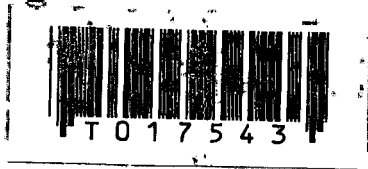


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษา ออกแบบ สร้าง และพัฒนามอสเฟตกำลัง

STUDY ON DESIGN FABRICATION
AND DEVELOPMENT OF
POWER MOSFET



สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

SURASAK NIEMCHAROEN

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สมเกียรติ ศุกเดช

ADVISOR

ASSOC.PROF.DR. SOMKIAT SUPADECH

เลขหมู่

เลขทะเบียน 17543

วัน, เดือน, ปี 10 ก.ค. 2535

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2535

ISBN 974-8157-56-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญตาราง	IV
สารบัญภาพ	V
สัญลักษณ์	XI
ศัพท์เทคนิค	XIV
คำนำ	XVII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 ประเภทของมอสเฟตกำลัง	2
1.3 การเปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลัง โมโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และไทรสเตอร์	5
1.4 แนวโน้มของมอสเฟตกำลังในตลาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	6
บทที่ 2 ทฤษฎีมอสเฟตกำลัง	7
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของมอสเฟตกำลัง	7
2.2 แรงดันขีดเริ่ม	9
2.2.1 แรงดันขีดเริ่มกับมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดใหญ่	10
2.2.2 แรงดันขีดเริ่มกับมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดเล็ก	12
2.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสของมอสเฟต	13
2.3.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสในช่วงเชิงเส้น	13
2.3.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสในช่วงอิ่มตัว	15
2.3.3 การวิเคราะห์กระแสเดรนแบบง่าย ๆ	15
2.4 อินครีเมนตัลพารามิเตอร์	16
2.4.1 คอนดัคแตนซ์	16
2.4.2 ทรานคอนดัคแตนซ์	16
2.4.3 ความต้านทานในภาวะนำกระแส	17

	หน้า
2.5 แรงดันพียงทลาย	17
2.5.1 แรงดันพียงทลายแบบอะวาลานซ์	18
2.5.2 รอยต่อลาดแบบเชิงเส้น	20
2.6 การตอบสนองความถี่	21
บทที่ 3 การออกแบบมอสเฟตกำลัง	24
3.1 การเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น	24
3.2 การออกแบบโครงสร้างในแนวตั้ง	25
3.2.1 การแพร่สารเจือ	25
3.2.1.1 Predeposition	26
3.2.1.2 การขับเคลื่อน	26
3.2.2 การแพร่สารเจือส่วน P-base	27
3.2.3 การแพร่สารเจือส่วน N ⁺ -source	28
3.3 การออกแบบแรงดันขีดเริ่ม	30
3.4 การออกแบบแรงดันพียงทลาย	32
3.4.1 ฟิวส์ริงค์	33
3.4.2 ฟิวส์เฟลต	34
3.5 การออกแบบการตอบสนองความถี่	35
3.6 พารามิเตอร์แฝงในโครงสร้างมอสเฟตกำลัง	35
3.6.1 โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	36
3.6.2 โครงสร้างแฝงของเจเฟต	36
3.7 การออกแบบและสร้างกระแยกต้นแบบ	37
บทที่ 4 กระบวนการสร้างและการเก็บบรรจุมอสเฟตกำลัง	41
4.1 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบ	42
4.1.1 กระบวนการอิมิทาซี	43
4.1.2 กระบวนการออกซิเดชัน	43
4.1.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	44
4.1.4 กระบวนการแพร่สารเจือ	45
4.1.5 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ	45

4.2	กระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	46
4.2.1	การตัดแยกชิพ	47
4.2.2	การติดชิพบนตัวถัง	47
4.2.3	การต่อสาย	48
4.2.4	การพินไฟฟ้า	48
4.2.5	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย	48
4.3	กระบวนการสร้างมาตรฐานและกระบวนการเก็บบรรจุของมอสเฟตกำลัง	48
4.3.1	กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอส	49
4.3.2	กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส	51
4.3.3	กระบวนการสร้าง ไดโอด	53
4.3.4	กระบวนการเก็บบรรจุมอสเฟตกำลังและ ไดโอด	55
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง	61
5.1	การทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตพื้นฐานของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส	61
5.1.1	การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นของดีมอส	61
5.1.2	การทดสอบการทำงานของดีมอสในลักษณะทรานซิสเตอร์	64
5.2	การศึกษาความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส	67
5.3	การเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนให้เหมาะสมกับดีมอส	72
5.4	การศึกษาการควบคุมและการเปลี่ยนแปลงแรงดันขั้วเริ่มของดีมอส	74
5.4.1	การควบคุมแรงดันขั้วเริ่มของดีมอส โดยวิธีการควบคุมความหนาแน่นอะตอมสารเจือ	74
5.4.2	การเปลี่ยนแปลงแรงดันขั้วเริ่มของดีมอส	76
5.5	การศึกษาแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ของดีมอสจากโครงสร้างไดโอด	78
5.5.1	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือกับแรงดันพังทลาย	78
5.5.2	การปรับปรุงแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ให้มีค่าสูงขึ้น	81
5.5.2.1	การเปลี่ยนแปลงลักษณะลวดลายของไดโอด	83
5.5.2.2	การสร้างพิวส์ริงค์	84
5.5.2.3	การสร้างพิวส์เพลต	85

	หน้า
5.6 การศึกษาการตอบสนองความถี่ของดีมอส	87
5.7 การศึกษาพารามิเตอร์แฝงที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส	92
5.7.1 โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	92
5.7.2 โครงสร้างแฝงของเจเฟต	93
5.8 การทดสอบโครงสร้างพื้นฐานทางเรขาคณิตและการทำงานของมอสเฟตกำลังแบบวีมอส	96
5.9 การทดสอบมอสเฟตกำลังแบบดีมอสโครงสร้างขนาดใหญ่	101
บทที่ 6 สรุปและบทวิจารณ์	104
กิตติกรรมประกาศ	108
เอกสารอ้างอิง	109
ภาคผนวก ก	
1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์	111
2. คุณสมบัติของซิลิกอน ไดออกไซด์	111
3. คุณสมบัติของซิลิกอน	112
ภาคผนวก ข	
รายละเอียดกระบวนการสร้างมอสเฟตกำลัง	113
ภาคผนวก ค	
1. การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ	122
2. การหาความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้วยวิธีการ grooving	122
ประวัติผู้เขียน	124

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษา ออกแบบ สร้าง และพัฒนาโมสเฟตกำลัง
 นักศึกษา นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช
 ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 พ.ศ. 2535

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอสเฟตได้รับความนิยมอย่างมาก ในการสร้างเป็นวงจรรวม เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้มอสเฟตสร้างได้ง่ายและมีความเชื่อถือสูง ซึ่งรวมถึงการสร้างมอสเฟตกำลังด้วย นอกจากนี้มอสเฟตกำลังยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าอุปกรณ์กำลังประเภทอื่น ๆ หลายประการ ดังเช่น การทนกำลังสูง การตอบสนองความถี่สูง การสูญเสียกำลังทางด้านอินพุตต่ำและมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเชิงลบ เป็นต้น จึงทำให้มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้นำเสนอแนวทางการออกแบบ กระบวนการสร้างมาตรฐาน กระบวนการเก็บบรรจุ และผลการทดลองของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสและวีมอส ชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ในลักษณะของอุปกรณ์ตัวเดียว ๆ ซึ่งในการสร้างได้ใช้เทคนิคการแพร่สารเจือ 2 ครั้ง ลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน แบบอีพิแทกเซียล ชนิด N/N^+ มอสเฟตกำลังที่ได้จะมีโครงสร้างผสมกันระหว่างมอสเฟตกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ทำให้ได้ความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ เป็นผลให้มอสเฟตกำลังที่สร้างขึ้นสามารถนำกระแสไฟฟ้าสูงและมีการตอบสนองความถี่สูง โดยเริ่มต้นทำการศึกษาจากโครงสร้างของดีมอส ดังนี้ คือ ศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสเดรน การควบคุมแรงดันขีดเริ่ม ปรากฏการณ์การเกิดแรงดันพังทลาย การตอบสนองความถี่ รวมถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของดีมอส จากผลการทดลองสร้างดีมอสที่มีความยาวของช่องทางเดินกระแส $10 \mu\text{m}$ และความกว้างของช่องทางเดินกระแส $36,620 \mu\text{m}$ โดยมีแรงดันขีดเริ่ม 2.8 V นำกระแสไฟฟ้าได้ 2.1 A แรงดันพังทลาย 160 V และตอบสนองความถี่สูงสุด 51.92 MHz นอกจากนี้ยังได้ออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลัง ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบวีมอส โดยมีความยาวของช่องทางเดินกระแสเพียง $2.9 \mu\text{m}$ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดนี้ที่ซึ่งเท่ากัน มอสเฟตกำลังแบบวีมอสจะนำกระแสไฟฟ้าได้ดีและสูงกว่ามอสเฟตกำลังแบบดีมอสถึง 2.75 เท่า

THESIS TITLE STUDY ON DESIGN FABRICATION AND DEVELOPMENT
 OF POWER MOSFET
 STUDENT SURASAK NIEMCHAROEN
 THESIS ADVISOR ASSOC. PROF. DR. SOMKIAT SUPADECH
 LEVEL OF STUDY MASTER 'S IN ELECTRICAL ENGINEERING
 YEAR 1992

ABSTRACT

Today, MOSFET is the most popular device for very large scale integration. Combining with the advance of MOS Technology. The various types of MOS device can be produced with high performance and reliability. There are many advantages of power MOSFET comparing with another power devices, such as : high power capability, high frequency response, low input power dissipation and a negative temperature coefficient etc. For this reason, it has been widely used in electronics system and electronics equipments.

