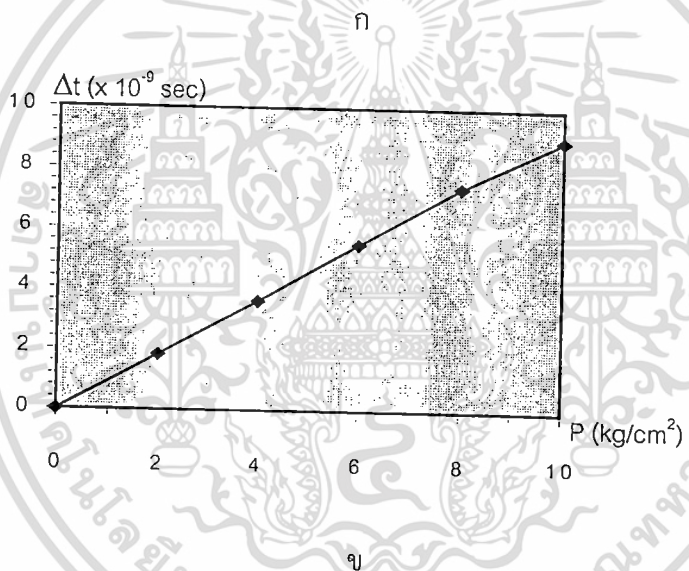
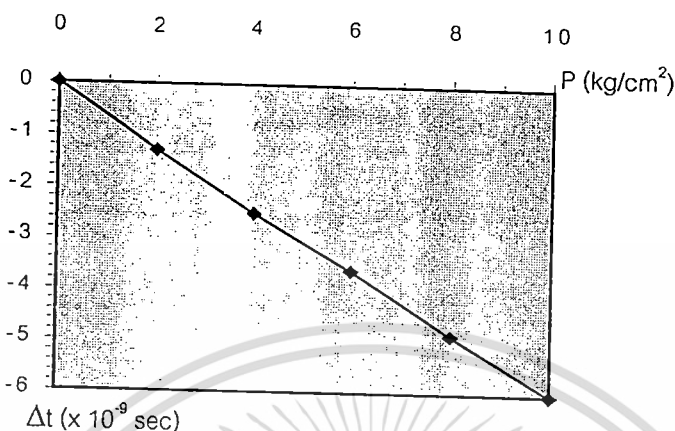


ข

แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ t_{LH} (Δt_{LH}) กับความดันที่เปลี่ยนแปลงของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มี PMOSFET แยกวงบนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 81



แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ t_{PLH} (Δt_{PLH}) กับความดัน ที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มี PMOSFET แยกวางบน ไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

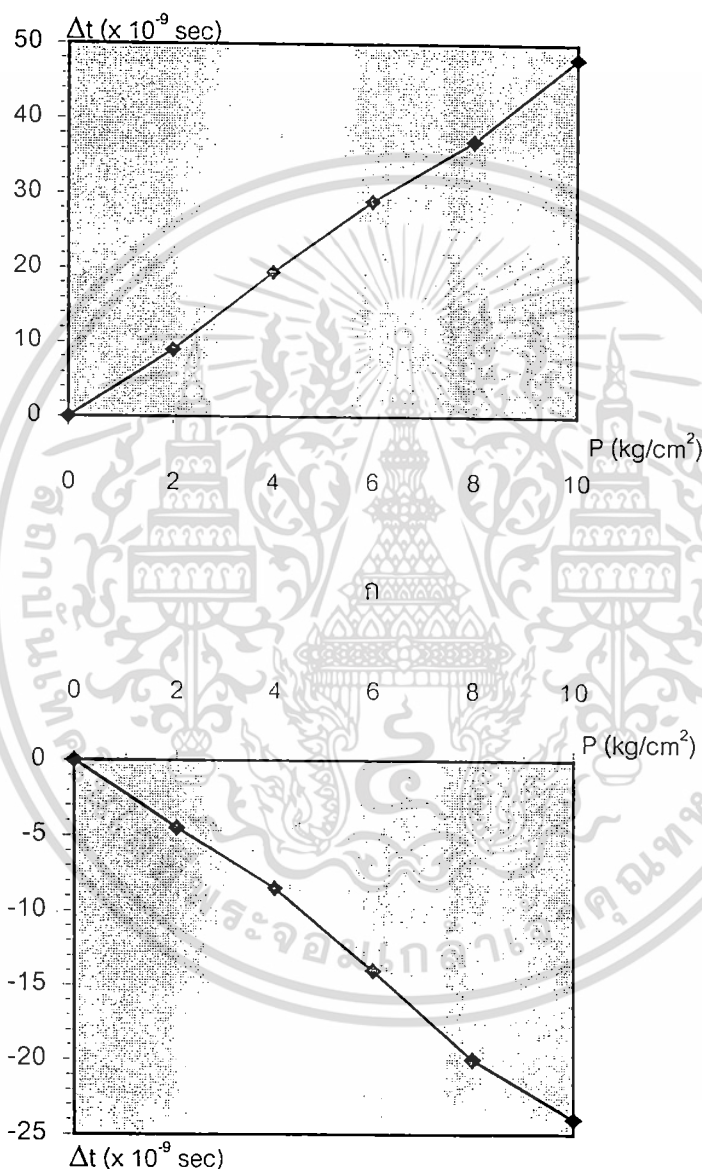
จากผลการทดลองพบว่าค่าเวลา t_{LH} และ t_{PLH} มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรม

การทดลองและผลการทดลองหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มี NMOISFET แยกวางบนไดอะแฟรมที่ความดันค่าต่าง ๆ

ในการทดลองนี้จะทำการออกแบบวงจรรินเวอร์เตอร์ดังภาพที่ 30(ก) และภาพที่ 30(ข) ซึ่งเป็นการแยกวาง NMOISFET บน ไดอะแฟรม แล้วทำการวัดค่าเวลา t_{HL} และ t_{PHL} ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความดัน จากนั้นจึงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ เวลา (Δt) กับ ค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไปจะได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 82 และ 83

ภาพที่ 82

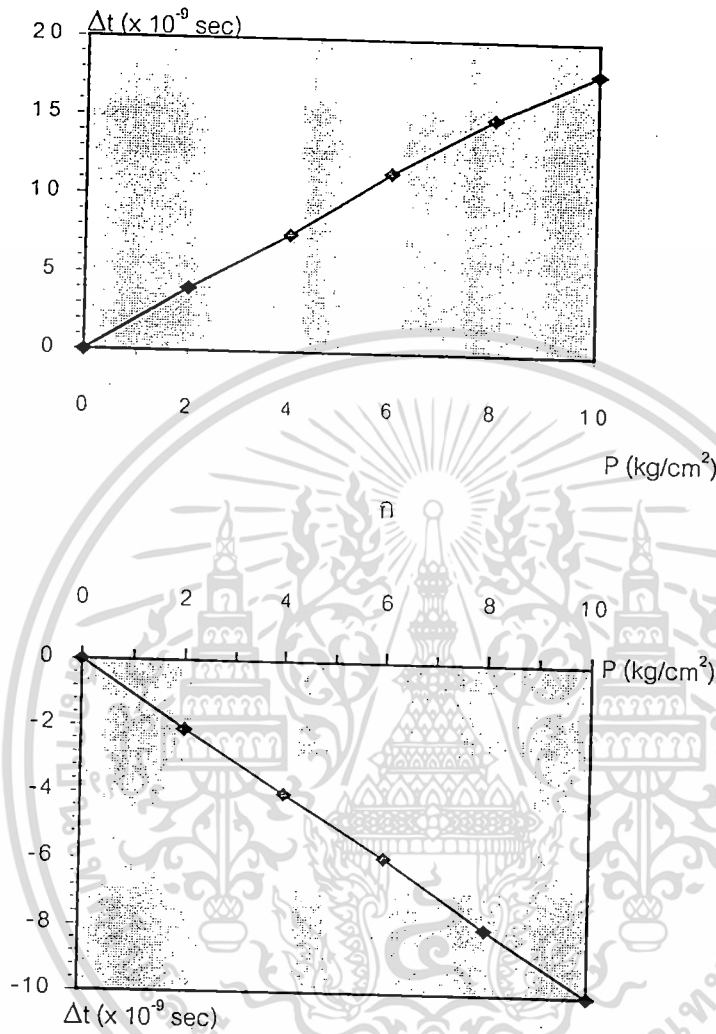


ข

แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ $t_{HL}(\Delta t_{HL})$ กับความดัน ที่เปลี่ยนแปลงไป ของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มี NMOISFET แยกวงบนไดอะเฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบ ของไดอะเฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะเฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 83



แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ $t_{PHL}(\Delta t_{PHL})$ กับความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มี NMOISFET แยกวางบนไดอะแฟรม (ก) เมื่อกระแสไหลขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) เมื่อกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

จากผลการทดลองพบว่าค่าเวลา t_{HL} และ t_{PHL} มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรถ้าเนคความถี่ควบคุมด้วยความดัน โครงสร้าง