In this thesis, the design, the fabrication process, the packaging assembly and the experimental results of discrete n-channel enhancement mode DMOS and VMOS power FET will be reported. Double diffusion technique is used for the formation of a channel and a source of a device on N/N⁺ type silicon epitaxial initial wafer. A structure of DMOS is a mixture of MOSFET and bipolar transistor. With this structure, a very short channel length can be obtained and results in high current conduction and also high frequency response. The work begins with a study of many parameters which affect drain current, threshold voltage, avalanche breakdown voltage, frequency response and etc. From the experimental results, the DMOS with a channel length of 10 μm and a channel width of 36,620 μm has the average threshold voltage of 2.8 V, the maximum current of 2.1 A, the breakdown voltage of 160 V and the maximum frequency response of 51.92 MHz. Moreover, power MOSFET has been

designed and fabricated is the VMOS structure. The channel length is 2.9 μm . The result of experiment showed that in the same area, current of VMOS power FET will be higher than DMOS power FET 2.75 times.



สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	เปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลัง ไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ กำลังและ ไทริสเตอร์	5
ตารางที่ 4.1	กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอสบนแผ่นผลึกซิลิกอน	49
ตารางที่ 4.2	กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอสบนแผ่นผลึกซิลิกอน	51
ตารางที่ 4.3	กระบวนการสร้างไดโอดบนแผ่นผลึกซิลิกอน	54
ตารางที่ 4.4	การเก็บบรรจุมอสเฟตกำลังและไดโอดลงบนตัวถัง TO-5 และ TO-3	56
ตารางที่ 5.1	แสดงการแพร่สารเจือ โบรมีนในส่วน P-base 4 ชุด	74
ตารางที่ 5.2	แสดงแรงดันพ่วงทลายและเปอร์เซ็นต์ของแรงดันพ่วงทลายเปรียบ เทียบกับทฤษฎีของไดโอด เมื่อมีลักษณะลวดลายแบบต่าง ๆ	83
ตารางที่ 5.3	แสดงผลของความจุไฟฟ้ากับความยาวของช่องทางเดินกระแส ของดีมอสค่าต่าง ๆ	90
ตารางที่ 5.4	แสดงผลของความจุไฟฟ้ากับความกว้างของช่องทางเดินกระแส ของดีมอสค่าต่าง ๆ	90
ตารางที่ 5.5	แสดงพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการสร้างวีมอส	99
ตารางที่ 5.6	แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอสโครงสร้างขนาดใหญ่	102

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การแบ่งชนิดของมอสเฟตกำลังตามลักษณะของการทำงาน	4
รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้าง กราฟคุณสมบัติกระแสแรงดันและสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสและแบบวีมอส	4
รูปที่ 1.3 การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง	6
รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แซนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (ก) โครงสร้างของดีมอส (ข) โครงสร้างของวีมอส	8
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบโครงสร้างและการทำงานของ (ก) มอสเฟตกำลังแบบดีมอส 1 ยูนิตเซลล์ (ข) มอสเฟต	9
รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างของมอสคาปาซิเตอร์ (ข) โครงสร้างของแถบพลังงานที่เฟลตแบนด์ (ค) การกระจายของประจุไฟฟ้าและ โครงสร้างของแถบพลังงานที่สตรองอินเวอร์ชัน	10
รูปที่ 2.4 มอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดสั้น ๆ และผลกระทบที่เกิดเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะ	12
รูปที่ 2.5 การทำงานในช่วงต่าง ๆ ของกราฟคุณสมบัติกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอสส์สำหรับมอสเฟตชนิดเอ็น-แซนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	13
รูปที่ 2.6 บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ $N^+ - P$ เมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ	19
รูปที่ 2.7 การกระจายของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น	21
รูปที่ 2.8 (ก) แบบจำลองความจุไฟฟ้าในโครงสร้างดีมอส (ข) วงจรสมมูลของดีมอสที่นำมาใช้ในการพิจารณาความถี่คัท-ออฟ	22
รูปที่ 3.1 (ก) โครงสร้างในแนวตั้ง $N^+ - P - N^+$ ของดีมอส (ข) การกระจายของสารเจือส่วนต่าง ๆ ของดีมอส	25
รูปที่ 3.2 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ได้จาก predeposition และการขับเคลื่อน	27
รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Solid solubility ของสารเจือต่าง ๆ ในซิลิกอนกับอุณหภูมิ	28
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิ	29

รูปที่ 3.5	กราฟเออร์มอลไลซ์เพื่อหาการกระจายของสารเจือทั้งแบบ erfc และ Gaussian	29
รูปที่ 3.6	แรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตกำลังในอุดมคติ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความหนาของเกตออกไซด์และความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base	31
รูปที่ 3.7	แรงดันขีดเริ่มเป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base สำหรับเกตออกไซด์หนา 1000 \AA และผลกระทบของประจุไฟฟ้าที่ผิว SiO_2 กับ Si ด้วย	31
รูปที่ 3.8	(ก) โครงสร้างของดีมอสจะเกิดแรงดันพังทลายที่รอยต่อ P-base กับ N-drift (ข) โครงสร้างของไดโอดจะเกิดแรงดันพังทลายที่รอยต่อพี-เอ็น	32
รูปที่ 3.9	พิวส์ริงค์ที่สร้างขึ้นล้อมรอบรอยต่อพี-เอ็นหลัก	32
รูปที่ 3.10	การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของรอยต่อในแนวระนาบ เมื่อ (ก) ไม่มีพิวส์ริงค์ (ข) มีพิวส์ริงค์	33
รูปที่ 3.11	(ก) รอยต่อในแนวระนาบกับผลกระทบเนื่องจากพิวส์เพลต (ข) พิวส์เพลตที่สร้างขึ้น โดยการขยายส่วนโลหะของรอยต่อหลักเหนือส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ที่ขอบของรอยต่อ	34
รูปที่ 3.12	โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในโครงสร้างของดีมอส	36
รูปที่ 3.13	(ก) ภาพตัดขวางของโครงสร้างของดีมอส ซึ่งทำให้เกิดการพิชเชอขึ้นเนื่องจากโครงสร้างแฝงของเจเฟต (ข) วงจรสมมูลของโครงสร้างแฝงของเจเฟตในดีมอส	37
รูปที่ 3.14	ดีมอสที่ได้ทำการออกแบบลวดลายในระดับหน้ากาก (สีดำ)	38
รูปที่ 3.15	การออกแบบลวดลายต้นแบบบนกระดาษกราฟ	39
รูปที่ 3.16	การตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่นโพลีเอสเตอร์ด้วยเครื่องไมโครคัทเตอร์	39
รูปที่ 3.17	แผ่นโพลีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดเสร็จแล้วและชุดกระจกต้นแบบที่ถ่ายย่อลง 50 เท่าจากแผ่นต้นแบบ	40
รูปที่ 3.18	กระจกต้นแบบลวดลายอะลูมิเนียมของมอสเฟตกำลังที่ได้สร้างขึ้น 5 ชุด	40
รูปที่ 4.1	โพลีชาร์ทแสดงกระบวนการสร้างทั้งหมดของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสและวีมอส	41
รูปที่ 4.2	ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสร้างในแนวระนาบ: (ก) ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (ข) อิมิทาซี (ค) ออกซิเดชัน (ง) โฟโตลิโทกราฟี (จ) การแพร่สารเจือ และ (ฉ) การสร้างลวดลายโลหะ	42
รูปที่ 4.3	โพลีชาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	44
รูปที่ 4.4	โพลีชาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	46

รูปที่ 4.5	ตัวถังกระป๋อง โลหะที่ใช้เก็บบรรจุชิพของมอสเฟตกำลัง	
	(ก) ตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 (ข) ตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3	47
รูปที่ 4.6	ภาพตัดขวางและภาพด้านบนแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอส	57
รูปที่ 4.7	ภาพตัดขวางและภาพด้านบนแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส	58
รูปที่ 4.8	ภาพตัดขวางและภาพด้านบนแสดงลำดับขั้นตอนการสร้าง ไดโอด	59
รูปที่ 4.9	มอสเฟตกำลังแบบดีมอส แบบวีมอสและ ไดโอดที่สร้างเสร็จแล้วบนแผ่นผลึกซิลิกอน	60
รูปที่ 4.10	ชิพที่ตัดแยกแล้วและการเก็บบรรจุลงบนตัวถังแบบกระป๋อง TO-5 และ TO-3	60
รูปที่ 5.1	(ก) ลวดลายต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบและภาพตัดขวางของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส	
	(ข) ภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่ได้สร้างเสร็จแล้ว ซึ่งมีขนาดของ $L = 20 \mu\text{m}$ และ $W = 400 \mu\text{m}$	62
รูปที่ 5.2	กราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N^+ -source กับ P-base	63
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง P-base กับ N-drift	63
รูปที่ 5.4	(ก) ลวดลายต้นแบบของดีมอสที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อวัดการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์	
	(ข) ภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่ได้สร้างเสร็จแล้ว ซึ่งมีขนาดของ $L = 10 \mu\text{m}$ และ $W = 400 \mu\text{m}$	65
รูปที่ 5.5	(ก) กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอร์ส	
	(ข) แสดงแรงดันขีดเริ่ม	
	(ค) แสดงกระแสรั่วไหล วัดที่ $V_{GS} = 0 \text{ V}$, $V_{DS} = 35 \text{ V}$	
	(ง) แสดงแรงดันนัทหลาย วัดที่ $V_{GS} = 0 \text{ V}$	66
รูปที่ 5.6	ตัวอย่างภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่ได้สร้างขึ้น	68
รูปที่ 5.7	(ก) วงจรวัดความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} จากเครื่องเขียนกราฟ	
	(ข) ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ของดีมอส	
	ขนาด $L = 10 \mu\text{m}$ และ $W = 2,880 \mu\text{m}$	68
รูปที่ 5.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $G_{m_{sat}}$ กับ L จากการทดลองเปรียบกับการคำนวณของดีมอสที่มีขนาด $W = 200 \mu\text{m}$ เมื่อวัดที่ $V_{DS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 10 \text{ V}$	69
รูปที่ 5.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{on} กับ L จากการทดลองเปรียบกับการคำนวณของดีมอสที่มีขนาด $W = 200 \mu\text{m}$ เมื่อวัดที่ $V_{DS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 10 \text{ V}$	69

รูปที่ 5.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{msat} กับ W จากการทดลองเปรียบกับการคำนวณของดีมอสที่มีขนาด $L = 10 \mu m$ เมื่อวัดที่ $V_{DS} = 15 V$ และ $V_{GS} = 10 V$	70
รูปที่ 5.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{on} กับ W จากการทดลองเปรียบกับการคำนวณของดีมอสที่มีขนาด $L = 10 \mu m$ เมื่อวัดที่ $V_{DS} = 15 V$ และ $V_{GS} = 10 V$	70
รูปที่ 5.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนกับแรงดัน $V_{GS} - V_T$ ของดีมอสที่สร้างบนผลึกระนาบ (100) กับระนาบ (111)	73
รูปที่ 5.13	(ก) วงจรวัดความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม (ข) ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ที่ได้จาก (ก)	75
รูปที่ 5.14	แรงดันขีดเริ่มที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณจากทฤษฎี	75
รูปที่ 5.15	แรงดันขีดเริ่มที่ขึ้นกับผลของความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ ที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base ค่าต่าง ๆ	77
รูปที่ 5.16	ภาพถ่ายด้านบนของไดโอดที่สร้างเสร็จแล้ว ที่มีขนาด $1000 \times 1000 \mu m^2$	79
รูปที่ 5.17	กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมในส่วนฐานรอง $8.70 \times 10^{14} cm^{-3}$ ซึ่งจะได้แรงดันพังทลาย 130 V	79
รูปที่ 5.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์กับสัมประสิทธิ์ของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น	80
รูปที่ 5.19	เป็นภาพถ่ายด้านบนของไดโอดที่ออกแบบเป็นลวดลายแบบต่าง ๆ (ก) สี่เหลี่ยม (ข) สี่เหลี่ยมมนขอบ (ค) หกเหลี่ยม (ค) วงกลม	82
รูปที่ 5.20	(ก) ลวดลายต้นแบบของโครงสร้างด้านบนและภาพตัดขวางของไดโอดที่สร้างนิวส์ริงค์ล้อมรอบ (ข) ภาพถ่ายด้านบนของไดโอดที่มีนิวส์ริงค์ที่สร้างเสร็จแล้ว	82
รูปที่ 5.21	(ก) ลวดลายต้นแบบของโครงสร้างด้านบนและภาพตัดขวางของไดโอดพร้อมด้วยส่วนนิวส์เพลต (ข) ภาพถ่ายด้านบนของไดโอดพร้อมส่วนนิวส์เพลตที่สร้างเสร็จแล้ว	83
รูปที่ 5.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายกับระยะห่างของนิวส์ริงค์กับขอบไดโอดที่แท้จริง ($W_{FR} - 2x_j$) ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนฐานรอง $8.70 \times 10^{14} cm^{-3}$	84

สัญลักษณ์ (List of Symbol)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	สัมประสิทธิ์เชิงลาดของสารเจือ ในรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น	cm^{-4}
a	ระยะห่างระหว่างเซลล์	μm
a _o	ระยะห่างระหว่างเซลล์ที่น้อยที่สุด	μm
C _{DS}	ความจุไฟฟ้าเดรน-ซอส	pF
C _{GD}	ความจุไฟฟ้าเกต-เดรน	pF
C _{GS}	ความจุไฟฟ้าเกต-ซอส	pF
C _{IN} , C _{iss}	ความจุไฟฟ้าด้านอินพุต	pF
C _{oss}	ความจุไฟฟ้าด้านเอาต์พุต	pF
C _{rss}	ความจุไฟฟ้ารีเวอร์สทรานส์เฟอร์ส	pF
C _{ox}	ความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์	pF
D	สัมประสิทธิ์การแพร่	cm^2/s
E	สนามไฟฟ้า	V/cm
E _c	พลังงานแถบความนำ	eV
E _F	พลังงานระดับเฟอร์มิ	eV
E _G	พลังงานแถบต้องห้าม	eV
E _i	พลังงานระดับอินทรีนซิก	eV
E _v	พลังงานแถบวาเลนซ์	eV
f _T	ความถี่ตัด-ออฟ	MHZ
g _{ds}	คอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้น	mS
g _m	ทรานคอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้น	mS
g _{meat}	ทรานคอนดักแตนซ์ ในช่วงอิมิตัว	mS
i _{in}	กระแสไฟฟ้าด้านอินพุต	A
i _{out}	กระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุต	A
I _{DS}	กระแสเดรน	A
I _{DSS}	กระแสรั่ว ไหลเดรน-ซอส	μA
I _{DSSsat}	กระแสเดรน ในช่วงอิมิตัว	A
I _{GSS}	กระแสรั่ว ไหลเกต-ซอส	μA

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส	μm
L_{eff}	ความยาวของช่องทางเดินกระแสที่แท้จริง	μm
$M(x)$	จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลทั้งหมดที่มีค่าเข้าสู่อินด์	-
N_A	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ	cm^{-3}
n_i	ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	cm^{-3}
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	C
Q	จำนวนความหนาแน่นอะตอมทั้งหมดจาก predeposition	cm^{-2}
Q_B, Q'_B	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะที่ผิวขณะได้รับแรงดันถึงจุดที่ทำให้เกิดชั้นกลับพอดิ	C/cm^2
Q_G	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เกต	C/cm^2
Q_n	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าของชั้นกลับที่บริเวณช่องทางเดินกระแส	C/cm^2
Q_{ss}	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 กับ Si.	C/cm^2
R_{on}	ความต้านทานในภาวะนำกระแส	Ω
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์	K
t_{ox}	ความหนาแน่นของเกตออกไซด์	$^{\circ}\text{A}$
t	เวลา	s
V	ศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไบอัส	V
V_{BG}	แรงดันย้อนกลับที่ฐานรอง	V
V_{BV}	แรงดันบังทลาย	V
V_{DD}	แรงดันไบอัสภายนอก	V
V_{DS}	แรงดันเดรน-ซอส	V
V_{DSeat}	แรงดันเดรน-ซอส ในช่วงอิมิตัว	V
V_{FB}	แรงดันเฟลตแบนด์	V
V_{GS}	แรงดันเกต-ซอส	V
V_T	แรงดันขีดเริ่ม	V
W	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	μm
W_{FR}	ระยะห่างระหว่างนิวส์ริงค์กับขอบไดโอด	μm
W_{FP}	ระยะห่างของนิวส์เฟลตกับขอบไดโอด	μm