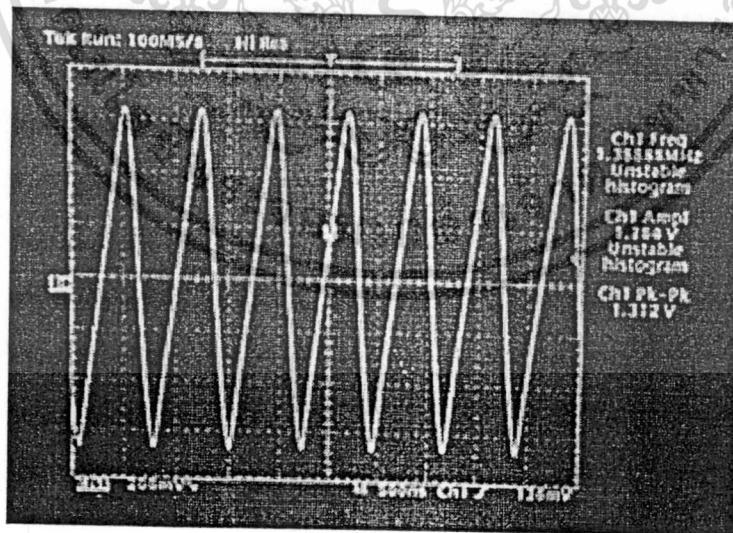
ทรานซิสเตอร์ แบบ CMOIS

จากการออกแบบและสร้างวงจรรวมริงออสซิลเลเตอร์ หรือวงจรรวมที่ให้สัญญาณความถี่คิงในบทที่ 3 เสร็จแล้ว ขั้นตอนการทดสอบจะทำการตัดแยกชิปมาติดลงบนตัวถังแบบ TO-5 เพื่อนำมาทดสอบวัดค่าความถี่ของวงจรถ้าเนคความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อความดันมีค่าเปลี่ยนแปลง โดยมีเงื่อนไขของการวางตัวทรานซิสเตอร์แบบ MOISFET บนไดอะแฟรมแบบต่าง ๆ ดังที่ได้ออกแบบไว้แล้ว แต่ในหัวข้อแรกแสดงถึงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ กับแรงดันไฟเลี้ยงของวงจรถ้าเนคความถี่ในแต่ละจำนวนชุดของวงจรถ้าเนคความถี่ที่ประกอบเป็นวงจรรวมริงออสซิลเลเตอร์ จากนั้นหัวข้อต่อไปจึงจะแสดงผลของความถี่ที่ทำให้ความถี่ของวงจรมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

การทดลองและผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดันไฟเลี้ยง

ในการใช้งานวงจรถ้าเนคความถี่จะทำการจ่ายไฟเลี้ยงแก่วงจรค่าหนึ่งที่มีค่ามากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของวงจรถ้าเนคความถี่ ลักษณะของสัญญาณความถี่ของวงจรถ้าเนคความถี่ที่เกิดขึ้นแสดงได้ ดังภาพที่ 84

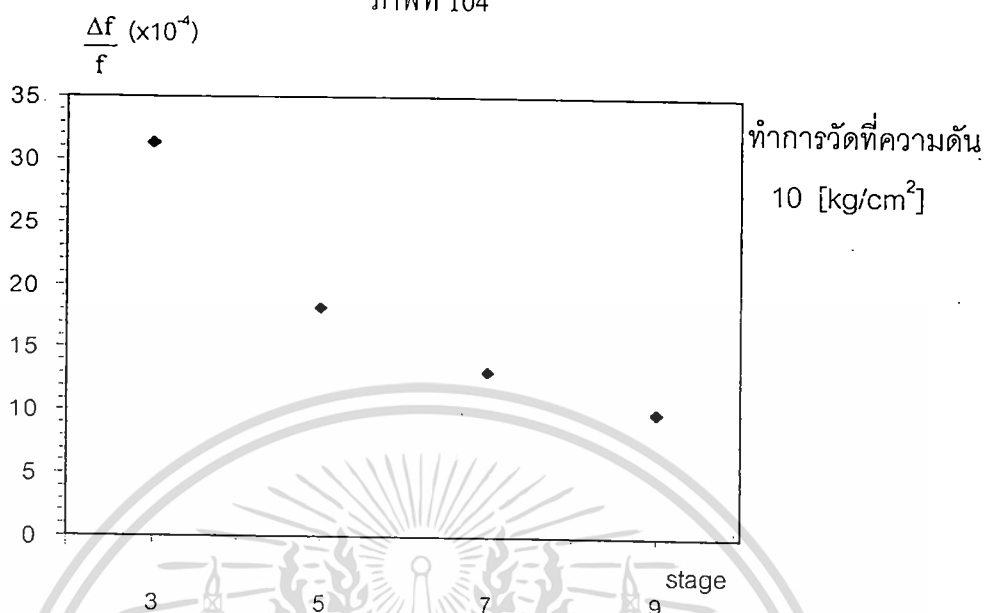
ภาพที่ 84



แสดงลักษณะของสัญญาณขาออกของวงจรถ้าเนคความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 104



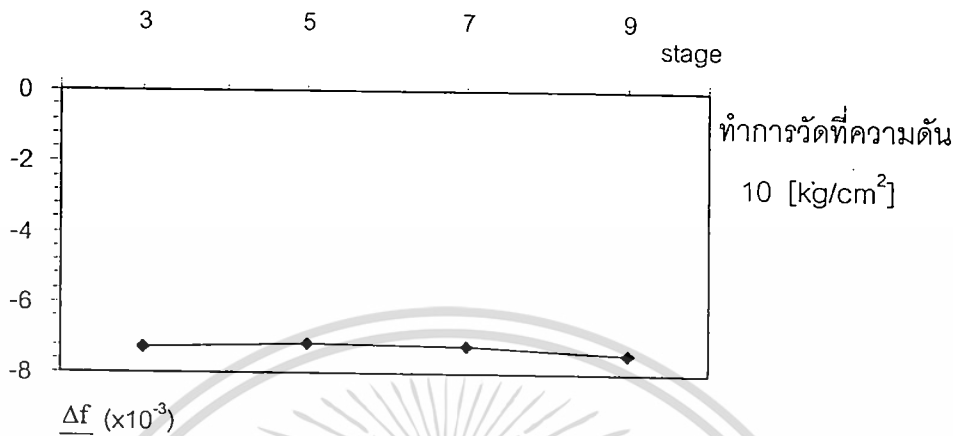
แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ เมื่อทำการวาง NMOISFET จำนวน 1 ตัว บนไดอะแฟรม โดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

จากผลการทดลองพบว่าถ้าจำนวนสถานะมีค่ามากขึ้นความไวจะมีค่าลดลง

การหาความไวของวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดันแบบที่ทำการวาง PMOISFET จำนวนทั้งหมดและแบบที่ทำการวาง NMOISFET จำนวนทั้งหมดของวงจรริงออสซิลเลเตอร์โดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของ ไดอะแฟรม ที่มีจำนวนสถานะต่าง ๆ

เมื่อทำการสร้างวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่มีกรวาง PMOISFET จำนวนทั้งหมด บนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม จากนั้นทำการวัดค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปของวงจรริงออสซิลเลเตอร์แต่ละสถานะคือ 3, 5, 7 และ 9 โดยวัดที่ความดัน 10 kg/cm² หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความไว ($\Delta f/f$) จะได้กราฟดังภาพที่ 105

ภาพที่ 105



แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์เมื่อทำการวาง PMOISFET จำนวนทั้งหมดบนไดอะแฟรมโดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

และเมื่อทำการสร้างวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่มีการวาง NMOISFET จำนวนทั้งหมดบนไดอะแฟรมโดยมีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม จากนั้นทำการวัดค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปที่ความดัน 10 kg/cm² แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความไว ($\Delta f/f$) จะได้กราฟดังภาพที่ 106



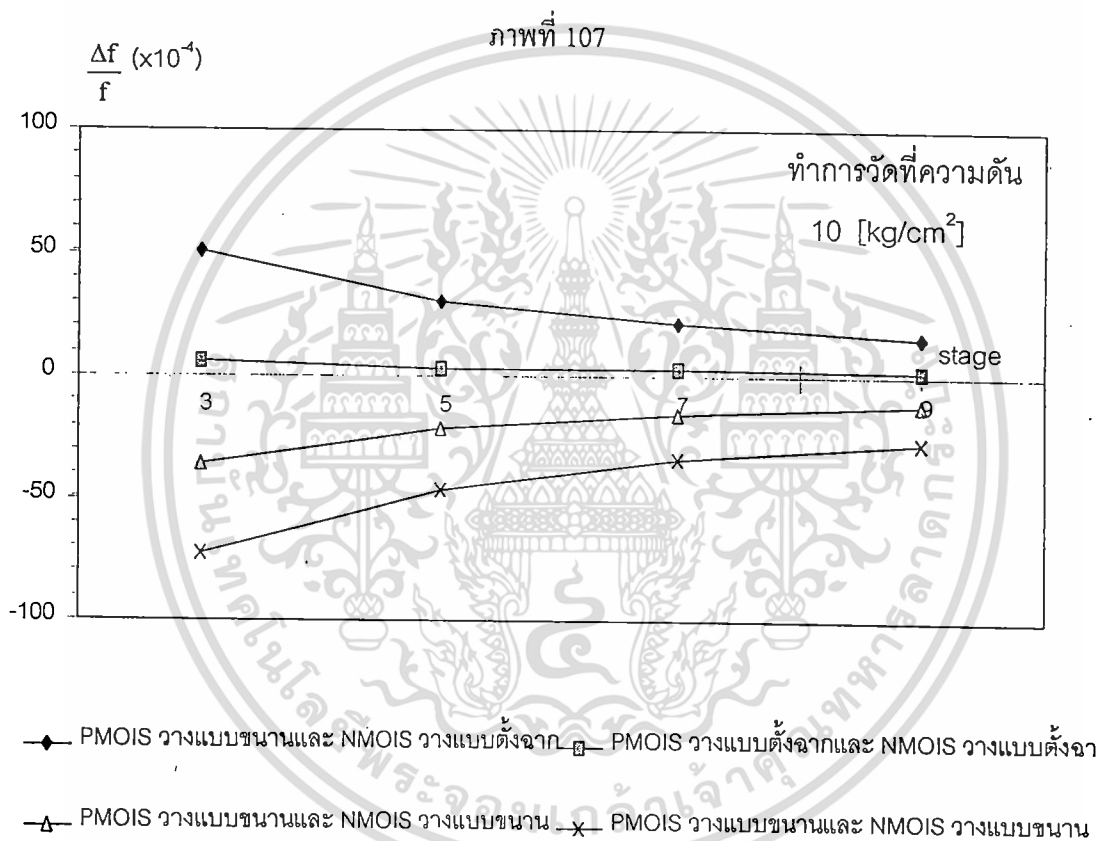
แสดงผลการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับ จำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ เมื่อทำการวาง NMOISFET จำนวนทั้งหมดบนไดอะแฟรม โดยให้มีทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

จากผลการทดลองพบว่าความไวมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความไวของวงจรถูกกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดันแบบที่ทำการแยกวงจรถออินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ไว้บนไดอะแฟรม ที่จำนวนสถานะต่างๆ

เมื่อทำการสร้างวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่มีการวางวงจรถออินเวอร์เตอร์ 1 ชุดไว้บนไดอะแฟรม โดยที่มีเงื่อนไขของการวาง PMOISFET และ NMOISFET ดังที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 จากนั้นทำการวัดค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปที่ค่าความดันเป็น 10 kg/cm^2 หลังจากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความไว ($\Delta f/f$) จะได้กราฟดังภาพที่ 107



แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความไวกับจำนวนสถานะของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ เมื่อทำการแยกวงจรถออินเวอร์เตอร์ 1 ชุด บนไดอะแฟรม โดยที่ PMOISFET และ NMOISFET มีทิศทางกระแสไหลของกระแสแบบต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าการวางวงจรถออินเวอร์เตอร์ให้ PMOISFET มีกระแสไหลตั้งฉาก และ NMOISFET มีกระแสขนาน จะมีความไวมากที่สุด ส่วนกรณีที่วางอินเวอร์เตอร์ให้ PMOISFET มีกระแสตั้งฉาก และ NMOISFET มีกระแสไหลตั้งฉากจะมีความไวที่น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบและสร้าง CMOIS ริงออสซิลเลเตอร์ ที่ควบคุมค่าความถี่ด้วยความดันขึ้นมานั้น โครงสร้างของอุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยชิปฐานรอง ซึ่งใช้แผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยวชนิดเอ็นระนาบ (100) พื้นที่ ส่วนรับรู้ความไวเป็นแผ่นไดอะแฟรมบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการกัดซิลิกอนในสารละลาย EPD และส่วนของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรที่สร้างจากทรานซิสเตอร์ชนิด MOISFET โดยทำการแยก MOISFET บางตัวของวงจรริงออสซิลเลเตอร์วางไว้บนไดอะแฟรมบาง จากนั้นนำชิปอุปกรณ์นี้ไปบรรจุในตัวถังกระป๋องแบบ TO-5 โดยมีรูสำหรับให้ความดันเข้า-ออก แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ผลการทดสอบปรากฏว่าความถี่ของวงจรริงออสซิลเลเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความดันที่นำไป โดยทั้งนี้การที่ค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการแยกทรานซิสเตอร์ที่ประกอบเป็นวงจรวางไว้บนไดอะแฟรมบาง

จากบทที่ 1 กล่าวถึงผลของปรากฏการณ์เปียโซรีซิสทีฟในซิลิกอนต่อทรานซิสเตอร์ ความดันโครงสร้างแบบ MOISFET นั้นจะพบว่าเมื่อวาง MOISFET บนไดอะแฟรมบางและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความดันเป็นบวก มากกระทำ จะมีผลทำให้ค่ากระแส I_{DS} ของ MOISFET เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนั้น เกิดจากค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในซิลิกอนที่เติมอะตอมทองคำ (μ_{Au}) มีการเปลี่ยนแปลงนั่นเอง โดยขึ้นอยู่กับชนิดของ MOISFET และทิศทางการไหลของกระแสเมื่อเทียบกับขอบของไดอะแฟรม

ดังนั้นเมื่อทำการศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบขึ้นด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด PMOISFET และ NMOISFET โดยทำการแยกวาง PMOISFET หรือ NMOISFET บนไดอะแฟรมบางแล้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ทำการศึกษาคือ คุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราว จะพบว่าเวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราวของวงจรริงออสซิลเลเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาจากสมการ (2.13), (2.15), (2.17) และ (2.18)

$$t_{HL} = \tau_n \left\{ \frac{2V_{Tn}}{(V_1 - V_{Tn})} + \ln \left[\frac{2(V_1 - V_{Tn})}{V_0} - 1 \right] \right\} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_{LH} = \tau_p \left\{ \frac{2|V_{Tp}|}{(V_1 - |V_{Tp}|)} + \ln \left[\frac{2(V_1 - |V_{Tp}|)}{V_0} - 1 \right] \right\} \quad (5.2)$$

$$t_{PHL} = \tau_n \left\{ \frac{2V_{Tn}}{(V_{OH} - V_{Tn})} + \ln \left[\frac{4(V_{OH} - V_{Tn})}{(V_{OH} + V_{OL})} - 1 \right] \right\} \quad (5.3)$$

$$t_{PLH} = \tau_p \left\{ \frac{2|V_{Tp}|}{(V_{OH} - |V_{Tp}|)} + \ln \left[\frac{4(V_{OH} - |V_{Tp}|)}{(V_{OH} + V_{OL})} - 1 \right] \right\} \quad (5.4)$$

โดยที่ τ_n และ τ_p คือ

$$\tau_n = \frac{C_{out}}{\beta_n (V_1 - V_{Tn})} \quad (5.5)$$

$$\tau_p = \frac{C_{out}}{\beta_p (V_1 - |V_{Tp}|)} \quad (5.6)$$

โดยที่ β_n เป็นอัตราขยายของ NMOISFET มีค่าเป็น

$$\beta_n = k' \left(\frac{W}{L} \right) \quad (5.7)$$

$$k' = \mu_{nAu} \cdot \left(\frac{\epsilon_{OX}}{T_{OX}} \right) \quad (5.8)$$

และ β_p เป็นอัตราขยายของ PMOISFET มีค่าเป็น

$$\beta_p = k' \left(\frac{W}{L} \right) \quad (5.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k' = \mu_{pAu} \cdot \left(\frac{\epsilon_{OX}}{T_{OX}} \right) \quad (5.10)$$

จากที่กล่าวมาแล้วคือถ้าวง NMOISFET บนไดอะแฟรมและมีความดันมากจะทำให้ค่า μ_{nAu} เปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกันถ้าวง PMOISFET บนไดอะแฟรมก็จะทำให้ค่า μ_{pAu} เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจากสมการข้างต้นจะเห็นว่า เมื่อ μ_{Au} เปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ β_n และ β_p เปลี่ยนแปลง และค่าอัตราขยาย β จะมีความสัมพันธ์กับค่าเวลาการตอบสนองสัญญาณชั่วคราว ดังสมการที่ (5.1) ถึง (5.6) โดยที่ ถ้า β_n เปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่า t_{HL} , t_{PHL} เปลี่ยนแปลง และถ้า β_p เปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ค่า t_{LH} , t_{PLH} เปลี่ยนแปลงไป

จากนั้นจึงทำการออกแบบวงจรริงออสซิลเลเตอร์ ซึ่งตัววงจรประกอบด้วย วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ต่ออนุกรมกันเป็นจำนวนคี่ และทำการป้อนกลับสัญญาณขาออกของวงจรให้แก่ วงจรอินเวอร์เตอร์สถานะแรกโดยตรง ซึ่งความถี่ของวงจร หาได้จากสมการที่ (2.17)

$$f = \frac{1}{2Nt_p} \quad (5.11)$$

โดย t_p มีค่าเป็น

$$t_p = \frac{1}{2}(t_{PHL} + t_{PLH}) \quad (5.12)$$

จากสมการ (5.12) จะเห็นว่าถ้า t_{PHL} หรือ t_{PLH} เปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ค่า t_p ของ วงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงไป โดยถ้ากำหนดให้ t_{PHL} ที่เปลี่ยนแปลงไป t'_{PHL} ดังนั้นจะได้ค่าเวลา หนึ่งค่าใหม่เป็น t'_p หรือเขียนเป็นสมการคือ