XIII

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
x	ระยะลึก ในแผ่นผลึกซิลิกอน	μm
x_d	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ	μm
x_{dmax}	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่กว้างที่สุด	μm
x_i	ความลึกของชั้นกลับ ในส่วนของช่องทางเดินกระแส	μm
x_j	ความลึกของรอยต่อ	μm
x_{jn}	ความลึกของรอยต่อส่วน N^+ -source	μm
x_{jp}	ความลึกของรอยต่อส่วน P-base	μm
x_{jpr}	ความลึกของรอยต่อส่วนพีของโครงสร้างไดโอด	μm
α	สัมประสิทธิ์ไอออนกระทบ	cm^{-1}
α_n	สัมประสิทธิ์ไอออนกระทบของอิเล็กตรอน	cm^{-1}
α_p	สัมประสิทธิ์ไอออนกระทบของโฮล	cm^{-1}
ϵ_0	ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ	F/cm
ϵ_{ox}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์	-
ϵ_s	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	-
θ	มุมระหว่างระนาบ (111) กับแนวระดับระนาบ (100) ของเวมอส	$^\circ$
ρ	นิกิตความต้านทาน	$\Omega\text{-cm}$
ρ_s	ความต้านทานแผ่น	Ω/\square
μ	ความคล่องตัวของพาหะ	$\text{cm}^2/\text{v-s}$
μ_n	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	$\text{cm}^2/\text{v-s}$
$\mu_{n(eff)}$	ความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอน	$\text{cm}^2/\text{v-s}$
μ_p	ความคล่องตัวของโฮล	$\text{cm}^2/\text{v-s}$
\mathcal{E}_F	ศักย์ไฟฟ้าเฟอร์มิ	V
\mathcal{E}_m	ฟังก์ชันงานของโลหะ	V
\mathcal{E}_{MS}	ฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับซิลิกอน	V
\mathcal{E}_s	ฟังก์ชันงานของซิลิกอน	V
ω_T	อัตราขยายเชิงมุม	s^{-1}

ศัพท์เทคนิค

กระจกต้นแบบ	photomask
กระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สาร- กึ่งตัวนำ	assembly process
กระบวนการไซโครลสกี	Czochraski
กระบวนการแพร่สารเจือ	diffusion process
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	photolithography process
กระบวนการสร้างไมแนวระนาบ	planar process
กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ	metalization process
กระบวนการออกซิเดชัน	oxidation process
กระบวนการอิพิทากซี	epitaxy process
กริดิสเตอร์	Gridistor
การกัดแอนไอโซทรอปิก	anisotropic etching
การตอบสนองความถี่	frequency response
การติดชิพ	die bonding
การตัดแยกชิพ	scribing
การต่อสาย	wire bonding
การผนึกฝา	encapsulate
การเกิดไอออนกระทบ	impact ionization
การออกแบบลวดลายระดับหน้ากาก	geometry layout design
แกลเลียมอะเซไนด์	gallium arsenide
ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	channel width
ความคล่องตัว	mobility
ความจุไฟฟ้าด้านอินพุต	common source input capacitance
ความจุไฟฟ้าด้านเอาต์พุต	common source output capacitance
ความจุไฟฟ้ารีเวอร์สทรานสเฟอร์ส	reverse transfer capacitance
ความถี่คัท-ออฟ	cut-off frequency
ความต้านทานในภาวนำกระแส	on state resistance
ความยาวของช่องทางเดินกระแส	channel length
คอนดักแตนซ์	conductance
ค่าสัมประสิทธิ์ไอออนกระทบ	impact ionization coefficient

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันการศึกษานี้ การใช้งานเพื่อประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างทางด้านข้าง	lateral structure
โครงสร้างในแนวตั้ง	vertical structure
เจเฟต	JFET หรือ Junction Field Effect Transistor
ซิท	SIT หรือ Static Induction Transistor
คิปลิชั่น โหมด	depletion mode
ดีมอส	DMOS หรือ Double Diffusion Power MOSFET
ทรานคอนดักแตนซ์	transconductance
ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน	IGT หรือ Insulated Gate Transistor
ไทรสเตอร์	thyristor
พารามิเตอร์แฝง	parasitic parameter
พินช์ออฟ	pinch off
พี-แชนเนล	P-channel
ฟังก์ชันงาน	work function
ฟิวส์เพลต	field plate
ฟิวส์ริงค์	field ring
ฟิวส์ออกไซด์	field oxide
แฟลตแบนด์	flat band
มอสคาปาซิเตอร์	MOS capacitor
มอสเฟต	MOSFET หรือ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
มอสเฟตกำลัง	Power MOSFET
มอสเฟตที่มีสัญญาณขนาดเล็ก	small signal MOSFET
มัลติเฟต	MUCH-FET หรือ Multichannel FET
ร่องตัววี	V-shaped groove
รอยต่อลาดแบบเชิงเส้น	linearly graded junction
เรกติไฟร์ไดโอด	rectifier diode
แรงดันขีดเริ่ม	threshold voltage
แรงดันพังทลายของไดอิเล็กตริก	dielectric breakdown voltage
แรงดันพังทลายแบบซีเนอร์	zener breakdown voltage
แรงดันพังทลายแบบพังก์เจอร์	punch-through breakdown voltage
แรงดันพังทลายแบบอะวอลานช์	avalanche breakdown voltage
วงจรรวมใหญ่มาก	VLSI หรือ Very Large Scale Integrated Circuits

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีโฟลทโซน	float zone
วีมอส	VMOS หรือ V-groove Power MOSFET
ศักย์ไฟฟ้าเฟอร์มิ	Fermi potential
สตรองอินเวอร์ชัน	strong inversion
ส่วนซ้อนทับ	overlap
สัมประสิทธิ์การแพร่	diffusion coefficient
สัมประสิทธิ์เชิงลาดของสารเจือ	impurity gradient
อนาล็อกทรานซิสเตอร์	Analog transistor
อินครีเมนต์ตัลพารามิเตอร์	incremental parameter
อ็อกไซไนเซชัน อินทิกรัล	ionization integral
เอ็น-แชนแนล	N-channel
เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	enhancement mode

คำนำ

ในต่างประเทศได้มีการพัฒนาอุปกรณ์กำลัง โดยใช้เทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำมาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1950 อุปกรณ์ในระยะแรกที่ได้พัฒนาขึ้นมา คือ ทรานซิสเตอร์ และ ไทริสเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการทำงานได้ที่กระแสและแรงดันสูง ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ได้พัฒนาขึ้นมาด้วยประสิทธิภาพการทำงานสูง ทำให้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง (power bipolar transistor) เป็นอุปกรณ์ที่เด่นขึ้นมาในยุคหนึ่ง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังที่ได้สร้างขึ้นมาในปี ค.ศ. 1970 สามารถทำงานได้ที่แรงดันสูงถึง 3000 โวลต์ และควบคุมกระแสได้ถึง 1000 แอมแปร์ จากนั้นเทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์กำลังสารกึ่งตัวนำตัวเดียว ๆ ได้ก้าวหน้ามากขึ้นตามลำดับ จนกระทั่งถึงช่วงการพัฒนาที่สำคัญอีกก้าวหนึ่งของอุปกรณ์กำลังประเภทใหม่ ซึ่งมีอนุภาคมินิ-แตรอนสูงมากที่เรียกว่า มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET : Power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) อุปกรณ์นี้ ได้ลดขนาดลงจากเดิมอย่างมาก และพัฒนามาเป็นวงจรรวมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีราคาตลาดต่ำลง และในปัจจุบันมอสเฟตกำลัง เข้าไปแทนที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังได้มากขึ้น เช่น ในระบบจ่ายกำลังแบบสวิทชิง เครื่องขยายเสียง และระบบสื่อสาร เป็นต้น

สำหรับการสร้างอุปกรณ์กำลังประเภทมอสเฟตภายในประเทศของห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการสร้างขึ้นเมื่อ ปี ค.ศ. 1987 เพื่อเป็นการรองรับเทคโนโลยีของอุปกรณ์ชนิดนี้ในอนาคต ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาทฤษฎี การออกแบบ และกระบวนการสร้าง โดยใช้เทคโนโลยีที่เป็นมาตรฐานของห้องปฏิบัติการในการสร้างอุปกรณ์กำลัง โดยเฉพาะอุปกรณ์กำลังประเภทมอสเฟตแบบดีมอส และในปี ค.ศ. 1990 ได้นำข้อมูลของมอสเฟตกำลัง แบบดีมอสมาช่วยในการออกแบบและสร้างเป็นมอสเฟตกำลัง แบบวีมอส มอสเฟตกำลังทั้งสองแบบที่สร้างขึ้นนี้เป็นชนิด เอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ซึ่งผลิตกันเป็นส่วนมากในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีการตอบสนองความถี่ที่สูงกว่า สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐาน การออกแบบ กระบวนการสร้าง ผลการทดลอง และบทสรุปของการพัฒนาอุปกรณ์นี้ภายในประเทศ โดยแบ่งลำดับความสำคัญของเนื้อหาได้ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำจะกล่าวถึงความเป็นมาตั้งแต่เริ่มต้นค้นพบอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต แล้วจึงพัฒนาไปเป็นมอสเฟตกำลัง จากนั้นได้กล่าวถึงประเภทของมอสเฟตกำลัง รวมถึงสิ่งที่ทำให้มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจทำการศึกษา โดยการเปรียบเทียบให้เห็นข้อได้เปรียบระหว่างมอสเฟตกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และ ไทริสเตอร์ ในตอนท้ายของบทยังได้กล่าวถึงแนวโน้มการประยุกต์ใช้งานของมอสเฟตกำลังในตลาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีของมอสเฟตกำลัง เนื่องจากมอสเฟตกำลังมีการทำงานที่เหมือนมอสเฟตทั่วไป (conventional MOSFET) ดังนั้นทฤษฎีของมอสเฟตจึงใช้อธิบายกับมอสเฟตกำลังได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วย โครงสร้าง และหลักการทำงานของมอสเฟตกำลัง แรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดใหญ่และขนาดสั้น ๆ จากนั้นจะกล่าวถึงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส อินครีเมนตัลพารามิเตอร์ แรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ของรอยต่อลาด แบบเชิงเส้น และในหัวข้อสุดท้ายจะเป็นเรื่องการตอบสนองความถี่

บทที่ 3 เป็นบทที่อธิบายถึงหลักการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับมอสเฟตกำลัง ซึ่งจะทำให้มอสเฟตกำลังที่สร้างมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นที่เหมาะสมในการสร้าง การออกแบบโครงสร้างในแนวตั้ง ซึ่งจะอธิบายถึงการแพร่อะตอมสารเจือทั้งในส่วน P-base และ N⁺-source จากนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบแรงดันขีดเริ่ม การออกแบบแรงดันพังทลาย การออกแบบการตอบสนองความถี่ และการออกแบบกระแสจุดแบบเป็นหัวข้อสุดท้าย

บทที่ 4 เนื้อหาจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างมอสเฟตกำลัง โดยเริ่มต้นจากการกล่าวถึงการสร้างมอสเฟตกำลังบนแผ่นผลึกซิลิกอน ด้วยกระบวนการสร้างในแนวระนาบรวมทั้งกระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพอสเซ็ป แล้วจึงได้กล่าวถึงกระบวนการสร้างมาตรฐานของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส แบบวีมอส และกระบวนการสร้างไดโอด เพื่อศึกษาปรากฏการณ์แรงดันพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นแล้วนำผลที่ได้ไปใช้ออกแบบกับมอสเฟตกำลัง

บทที่ 5 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของมอสเฟตกำลัง โครงสร้างขนาดเล็ก ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปออกแบบเป็นมอสเฟตกำลังที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการทำงานงานสูง สำหรับรายละเอียดภายในบทประกอบด้วย การทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตพื้นฐาน การศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสเดรนใน ทอมของการเพิ่มปริมาณกระแสเดรนให้สูงขึ้น การเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนให้เหมาะสม การศึกษาการควบคุมและการเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่ม การศึกษาปรากฏการณ์การเกิดแรงดันพังทลาย และการศึกษาการตอบสนองความถี่ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้ได้ทำการศึกษาจากมอสเฟตกำลัง แบบดีมอสที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาจากมอสเฟตกำลังที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ นอกจากจะทำการศึกษากับมอสเฟตกำลังแบบดีมอสแล้วยังได้ทำการศึกษาจากมอสเฟตกำลังแบบวีมอสด้วย

บทที่ 6 เป็นบทสรุปของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ที่ได้ทำการออกแบบ สร้างและทดลองของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสและแบบวีมอส รวมการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

จากเนื้อหาที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้เพียงพอที่จะใช้ในการออกแบบ สร้างและพัฒนาออสเฟตกำลังแบบดีมอสและแบบวีมอสสำหรับเทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ซึ่งนับได้ว่าเป็นก้าวที่สำคัญก้าวหนึ่ง ในการศึกษาและสร้างอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลังสูงขึ้นภายในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET : Power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) เป็นอุปกรณ์กำลังประเภทหนึ่งที่มีความสนใจมากขึ้น ไม่เฉพาะเพียงแต่ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น แต่ทางด้านเชิงพาณิชย์ก็ได้มีการพัฒนากันอย่างกว้างขวาง และก้าวหน้าไปมาก สำหรับในห้องปฏิบัติการได้มีการวิจัยมอสเฟตกำลังที่สามารถทนกำลังสูงถึง 7.5 kW[1] และมีการตอบสนองความถี่สูงถึง 1.4 GHz[2]. ซึ่งเหมาะสำหรับใช้งานทางด้านการสื่อสาร นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาโครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบใหม่ที่มีโครงสร้างผสมผสานระหว่างมอสเฟตกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าด้วยกัน เรียกว่า ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน (IGT : Insulated Gate Transistor) ทำให้อุปกรณ์กำลังชนิดนี้มีการทนกำลังได้สูงขึ้นอีก ส่วนทางด้านเชิงพาณิชย์ได้มีการปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างหลากหลายรูปแบบ และกระบวนการผลิตให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อให้มอสเฟตกำลังมีประสิทธิภาพสูงสุด และมีราคาลดลงทำให้เข้าไปแข่งขันกับอุปกรณ์กำลังประเภทอื่น ๆ ได้

1.1 ความริเริ่ม [3], [4]

ในปัจจุบันนี้ซิลิกอนเทคโนโลยีได้ก้าวหน้าไปมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดสำหรับวงจรรวมขนาดใหญ่มาก (VLSI : Very Large Scale Integrated Circuits) ดังเช่น ในไมโครโปรเซสเซอร์และหน่วยความจำสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น นอกจากนี้มอสเฟตยังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงที่สำคัญด้วย

มอสเฟตมีหลักการการทำงาน ซึ่งควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าเป็นหัวใจสำคัญได้นำเสนอแนวความคิดขึ้นเป็นครั้งแรกในต้นปี ค.ศ. 1930 โดย Lilienfeld และ Heil จากมหาวิทยาลัย Leipzig จากนั้น Shockley และ Parson ได้เริ่มต้นทำการศึกษาค้นคว้า โดยทำการสร้างเฟต (FET) ซึ่งใช้การระเหยของชั้นเยอรมันเนียมบนไดโอเลคตริก ในปี ค.ศ. 1948 ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 Kahng และ Atalla ได้ทำการสร้างมอสเฟตขึ้นเป็นครั้งแรก โดยใช้เทคโนโลยีของซิลิกอน ซึ่งถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูง ส่วนคุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ได้ทำการศึกษาในเวลาต่อมาโดย Ihanola, Moll, Sah, Hofstein และ Heiman

ทางด้านมอสเฟตกำลังได้เริ่มต้นพัฒนามาจากเฟต ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1964 โดย Zuleeg และ Teszner ได้สร้างเฟตที่มีความสามารถทนกำลังและการตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้น โดยเฟตของ Zuleeg เรียกว่ามัดเฟต (MUCH-FET : Multichannel FET) ส่วนเฟตของ Teszner เรียกว่า กริดิสเตอร์ (Gridistor) ซึ่งมีหลักการการทำงานคล้าย ๆ กับหลอดสูญญากาศไตรโอด แต่สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่ Zuleeg และ Teszner ได้ทำการวิจัยเรื่องมัดเฟตกับกริดิสเตอร์

ได้มีนักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อ Nishizawa และ Watanabe จากมหาวิทยาลัย Tohoku ได้จดทะเบียนลิขสิทธิ์ในการสร้างอนาล็อกทรานซิสเตอร์ (Analog transistor) ซึ่งก็คือเฟตชนิดหนึ่งนั่นเอง และได้มีรายงานเกี่ยวกับอนาล็อกทรานซิสเตอร์ ซึ่งสามารถทำงานที่ความถี่สูงและทนกำลังสูง โดยเรียกชื่ออุปกรณ์ชนิดนี้ว่า ซิต (SIT : Static Induction Transistor) ในปี ค.ศ. 1969

หลังจาก ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมาการพัฒนาเฟตกำลังได้ขยายไปทั่วโลก ในแต่ละปีจะมีรายงานถึงการค้นพบเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในการสร้างเฟตกำลังตลอดเวลา และได้เริ่มนำโครงสร้างของมอสเฟตมาพัฒนาเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นมอสเฟตกำลัง เนื่องจากมอสเฟตสามารถสร้างได้ทั้งดีพลีชันโหมดและเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ในขณะที่เฟตสร้างเป็นดีพลีชันโหมดได้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่สำหรับการประยุกต์ใช้งานโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว จะใช้เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นมอสเฟตจึงเป็นโครงสร้างที่ได้เปรียบกว่าเฟตที่จะพัฒนาเป็นอุปกรณ์กำลังต่อไป

มอสเฟตกำลังตัวแรกที่ได้สร้างขึ้น คือ วีมอส (VMOS : V-groove Power MOSFET) และได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงจนผลิตออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ได้ โดย Siliconix แต่เนื่องจากกระบวนการสร้างวีมอสมีขั้นตอนมาก มีความยุ่งยากในเทคนิคบางประการ และยังมีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูงด้วย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างมอสเฟตกำลังที่มีความยุ่งยากน้อยกว่าและราคาถูกกว่า คือ ดีมอส (Double Diffusion Power MOSFET) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่นิยมสร้างกันในปัจจุบันนี้ และได้ผลิตออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ โดยใช้เครื่องหมายการค้าแบบต่าง ๆ เช่น เฮกเฟต (HEXFET) ของ International Rectifier , ซิปมอส (SIPMOS) ของ Siemens และ ทีมอส (TMOS) ของ Motorola เป็นต้น