$$t'_p = \frac{1}{2}(t'_{PHL} + t_{PLH}) \quad (5.13)$$

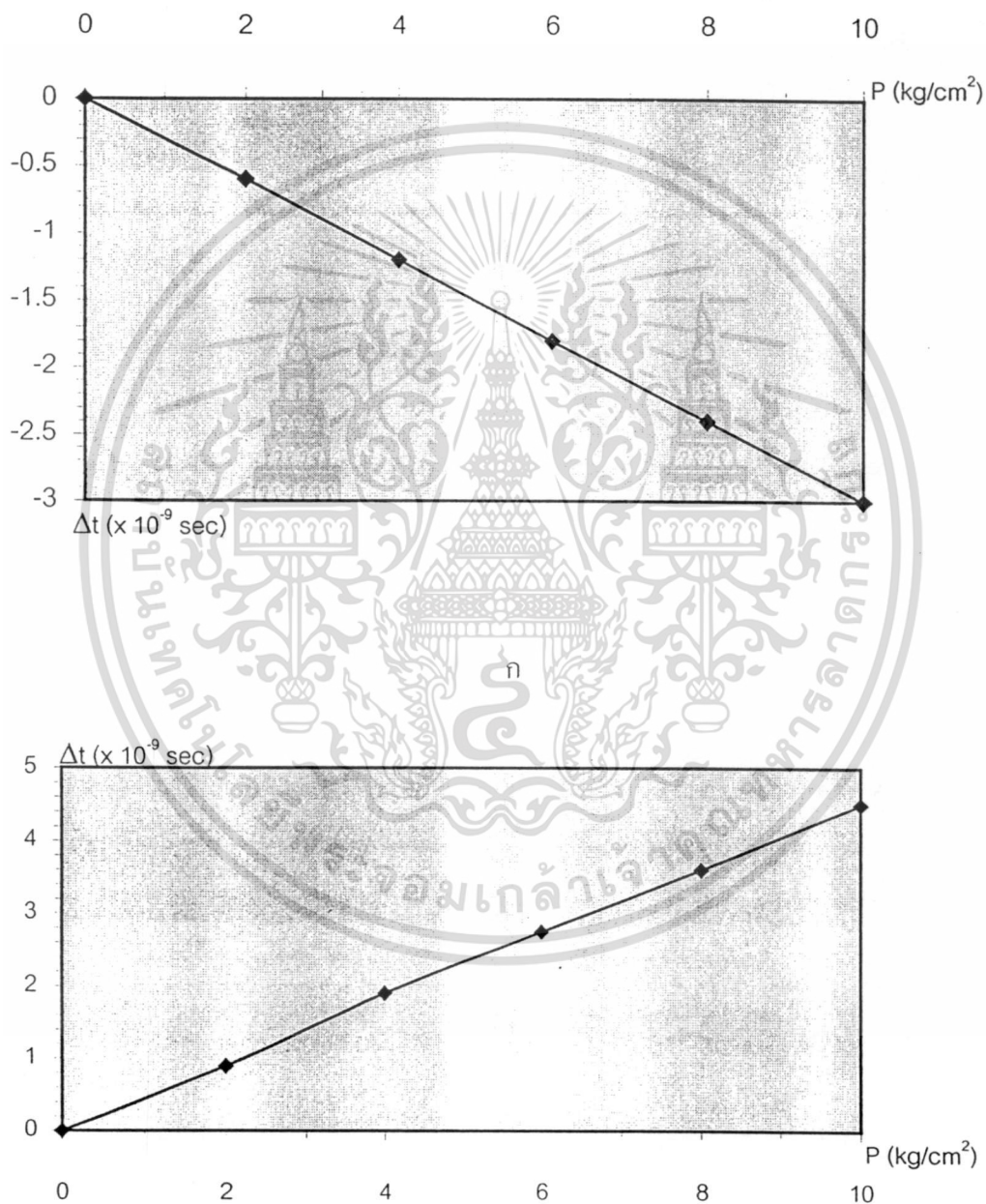
และถ้ากำหนดให้ t_{PLH} ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็น t'_{PLH} ดังนั้น จะได้ค่าเวลาหนึ่งค่าใหม่ (t'_p) เป็นดังสมการ

$$t'_p = \frac{1}{2}(t_{PHL} + t'_{PLH}) \quad (5.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

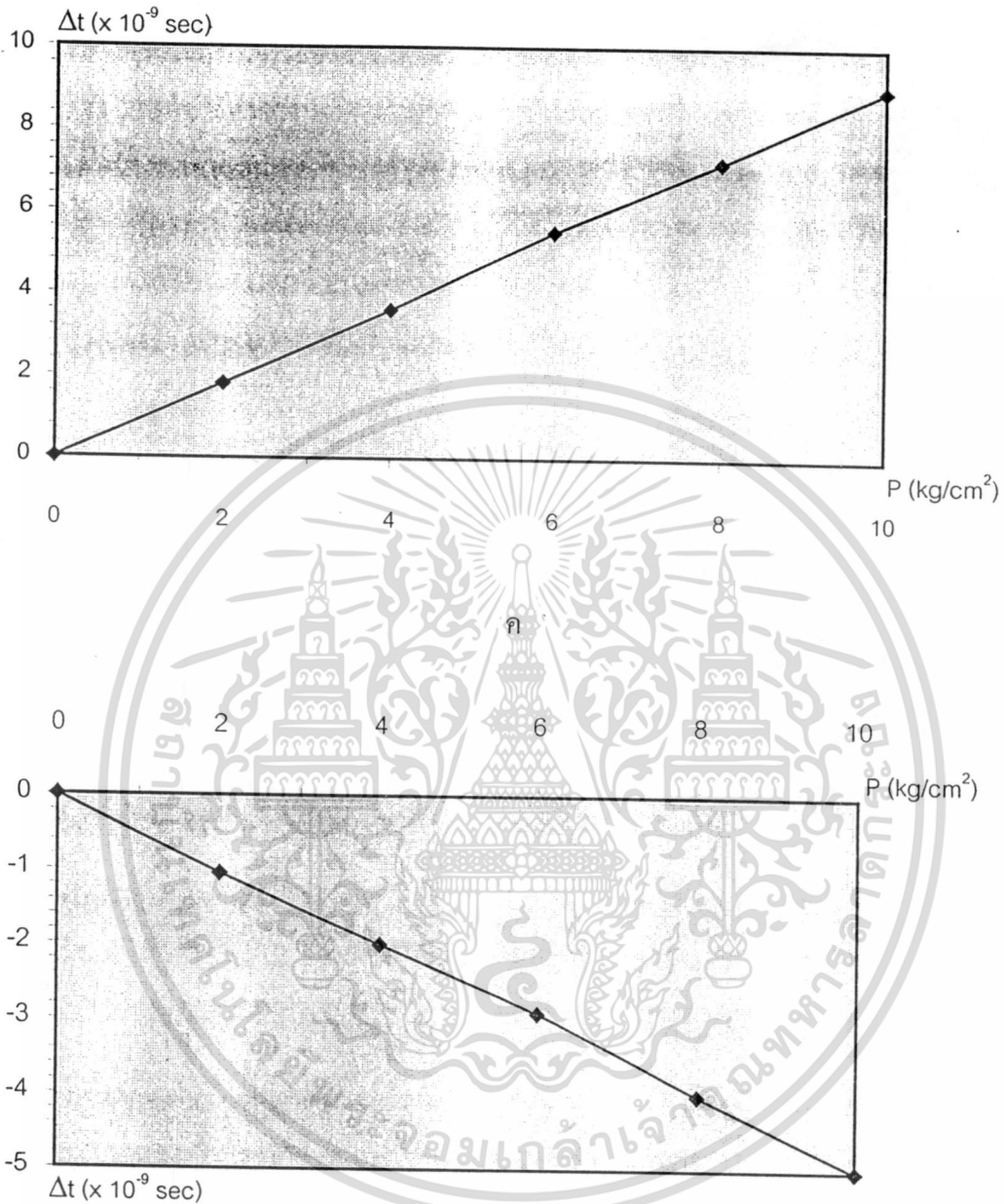
ดังนั้นจากการทดลองหาค่า t_{PLH} และ t_{PHL} ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดัน จึงทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าความแตกต่างของเวลาหน่วง (Δt_p) กับค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงได้ ดังภาพที่ 108

ภาพที่ 108



๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง

แสดงความสัมพันธ์ของค่า Δt_p กับค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรรินเวอร์เตอร์ (ก) แยกวง PMOSFET ให้ทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ข) แยกวง PMOSFET ให้ทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม (ค) แยกวง NMOISFET ให้ทิศทางการไหลของกระแสขนานกับขอบของไดอะแฟรม (ง) แยกวง NMOISFET ให้ทิศทางการไหลของกระแสตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 5.11 เมื่อ t_p เปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่า f เปลี่ยนแปลงไปโดยถ้า t_p มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นจะมีผลทำให้ค่าความถี่มีค่าลดลง และค่า t_p มีค่าลดลงเมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นก็จะทำให้ค่าความถี่มีค่ามากขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่า ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงจะมากขึ้นหรือลดลงเนื่องมาจากชนิดของ MOISFET และทิศทางการไหลของกระแสของ MOISFET บนไดอะแฟรม นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ยังขึ้นอยู่กับจำนวนของ ทรานซิสเตอร์ที่วางอยู่บนไดอะแฟรมด้วย ซึ่งพิจารณาได้เป็นดังนี้