1.2 ประเภทของมอสเฟตกำลัง

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต และมอสเฟตกำลัง เป็นการไหลของประจุพาหะส่วนมากเพียงอย่างเดียว (ดังเช่น การไหลของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนมากในมอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล) การแบ่งประเภทของมอสเฟตกำลังจึงสามารถแบ่งได้หลาย ๆ แบบ และการแบ่งตามลักษณะการทำงานก็เป็นการแบ่งประเภทหนึ่งที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งแบ่งขึ้นเป็นเอ็น-แชนแนล และพี-แชนแนล แล้วยังแบ่งย่อยออกเป็นดีพลีชันโหมด และเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. มอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (N-channel enhancement mode power MOSFET) คือ มอสเฟตกำลังที่มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสตัวนำ ดังนั้นมอสเฟตกำลังชนิดนี้จึงมีส่วนเดรน และส่วนซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสแรงดันที่เกต สารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสจะเป็นชนิดพี ดังนั้นในขณะใช้งานจึงต้องเหนี่ยวนำให้สารกึ่งตัวนำชนิดพีบริเวณช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

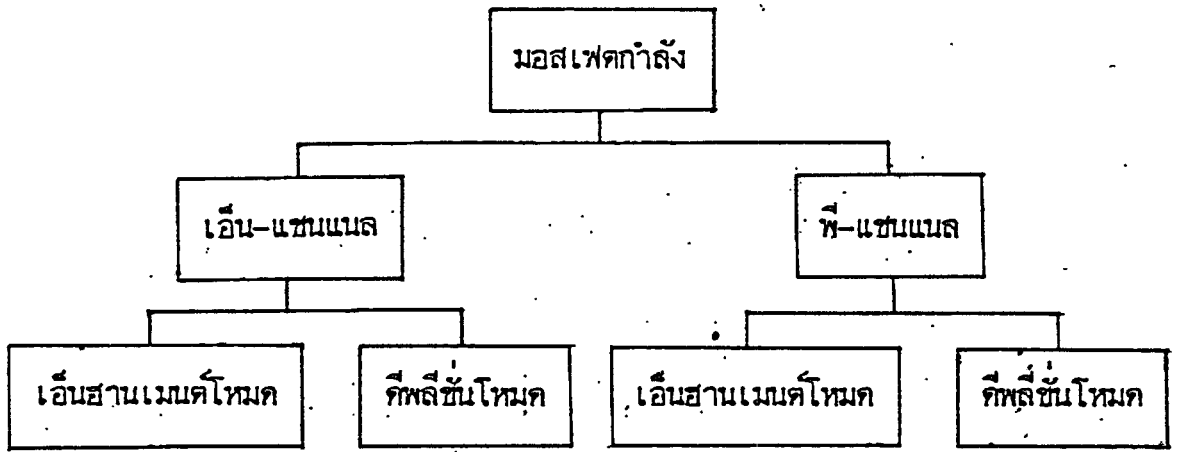
เอ็นก่อน โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกทเป็นบวก เมื่อเทียบกับส่วน P-base

2. มอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล ดีพลีชันโหมด (N-channel depletion mode power MOSFET) คือ มอสเฟตกำลังที่มีโอเลตรอนเป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสสวิทช์ ดังนั้น มอสเฟตกำลังชนิดนี้จึงมีส่วนเดรน และส่วนซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสแรงดันที่เกท สารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสจะเป็นชนิดเอ็น ทำให้เกิดการเชื่อมต่อเนื้อสารกึ่งตัวนำระหว่างส่วนซอสกับส่วนเดรน อันเป็นผลให้เกิดกระแสสวิทช์ขึ้นทันทีที่ให้แรงดันไบอัสแก่เดรน-ซอส ในการควบคุมปริมาณกระแสสวิทช์นี้ สามารถทำได้ทั้งในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสสวิทช์เพิ่มขึ้น โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกทเป็นบวกเมื่อเทียบกับ P-base และในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสสวิทช์ลดลง โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกทเป็นลบเมื่อเทียบกับ P-base

3. มอสเฟตกำลังชนิดพี-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (P-channel enhancement mode power MOSFET) คือ มอสเฟตกำลังที่มีโฮลเป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสสวิทช์ ดังนั้น มอสเฟตกำลังชนิดนี้จึงมีส่วนเดรนและส่วนซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสแรงดันที่เกท สารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสจะเป็นชนิดเอ็น ดังนั้นในขณะใช้งานจึงต้องเหนี่ยวนำให้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่บริเวณช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อน โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกทเป็นลบ เมื่อเทียบกับส่วน P-base

4. มอสเฟตกำลังชนิดพี-แชนแนล ดีพลีชันโหมด (P-channel depletion mode power MOSFET) คือ มอสเฟตกำลังที่มีโฮลเป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสสวิทช์ ดังนั้นมอสเฟตกำลังชนิดนี้จึงมีส่วนเดรน และส่วนซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสแรงดันที่เกท สารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสจะเป็นชนิดพี ทำให้เกิดการเชื่อมต่อเนื้อสารกึ่งตัวนำระหว่างส่วนซอสกับส่วนเดรน อันเป็นผลให้เกิดกระแสสวิทช์ขึ้นทันทีที่ให้แรงดันไบอัสแก่เดรน-ซอส ในการควบคุมปริมาณกระแสสวิทช์นี้ สามารถทำได้ทั้งในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสสวิทช์เพิ่มขึ้น โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกทเป็นลบเมื่อเทียบกับ P-base และในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสสวิทช์ลดลง โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกทเป็นบวกเมื่อเทียบกับ P-base

อย่างไรก็ตาม การศึกษามอสเฟตกำลังในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษา มอสเฟตกำลังแบบดีมอส และวีมอส เฉพาะชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดเท่านั้น เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความเร็วสูงกว่า และใช้งานได้ง่ายกว่าเพราะว่าใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าบวก ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานทั่ว ๆ ไป และยังต่อเข้ากับอุปกรณ์ชนิดอื่นได้ง่ายด้วย ส่วนในรูปที่ 1.2 เป็นโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลังทั้ง 4 แบบ จะเห็นว่าสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลังที่ใช้จะเหมือนกับมอสเฟตธรรมดา



รูปที่ 1.1 การแบ่งชนิดของมอสเฟตกำลังตามลักษณะของการทำงาน

TYPE		CROSS SECTION DMOS	CROSS SECTION VMOS	OUTPUT CHARACTERISTICS	SYMBOLS
n-CHANNEL	ENHANCEMENT (NORMALLY OFF)				
	DEPLETION (NORMALLY ON)				
p-CHANNEL	ENHANCEMENT (NORMALLY OFF)				
	DEPLETION (NORMALLY ON)				

รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้าง กราฟคุณสมบัติกระแส-แรงดัน และสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสและวีมอส

1.3 การเปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และ ไทรซิสเตอร์

เพื่อให้เห็นว่ามอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังที่น่าสนใจมาก ดังนั้นจึงได้เปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟตกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังและ ไทรซิสเตอร์ ซึ่งแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของมอสเฟตกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และ ไทรซิสเตอร์

พารามิเตอร์	มอสเฟตกำลัง	ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง	ไทรซิสเตอร์
การทนกำลัง	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
ความต้านทานด้านอินพุท	สูง	ต่ำ	ต่ำ
การตอบสนองความถี่	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
การเกิด Secondary breakdown	ยาก	ง่าย	ง่าย
ระบบระบายความร้อน	เล็ก	ใหญ่	ใหญ่
การสูญเสียกำลังด้านอินพุท	ต่ำ	สูง	สูง
การต่ออุปกรณ์ขนานกัน	ง่าย	ยาก	ยาก
ความยุ่งยาก และราคาของวงจรขับ	น้อย	มาก	มาก
ราคา	แพง	ปานกลาง	แพง

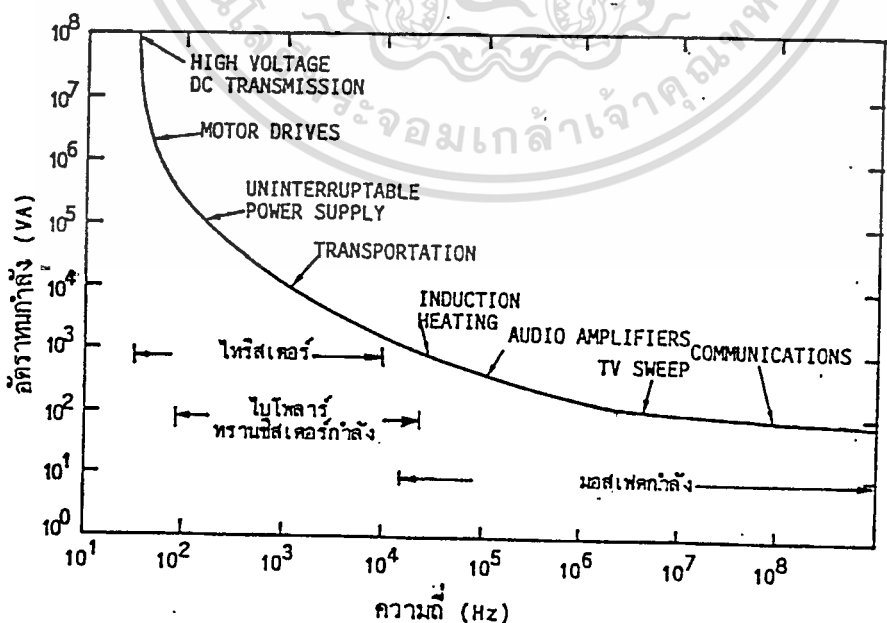
จากการเปรียบเทียบในตารางที่ 1.1 พบว่ามอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจสำหรับงานทางด้านกำลังสูงปานกลาง และเหมาะที่จะใช้กับงานความถี่สูง แต่ยังคงมีข้อเสียในเรื่องราคาแพง แต่ถ้าเทคโนโลยีของมอสเฟตกำลังพัฒนาสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ราคาของมอสเฟตกำลังลดต่ำลงได้ มอสเฟตกำลังก็จะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานมากขึ้น

1.4 แนวโน้มของมอสเฟตกำลังในตลาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง[5],[6]

มอสเฟตกำลังได้มีการผลิตออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ในระหว่าง 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการยอมรับมอสเฟตกำลังกันมากขึ้น อย่างไรก็ตาม, การเข้าไปแทนที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังด้วยมอสเฟตกำลังยังคงเป็นไปได้น้อย เนื่องจากราคาของอุปกรณ์ที่ยังแพงที่อัตราณกำลังเดียวกัน แต่เมื่อเทคโนโลยีของมอสเฟตกำลังได้พัฒนาให้ดีขึ้น ความแตกต่างในเรื่องของราคานั้นจะน้อยลง ทำให้มอสเฟตกำลังเป็นที่น่าสนใจมากขึ้น และในปี ค.ศ. 1985 พบว่ามอสเฟตกำลังมีตลาดเพียง 10 % ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

ในปี ค.ศ. 1980 ได้มีการค้นพบอุปกรณ์ชนิดใหม่ขึ้น การทำงานของอุปกรณ์นี้มีพื้นฐานมาจากการรวมตัวของโครงสร้างมอสเฟต และการนำกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ อุปกรณ์นี้เรียกกันว่าทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน (IGT) หรือ Insulation Gate Transistor ซึ่งมีคุณสมบัติที่เด่น คือ มีความต้านทานด้านอินพุตสูง และมีความสามารถในการทนกำลังสูง อุปกรณ์นี้ได้นำไปสร้างเป็นวงจรรวมของระบบกำลัง ทำให้ราคาตกลงประมาณ 10 เท่าของระบบเดิม ซึ่งเป็นที่คาดหมายกันว่าจะมีการเติบโตอย่างรวดเร็วในตลาดอุปกรณ์กำลัง

การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์กำลังจะถูกพิจารณาในเรื่องของการทนกำลัง และความถี่เป็นสิ่งสำคัญ การประยุกต์ใช้งานที่แสดงในรูปที่ 1.3 เป็นการแสดงถึงการใช้งานของอุปกรณ์กำลัง ดังเช่น ถ้าต้องการใช้อุปกรณ์กำลังในระบบกระแสตรงแรงดันสูง (HVDC) ซึ่งต้องการกำลังสูงมาก ๆ และความถี่ต่ำกว่า 10 kHz ก็จะใช้ไทรสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดในกรณีของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังจะใช้ใน ช่วงความถี่ถึง 50 kHz และทนกำลัง 500 kVA ส่วนมอสเฟตกำลังจะใช้งานในย่านความถี่ที่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป แต่การทนกำลังที่ได้จะต่ำกว่า



รูปที่ 1.3 การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทรานซิสเตอร์ MOSFET

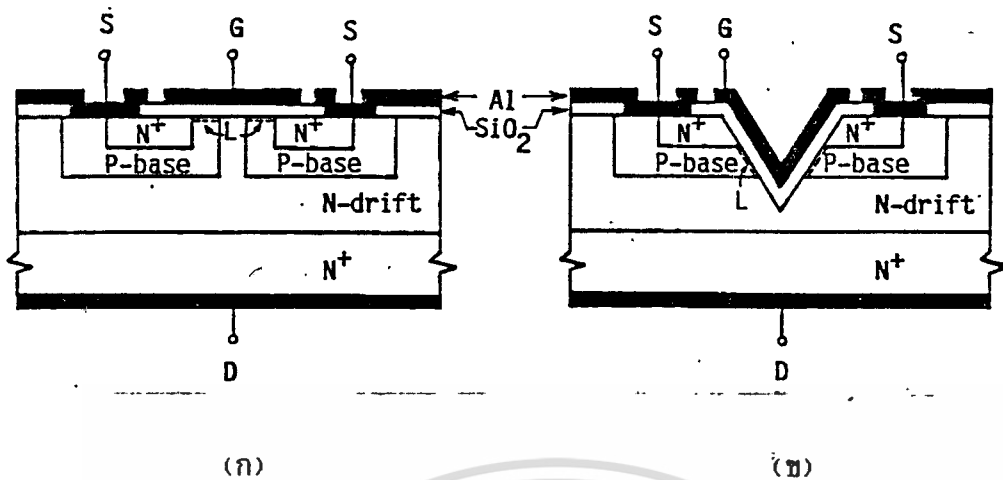
โครงสร้างของ MOSFET มีส่วนประกอบ 4 ชั้น (ในกรณีของเอ็น-แชนแนลจะประกอบด้วย ชั้น N^+ -source ชั้น P-base ชั้น N-drift และชั้น N^+ -drain) และ 3 ขั้ว (ขั้วเกต ขั้วเดรน และขั้วซอร์ส) จากส่วนประกอบนี้ทำให้ MOSFET มีความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ เนื่องจากเทคนิคการแพร่สารเจือ 2 ครั้ง ทำให้ได้โครงสร้างทางเรขาคณิตผสมระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กับ MOSFET (conventional MOSFET) ซึ่งจะเรียกสั้น ๆ ว่า MOSFET และจากโครงสร้างนี้ทำให้ MOSFET นำกระแสเดรนได้มากกว่าโครงสร้าง MOSFET ธรรมดา อย่างไรก็ตามการทำงานของ MOSFET ยังคงเหมือนกับ MOSFET ธรรมดา ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ใช้กับ MOSFET จึงสามารถใช้อธิบายกับ MOSFET ได้

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ MOSFET

หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ MOSFET อาศัยลักษณะการสร้างชั้นนำ (conduction layer) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ โดยการสะสมของประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเกิดขึ้นจากการให้แรงดันไบอัสที่แผ่นโลหะที่มีชั้นฉนวนอยู่ระหว่างกลาง MOSFET สร้างขึ้นครั้งแรกกับซิลิกอน และสร้างซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวนด้วยกระบวนการทางความร้อน ดังนั้น MOSFET จึงอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ อิกเฟต (IGFET: Insulated Gate Field Effect Transistor) และได้นำไปใช้ในทรานซิสเตอร์วงจรรวม ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนการพัฒนา MOSFET ตัวเดียว ๆ เพื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ประเภทกำลังในช่วงต้น ๆ ได้พัฒนาขึ้นมาด้วยหลักการเดียวกันที่เรียกว่า โครงสร้างทางด้านข้าง (lateral structure) อุปกรณ์ที่ได้จะมีส่วนเดรน เกต และซอร์ส อยู่บนด้านเดียวกันของแผ่นผลึกซิลิกอน ถึงแม้ว่าโครงสร้างนี้จะเหมาะสมกับการสร้างวงจรรวม แต่ไม่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นอุปกรณ์ที่ให้กำลังสูง เนื่องจากจะทำให้อุปกรณ์มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างต่อมาเป็นโครงสร้างในแนวตั้ง (vertical structure) ซึ่งอุปกรณ์ที่ได้จะมีส่วนเดรนอยู่ที่ด้านใต้ของแผ่นผลึก ทำให้เหมาะสมที่จะเป็นอุปกรณ์กำลังมากกว่า เพราะว่าสามารถออกแบบให้ส่วนซอร์สมีพื้นที่มากขึ้น

ในรูปที่ 2.1 เป็นโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ MOSFET ในแนวตั้ง 2 แบบ โดยโครงสร้างแรกคือ MOSFET แบบดีมอส ซึ่งจะเรียกสั้น ๆ ว่า ดีมอส แสดงในรูปที่ 2.1 (ก) สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือในแนวระนาบ ดีมอสจะมีการแพร่สารเจือ 2 ครั้งเหมือนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เป็นส่วน P-base และส่วน N^+ -source ซึ่งจะแพร่สารเจือลงบนช่องที่ได้ออกแบบไว้ ส่วน P-base จะทำการขั้วลึกลงกว่าส่วน N^+ -source และผลต่างระหว่างส่วน P-base กับส่วน N^+ -source ทางด้านข้างจะถูกกำหนดให้เป็นส่วนของช่องทางเดินกระแสที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานเมนต์โหมด