-กรณีที่ว่าทรานซิสเตอร์ 1 ตัว ไว้บนไดอะแฟรม

จากสมการ 5.11 คือ
$$f = \frac{1}{2Nt_p}$$

เมื่อ N คือ จำนวนของอินเวอร์เตอร์ที่เป็นจำนวนคี่

ดังนั้นเมื่อวางทรานซิสเตอร์ 1 ตัว ไว้บนไดอะแฟรม และมีความดันมากระทำ จะทำให้ได้ค่าเวลาหน่วงของวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 ชุด เป็น ค่าใหม่ คือ t'_p แต่จำนวนชุดของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เหลืออยู่คือ $N-1$ ชุด นี้ยังมีค่าเวลาหน่วงค่าเดิมคือ t_p ถ้ากำหนดให้ความถี่ใหม่ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็น f' ดังนั้นสมการที่ 5.11 จะเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้

$$f' = \frac{1}{2[(N-1)t_p + t'_p]} \quad (5.15)$$

ซึ่งจากสมการนี้แสดงผลการทดลองได้ดังในภาพที่ 87 ,89 ,91 และ 93 โดยค่าความถี่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตาม t'_p ที่เปลี่ยนแปลงไป

-กรณีที่วางทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันหมดทุกตัวของวงจรอินเวอร์เตอร์วางไว้บนไดอะแฟรมกรณีนี้ ค่าเวลาหน่วงของวงจรอินเวอร์เตอร์ทุกชุดมีการเปลี่ยนแปลงโดยแสดงได้ดังสมการ

$$f' = \frac{1}{2Nt'_p} \quad (5.16)$$

และจากสมการที่ 5.16 นี้จะแสดงผลการทดลองได้ดังในภาพที่ 88 , 90 ,92 และ 94 จะเห็นว่าค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเปลี่ยนแปลงมากกว่าในกรณีข้างต้นเพราะว่าค่า t'_p ที่เปลี่ยนแปลง

ไปนั้นจะคูณกับค่าจำนวนชุดของอินเวอร์เตอร์ (N) ดังในสมการ 5.16 ดังนั้นความถี่จึงเปลี่ยนแปลงมากกว่า

ในส่วนเรื่องของความไว้นั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดความไวเป็นค่าความแตกต่างของความถี่ (Δf) ที่ความดัน 10 kg/cm^2 หารด้วยค่าความถี่เริ่มต้น(f) หรือคือ $\Delta f/f$ จากผลการทดลองในกรณีที่ว่าทรานซิสเตอร์ 1 ตัว ไวบนไดอะแฟรมจะพบว่าวงจรจริงออสซิลเลเตอร์ที่มีจำนวนสถานะน้อยจะมีค่าความไวมากกว่าวงจรจริงออสซิลเลเตอร์ที่มีจำนวนสถานะมาก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ 5.15 ส่วนในกรณีที่วางทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันหมดทุกตัว วางไวบนไดอะแฟรม ค่าความไวของวงจรจริงออสซิลเลเตอร์ทุกสถานะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ 5.16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 จะพบว่า ความถี่ของวงจรถูกกำเนิดความถี่จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าไฟเลี้ยง (V_{DD}) ที่ให้และจำนวนของ CMOS อินเวอร์เตอร์ที่ประกอบเป็นวงจร นั่นคือ ถ้าค่าไฟเลี้ยงเพิ่มขึ้นความถี่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และถ้าจำนวนสถานะมีค่ามากขึ้น ค่าความถี่จะมีค่าน้อยลง นอกจากนี้เมื่อทำการแยกวงจรถานซิสเตอร์บางตัวที่ประกอบเป็นวงจรถูกกำเนิดความถี่ไว้บนไดโอดแอมป์ และให้มีความแตกต่างของความดันกับความดันบรรยากาศมีค่าเป็นบวกมากกระทำต่อไดโอดแอมป์บางจะพบว่า ค่าความถี่ของวงจรถูกกำเนิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ได้เป็นดังนี้

- วงจรจริงออสซิลเลเตอร์ที่ทำการแยกวง PMOSFET 1 ตัว ไว้บนไดโอดแอมป์ ให้มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดโอดแอมป์เมื่อมีความดันมากกระทำทำให้ค่าความถี่ลดลงหรือ Δf เป็นลบมากขึ้น และเมื่อทำการแยกวง PMOSFET ทุกตัวของวงจรวีบนไดโอดแอมป์ให้กระแสไหลขนานกับขอบของไดโอดแอมป์เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่า Δf เป็นลบมากกว่าวง PMOSFET 1 ตัว

- วงจรจริงออสซิลเลเตอร์ที่ทำการแยกวง PMOSFET 1 ตัว ไว้บนไดโอดแอมป์ ให้มีกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดโอดแอมป์เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่าความถี่มากขึ้น หรือ Δf เป็นบวกมากขึ้น และเมื่อทำการแยกวง PMOSFET ทุกตัวของวงจรวีบนไดโอดแอมป์ให้กระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดโอดแอมป์เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่า Δf เป็นบวกมากกว่าวง PMOSFET 1 ตัว

- วงจรจริงออสซิลเลเตอร์ที่ทำการแยกวง NMOISFET 1 ตัว ไว้บนไดโอดแอมป์ ให้มีกระแสไหลขนานกับขอบของไดโอดแอมป์เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่าความถี่เพิ่มขึ้นหรือ Δf เป็นบวกมากขึ้น และเมื่อทำการแยกวง NMOISFET ทุกตัวของวงจรวีบนไดโอดแอมป์ให้กระแสไหลขนานกับขอบของไดโอดแอมป์เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่า Δf เป็นบวกมากกว่าวง PMOSFET 1 ตัว

- วงจรจริงออสซิลเลเตอร์ที่ทำการแยกวง NMOISFET 1 ตัว ไว้บนไดโอดแอมป์ ให้มีกระแสไหลตั้งฉากกับขอบของไดโอดแอมป์เมื่อมีความดันมากกระทำจะทำให้ค่าความถี่ลดลง หรือ Δf เป็นลบมากขึ้น และเมื่อทำการแยกวง NMOISFET ทุกตัวของวงจรวีบนไดโอดแอมป์ให้มีกระแสไหล

ตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมเมื่อมีความดันมากระทำจะทำให้ค่า Δf เป็นลบมากกว่าวง NMOISFET 1 ตัว

ความไวของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมค่าความถี่ด้วยความดันโครงสร้าง CMOS นี้ จะขึ้นอยู่กับจำนวนสถานะหรือจำนวนชุดของวงจรรินเวอร์เตอร์ที่มาประกอบเป็นวงจร และจำนวนของทรานซิสเตอร์ที่แยกวางบนไดอะแฟรม กล่าวคือถ้าวงจรมีเงื่อนไขการวางทรานซิสเตอร์บนไดอะแฟรมเหมือนกันจะได้ว่าวงจรมีชุดของอินเวอร์เตอร์น้อยจะมีความไวมากกว่าวงจรมีชุดของอินเวอร์เตอร์มาก ส่วนจำนวนของทรานซิสเตอร์ที่แยกวางบนไดอะแฟรมนั้น ถ้าวงจรมีจำนวนสถานะของวงจรรินเวอร์เตอร์เท่ากันจะได้ว่าวงจรมีจำนวนทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมดของวงจรไว้บนไดอะแฟรมนั้น จะมีความไวมากกว่าวงจรมีจำนวนทรานซิสเตอร์เพียง 1 ตัว บนไดอะแฟรม แต่ในกรณีนี้ถ้าเทียบความไวระหว่างวงจรมีสถานะน้อยกับวงจรมีสถานะมากจะพบว่ามีความไวใกล้เคียงกัน

ซึ่งจากผลการทดลองถ้าพิจารณาจากริงออสซิลเลเตอร์ 3 สถานะ ที่มีการแยกวาง MOISFET 1 ตัว บนไดอะแฟรมจะพบว่าที่ความดัน 10 kg/cm^2 วงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่แยกวาง PMOISFET ตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรมจะมีความไวมากกว่าวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่แยกวาง PMOISFET ขนานกับขอบของไดอะแฟรม และวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่แยกวาง NMOISFET ขนานกับขอบของไดอะแฟรมจะมีความไวมากกว่าวงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่แยกวาง NMOISFET ตั้งฉากกับขอบของไดอะแฟรม ดังนั้น เมื่อทำการออกแบบวางอินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ของวงจรริงออสซิลเลเตอร์ แยกวางไว้บนไดอะแฟรม โดยที่แบ่งเงื่อนไขให้ทิศทางการไหลของกระแสของ PMOISFET และ NMOISFET ที่ประกอบเป็นวงจรรินเวอร์เตอร์นี้เป็นแบบต่าง ๆ ดังที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 นั้น จากผลการทดลองจะพบว่า กรณีที่วาง PMOISFET มีทิศทางการไหลของกระแสเป็นแบบตั้งฉากและ NMOISFET มีทิศทางการไหลของกระแสเป็นแบบขนานกับขอบของไดอะแฟรมนี้ จะมีค่าความไวมากที่สุด

วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการสร้างวงจรรักษาความถี่ที่ควบคุมด้วยแรงดันอากาศโดยใช้โครงสร้างแบบ CMOS นี้ เป็นการสร้างวงจรรวมที่มีกระบวนการสร้างยุ่งยากกว่าการสร้าง CMOS ทั่วไป โดยกระบวนการที่เพิ่มขึ้นคือการกัดโครงสร้างเป็นไดอะแฟรมบาง และกระบวนการแพร่สารเจือทองคำเนื่องจากการสร้างไดอะแฟรมบางเป็นกระบวนการขั้นตอนแรก ๆ ดังนั้นในการสร้าง กระบวนการถัดไปจึงต้องทำด้วยความระมัดระวังอย่างมาก มิฉะนั้นไดอะแฟรมอาจทะลุก่อนที่จะสร้างอุปกรณ์สำเร็จและไดอะแฟรมที่ดีจะต้องมีผิวที่ราบเรียบไม่ขรุขระ ไม่มีความลาดเอียง และมีความสม่ำเสมอ ดังนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคในการทำขั้นตอนนี้จึงยุ่งยากพอสมควร และในส่วนของกระบวนการแพร่สารเจือทองคำนั้น จำเป็นต้องทำการควบคุมให้ปริมาณทองคำเข้าไปในครั้งละ 1 แผ่น เท่านั้น จึงจะสามารถควบคุมปริมาณอะตอมสารเจือทองคำได้เป็นอย่างดีซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่ประกอบเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์มีคุณภาพดีนั่นเอง

แนวทางในการพัฒนา

จากผลการทดลองนั้น เราสามารถวัดค่าข้อมูลออกมาเป็นความถี่ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าความแตกต่างของความถี่ (Δf) อยู่ในระดับ 10^3 Hz ขึ้นไป ซึ่งถือว่ามีค่าความไวต่อการตอบสนองต่อค่าความดันที่เพิ่มขึ้นได้ดี ดังนั้นถ้าเราสามารถพัฒนาวงจรออสซิลเลเตอร์นี้ ให้มีค่าความถี่สูงกว่านี้ ซึ่งก็สามารถทำได้โดยลดขนาดของความยาวของช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์ลงก็จะทำให้ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงมีค่ามากขึ้น ซึ่งก็จะเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาให้อุปกรณ์นี้มีความไวสูงๆ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ตัจจา ส่งศิริ “ การศึกษาวิจัย และพัฒนาเฟทที่มีโครงสร้างใหม่แบบ MOIS” วิทยานิพนธ์ สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2532
- [2] จีรวัดณ์ ปานกลาง “การศึกษา วิจัย และพัฒนาทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS เป็นวงจรรวมขนาดเล็ก” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535
- [3] อัมพร โพธิ์ไย, วีระ เพ็งจันทร์, เต็มพงษ์ เพ็ชรภูถ, ผศ.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง, รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช, “คุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างซิมอสในกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน”, การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2535, หน้า 479-504.
- [4] อัมพร โพธิ์ไย, จีรวัดณ์ ปานกลาง, ผศ.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง, รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช และ Prof. Dr. Masamori Iida, “ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOIS”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, หน้า 419-423, พฤศจิกายน 2536.
- [5] อนุชา เรืองพานิช, ผศ. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง และ รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช, “ผลของอะตอมทองคำต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโคโอด”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14, หน้า 2-128 - 2-131, พฤศจิกายน 2534.
- [6] มนชนก ศรีเสื่อขาม, “การพัฒนาทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS เป็นวงจรรพื้นฐานของ GATE ARRAY”, วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536.
- [7] S. Middelhoek and S.A. Audet, “Silicon sensors”. London: Academic Press, 1989.
- [8] S.M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- [9] Helmut F. Wolf., “Silicon semiconductor data”, Peramon Press 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] C.S Smith, “Piezoresistance effect in germanium and silicon, Phys. Rev.”, Vol.94,

- PP42-49, 1954.
- [12] อัมพร โพธิ์ไย "ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET"วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538
- [13] ภควัต สรวยสุวรรณ, อัมพร โพธิ์ไย,จิรววัฒน์ ปานกลาง, ผศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง "เสถียรภาพทางสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ความดันแบบ MOISFET" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หน้า 673-677 พ.ศ. 2538
- [14] Thomas L. Floyd, "Electronics Devices" ,Prentice-Hall,Engle wood, New Jersey.Columbus , Ohio.
- [15] Robert T. Paynter,Macet, "Introductory Electronic Devices and Circuits", Prentice-Hall International.,Inc
- [16] John P. Uyemura, "Fundamental of MOS Digital Integrated Circuits", Addison-Wesley Publishing Co.,Ltd. 1988.
- [17] ธีัญญะ ศักดิ์โสภณัฐ, สมศักดิ์ เขียวศิริกุล และสมเกียรติ สุขเกษ, "การพัฒนาทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซิสทีปเพื่อประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 12, หน้า 573-581, พฤศจิกายน 2532.
- [18] ภควัต สรวยสุวรรณ, ภาณุพันธ์ โอพารกิจไพบูลย์, พิระวุฒิ ชินวรงค์สี, วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, "การประยุกต์การใช้งานทรานสดิวเซอร์ความดันแบบ MOISFET ในวงจรรวมอินเวอร์เตอร์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19, หน้า EL50-EL55, พฤศจิกายน 2539.
- [19] ผศ. สมเกียรติ สุขเกษ, "ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ", สำนักพิมพ์วารสารอิเล็กทรอนิกส์เวิลด์, 2525.

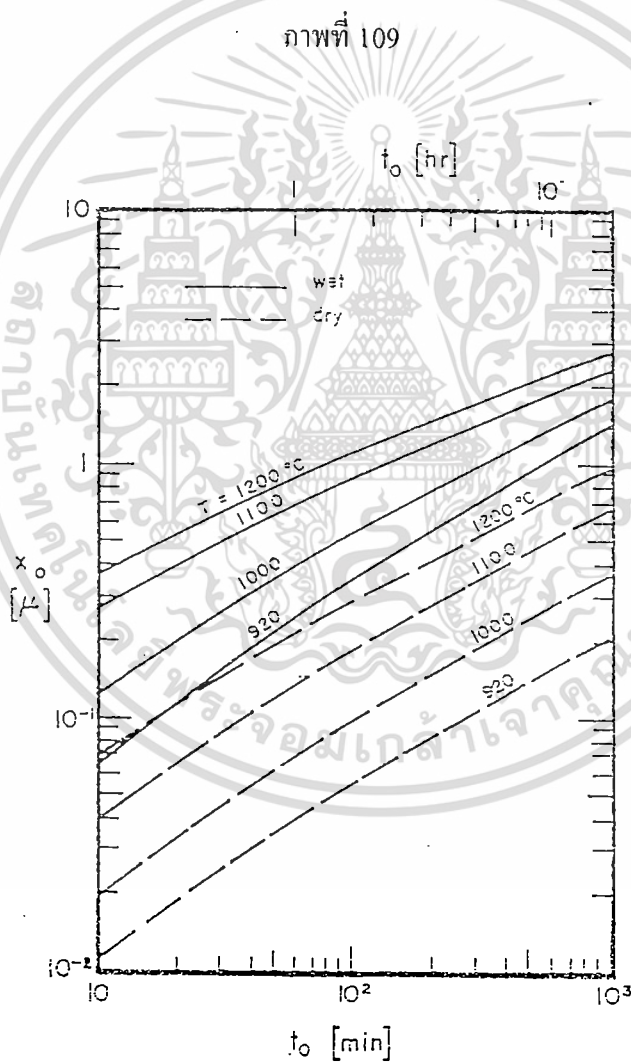


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การสร้างชั้นซิงก์ออกไซด์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการสร้างชั้นซิงก์ออกไซด์ด้วยความร้อน ซึ่งกราฟที่จะแสดงต่อไปนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของความหนาออกไซด์ (X_o) กับเวลาในการทำออกซิเดชัน (t_o) และอุณหภูมิในการทำออกซิเดชัน (T) ดังภาพที่ 109



แสดงความหนาออกไซด์ (X_o) กับเวลา (t_o) และอุณหภูมิ (T) ในการทำออกซิเดชัน⁸¹
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

กระบวนการแพร่สารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส

ในทางปฏิบัติกระบวนการแพร่สารเจือ แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนดังนี้

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

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

โดยที่

$C(x)$ คือความหนาแน่นสารเจือที่ตำแหน่ง x ซึ่งห่างจากผิวหน้าลงในแผ่นผลึก

Q คือปริมาณของสารเจือที่ถูกเติมลงไปนผลึกสารกึ่งตัวนำขณะทำการ Predeposition ซึ่ง หาได้ดังนี้

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

C_s คือค่า solid solubility ของสารเจือในซิลิกอนที่อุณหภูมิขณะ Predeposition (คือความเข้มข้นของสารเจือสูงสุด C_{smax}) ซึ่งหาได้จากภาพที่ 116

D_1 คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือในซิลิกอนที่อุณหภูมิขณะ Predeposition ค่านี้หาได้จากกราฟภาพที่ 117

t_1 คือช่วงเวลาที่ใช้ในการ Predeposition

D_2 คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือที่อุณหภูมิขณะทำการ drive-in

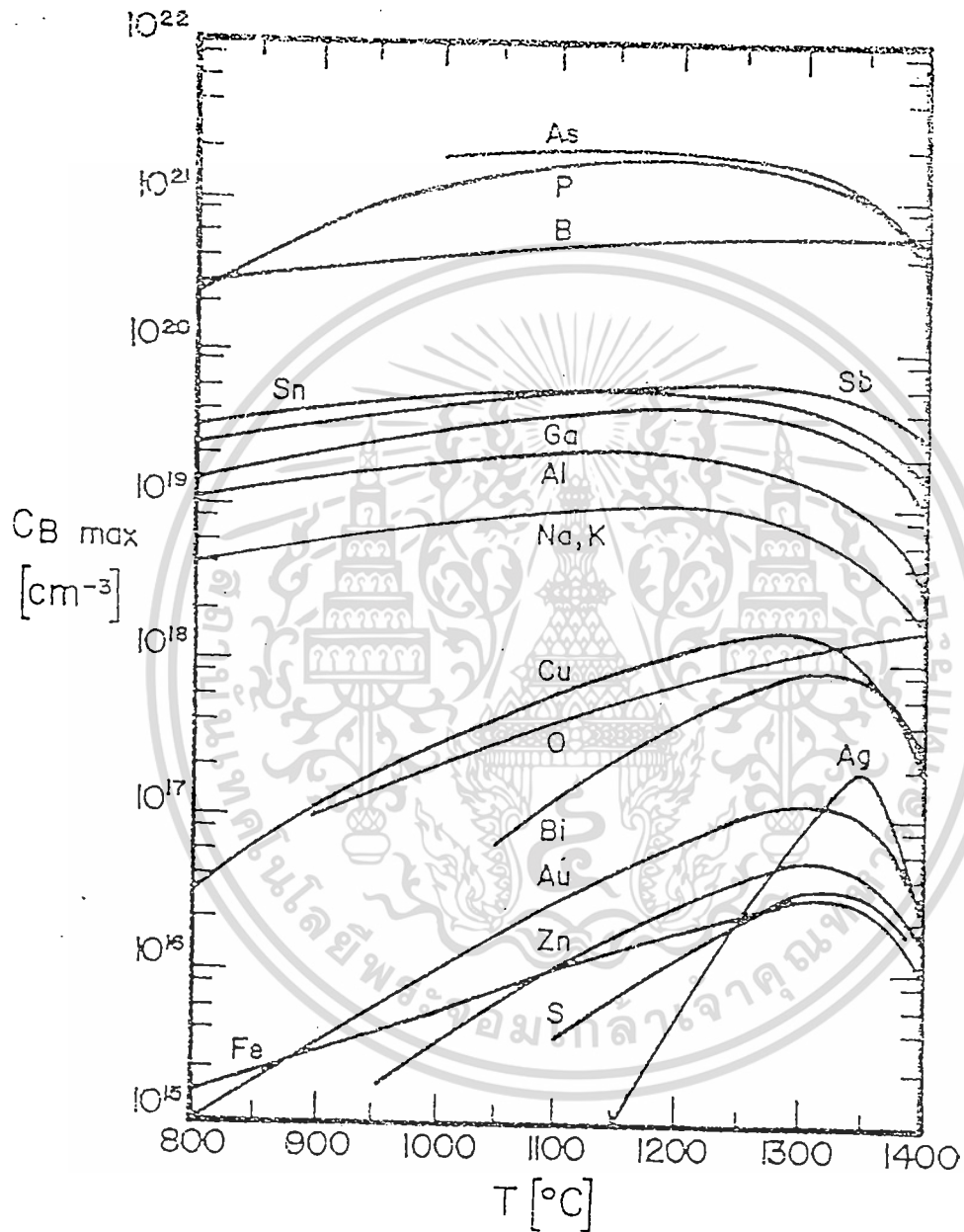
t_2 คือช่วงเวลาที่ใช้ในการ drive-in

e คือค่าเอกโปรเนนเชียล มีค่า 2.71828

x คือตำแหน่งใดๆ ซึ่งลึกลงไปนแผ่นผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

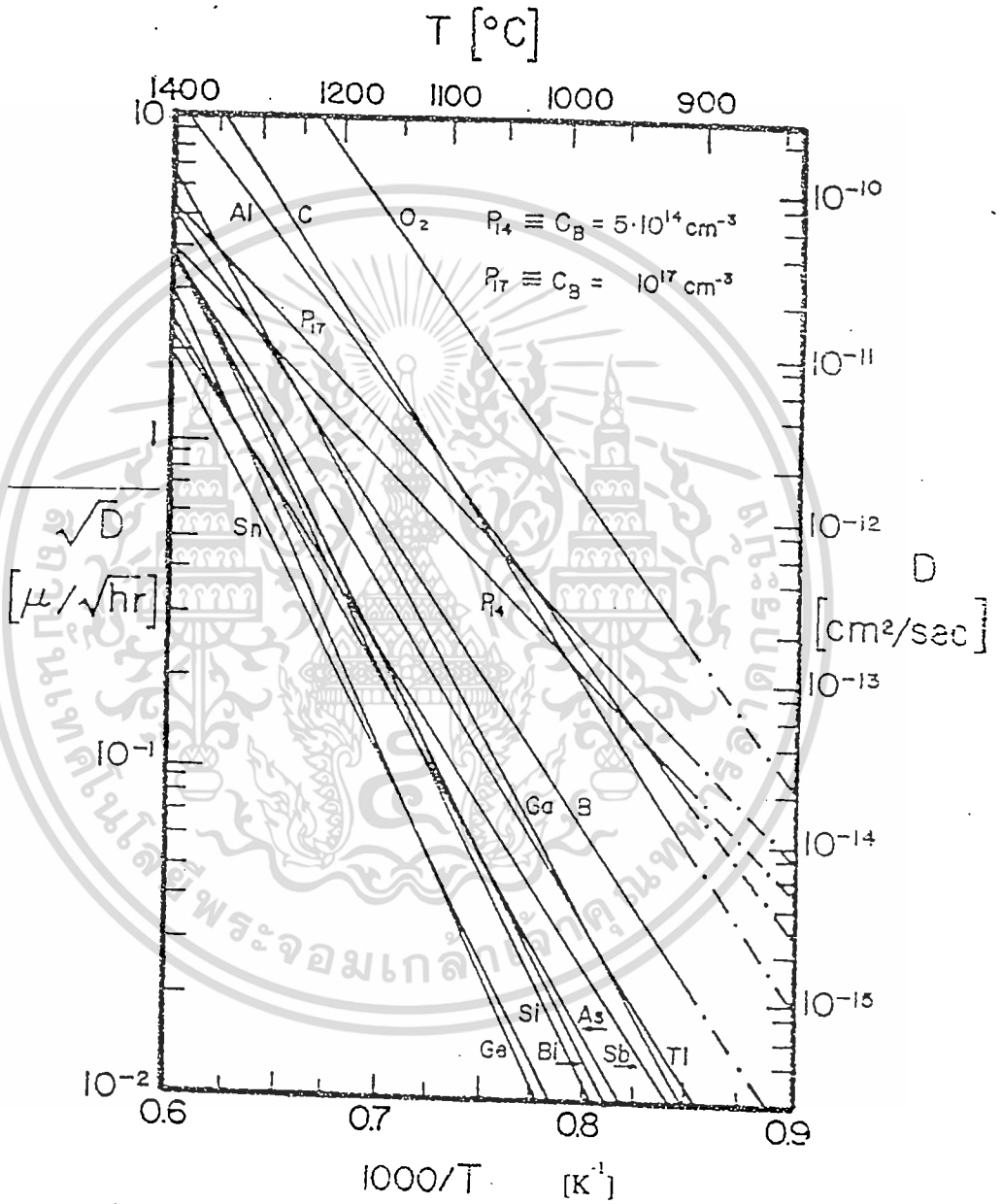
ภาพที่ 110



แสดงค่า solid solubility ของสารเจือไนซิลิกอน (ความเข้มข้นสารเจือสูงสุด, $C_{B \max}$ ที่อุณหภูมิ T ใดๆ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 111



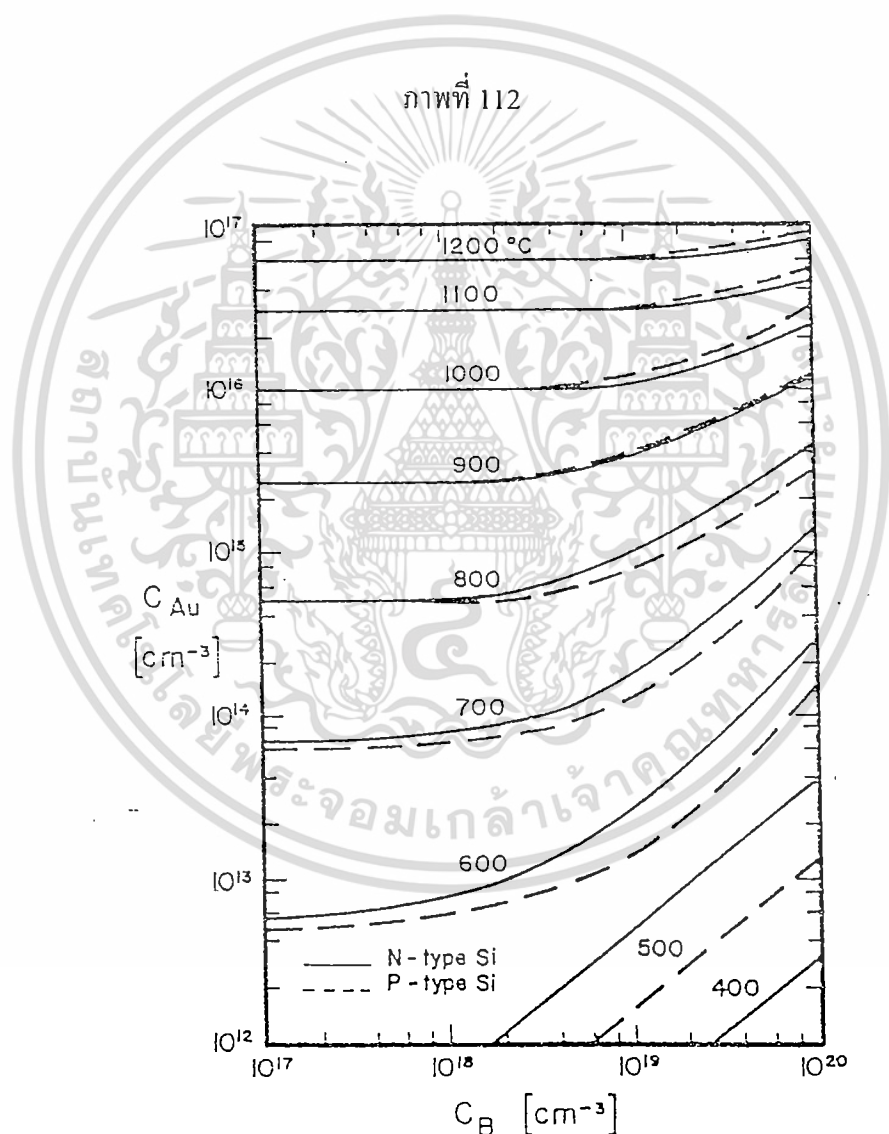
แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กระบวนการแพร่สารเจือทองคำ

ในกระบวนการแพร่ทองคำ ถ้าทำการเคลื่อนทองคำที่ด้านหลังให้มากเกินพอแล้ว ความเข้มข้นของทองคำในแผ่นผลึกซิลิกอน (C_{Au}) จะขึ้นกับชนิดของซิลิกอน ความเข้มข้นสารเจือที่มีอยู่เดิม (Background Impurity Concentration (C_B)) และอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ทองคำ (T) ดังแสดงในภาพที่ 112



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองคำในสภาวะอิมิตัว (C_{Au}) กับความเข้มข้นของสารเจือ Background (C_B) และ อุณหภูมิในการแพร่ทองคำ (T)¹⁸¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

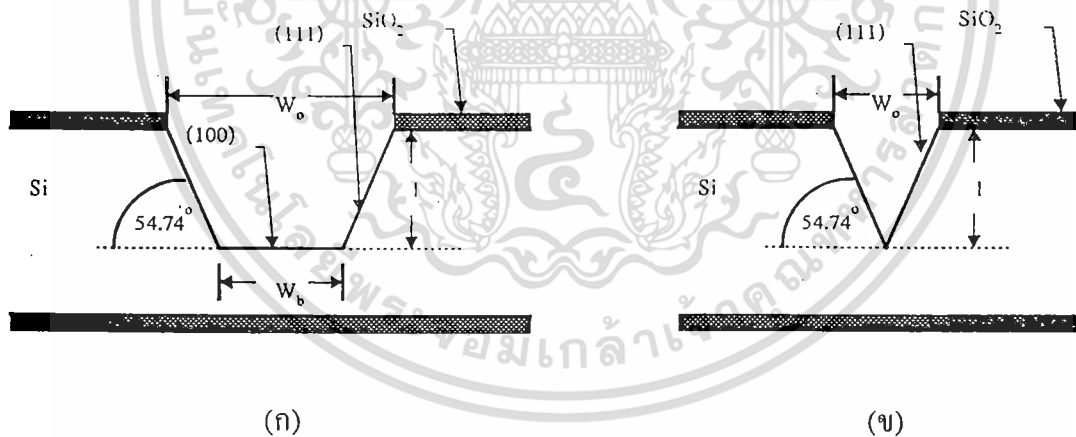
ภาคผนวก ง

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 โดยมีอัตราการกัดในผลึกซิลิกอนระนาบต่างๆ เรียงลำดับดังนี้ $(100) > (110) > (111)$ และจะใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวนป้องกันการกัดของสารละลาย เพราะว่าอัตราการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ช้ามาก

เนื่องจากสารละลายตัวนี้มีคุณสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ดังนั้นเมื่อเปิดช่องการกัดเป็นภาพสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะได้ลักษณะการกัด เป็นดังภาพที่ 113

ภาพที่ 113



แสดงภาพตัดขวางของหลุมที่ถูกกัด (ก) หลุมภาพตัดขวาง (ข) หลุมภาพตัดวง ซึ่งความกว้างของพื้นหลุมจะหาได้จากสมการ

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

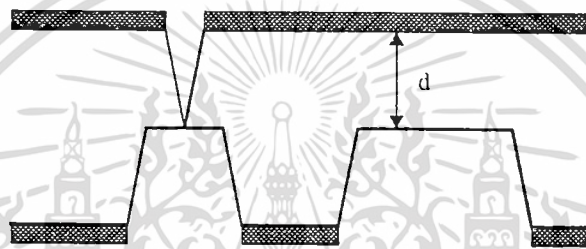
$$\approx W_0 - \sqrt{2}l$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ จ-1 จะเห็นว่าถ้า $W_o \leq 2l \cot 54.74^\circ$ แล้วจะทำให้การกัดเป็นภาพตัววี ดังแสดงในภาพที่ 113 (ข) ถ้า $W_o > 2l \cot 54.74^\circ$ แล้วจะทำให้การกัดเป็นภาพตัวยูดังแสดงในภาพที่ 113 (ก)

จากลักษณะการกัดแบบนี้จึงทำให้ใช้เทคนิคการควบคุมความหนาด้วยร่องตัววี และใช้แสงช่วย ลักษณะของเทคนิคนี้แสดงได้ดังภาพที่ 114

ภาพที่ 114

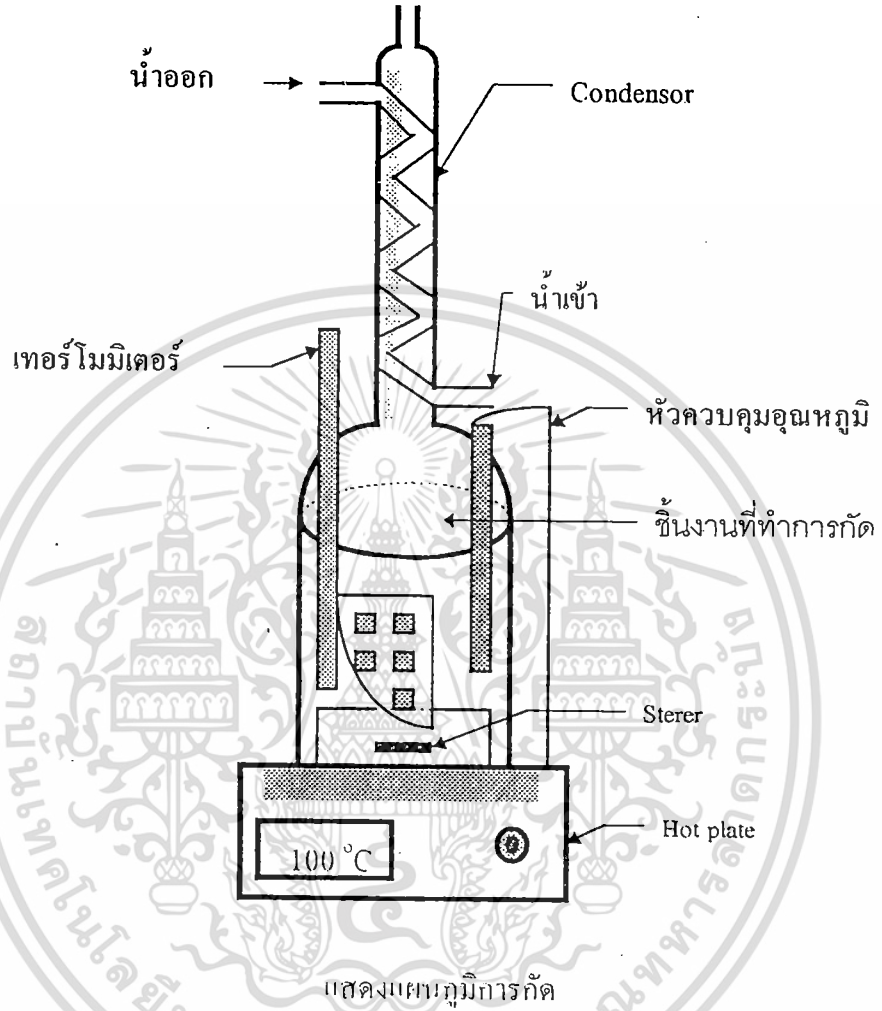


แสดงเทคนิคการควบคุมความหนาด้วยร่องตัววี

จากภาพที่ 114 จะเห็นว่าถ้าต้องการให้ไดอะแฟรมหนา d ก็ทำการออกแบบ W_o ให้มีลักษณะการกัดเป็นหลุมตัววีที่ลึก d เมื่อกัดมาถึงความลึก d การกัดก็จะหยุดกัด แต่ทางด้านหลุมภาพตัวยูจะกัดไปเรื่อยๆ จนชนกับหลุมตัววี แสงก็สามารถทะลุผ่านได้ ก็จะได้ความหนาไดอะแฟรม d ตามต้องการ

แผนภูมิการกัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงดังภาพที่ 115

ภาพที่ 115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้