(ก) โครงสร้างของดีมอส (ข) โครงสร้างของวีมอส

โครงสร้างที่สอง คือ มอสเฟตกำลังแบบวีมอส ซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่า วีมอส แสดงในรูปที่ 2.1 (ข) ในกรณีนี้ ส่วนของ P-base ไม่จำเป็นต้องมีรูปร่างที่แน่นอนเหมือนกับกรณีของดีมอส แล้วจึงทำการแพร่สารเจือส่วน N^+ -source จากนั้นร่องตัววี (V-shaped groove) จะถูกสร้างขึ้นโดยการกัดผลึกซิลิกอนผ่านส่วนแพร่สารเจือทั้งสอง ต่อจากนั้นจึงทำการสร้างส่วนเกตให้เชื่อมกับส่วน N^+ -source และครอบคลุมส่วนร่องตัววีทั้งหมด ส่วนช่องทางเดินกระแสสำหรับโครงสร้างนี้จะวางตัวตามแนวหนึ่งของร่องตัววี

ทั้งสองโครงสร้างนี้รอยต่อพี-เอ็นระหว่างส่วน P-base กับ N-drift เป็นส่วนที่กำหนดความสามารถในการทนแรงดัน ถ้าให้ขั้วเกตลวดจรเข้ากับขั้วซอส ผิวนอกส่วน P-base จะไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุ และป้อนแรงดันบวกไบอัสแกเดรน-ซอส (V_{DS}) จะเกิดแรงดันไบอัสย้อนกลับระหว่างรอยต่อส่วน P-base กับ N-drift ทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะทั้งสองด้าน แต่เนื่องจากส่วน P-base มีปริมาณความหนาแน่นอะตอมสารเจือมากกว่า จึงทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วน N-drift มากกว่าส่วน P-base ซึ่งปริมาณความหนาแน่นอะตอมสารเจือและความกว้างของชั้น N-drift จะเป็นตัวกำหนดแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ จากคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ ดังนั้นเมื่อต้องการออกแบบให้มอสเฟตกำลังมีความสามารถในการทนแรงดันได้สูงจะต้องให้ปริมาณความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน N-drift มีค่าน้อย และความกว้างของชั้น N-drift มีค่ามาก

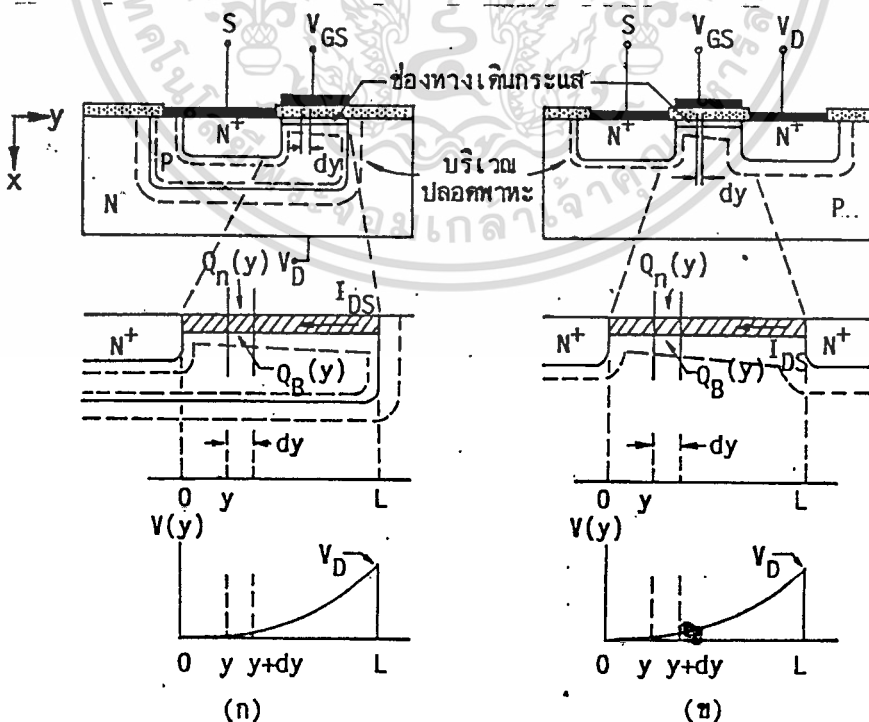
กระแสไฟฟ้าจะไหลจากเดรนไปยังซอสในมอสเฟตกำลังได้ เมื่อมีการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสเกิดขึ้นระหว่างส่วน N^+ -source และส่วน N-drift ซึ่งเกิดจากการให้ไบอัสแรง

ต้นบวกที่ขั้วเกต แล้วทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ สนามไฟฟ้านี้จะมีค่าเพียงพอ (สำหรับเกตออกไซด์ที่หนา 1000 \AA และแรงดันที่เกต 10 V . สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าประมาณ 10^6 V/cm) ที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่บริเวณผิวของส่วน P-base เรียงตัวกันเป็นช่องทางเดินกระแสระหว่างส่วน N^+ -source และ N-drift เมื่อให้แรงดันไบอัสที่ขั้วเดรนเป็นบวกจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างเดรนกับซอร์ส ซึ่งผ่านส่วน N-drift และช่องทางเดินกระแส จะสังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนี้เกิดจากพาหะส่วนมากเท่านั้น (ในกรณีของเอ็น-แชนแนล พาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน) จะไม่มีพาหะส่วนน้อยไหลในระหว่างที่มอสเฟตกำลังอยู่ในช่วงการนำกระแส (on state)

เมื่อมอสเฟตกำลังอยู่ในช่วงที่ไม่นำกระแส (off state) แรงดันที่ขั้วเกตจะลดลงเป็นศูนย์ โดยการลัดวงจรเข้ากับขั้วซอร์ส ในขณะที่ไม่มีการให้แรงดันไบอัสที่ขั้วเกต จะไม่มีการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนขึ้นที่ผิวของส่วน P-base ทำให้ช่องทางเดินกระแสขาด มอสเฟตกำลังสามารถสวิตช์ได้อย่างรวดเร็วจากภาวะการนำกระแสไปสู่ภาวะที่ไม่นำกระแส โดยปราศจากการหน่วงเวลาจากการสะสมและรวมตัวกันของพาหะส่วนน้อย ดังเช่นในกรณีของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

2.2 แรงดันขีดเริ่ม

เนื่องจากมอสเฟตกำลังมีหลักการการทำงานที่เหมือนกับมอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นมอสเฟตกำลังจึงสามารถใช้สมการของมอสเฟตทั้งหมดอธิบายได้



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบโครงสร้าง และการทำงานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ใช่ว่าจะเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ก) มอสเฟตกำลังแบบ 1 เกต (ข) มอสเฟต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

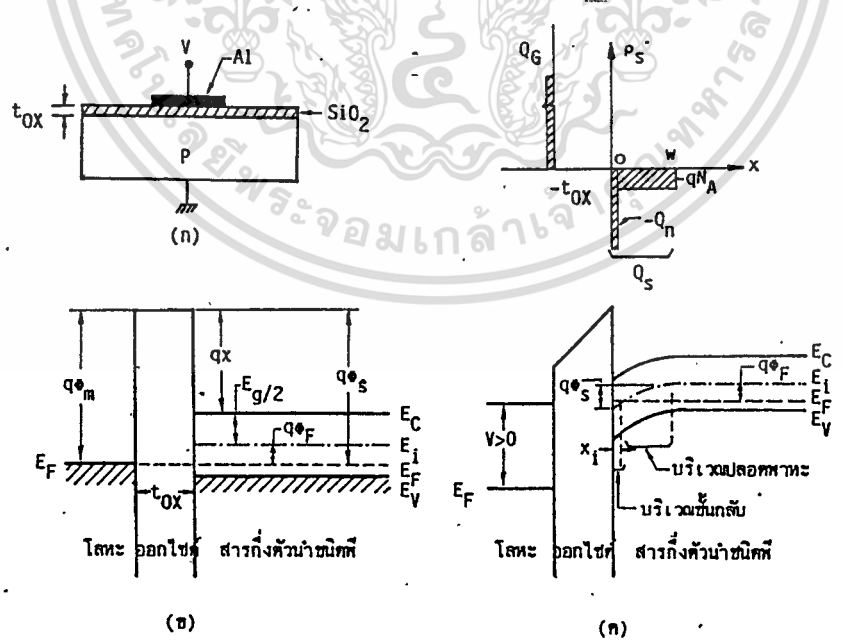
แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage : V_T) คือ แรงดันที่ไบอัสให้แกเกต (V_{GS}) มีค่าน้อยที่สุด เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแสที่บริเวณผิวของส่วน P-base ได้ส่วนเกต แล้วทำให้กระแสเดรน (I_{DS}) เริ่มไหลได้พอดี

2.2.1 แรงดันขีดเริ่มกับมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดใหญ่ [7]

สำหรับมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดใหญ่ (large channel MOSFET) และให้แรงดันไบอัสเดรน-ซอสค่าน้อย ๆ เพื่อให้ช่องทางเดินกระแสสม่ำเสมอตลอดทั้งช่วงจากส่วนซอสไปยังเดรน เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนของเกตออกไซด์ของมอสเฟตจะเหมือนกับการพิจารณาจากมอสคาปาซิเตอร์ (MOS capacitor) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) และจากหลักการคงตัวของประจุ (Conservation of charge) จะได้ว่า

$$Q_G + Q_{SS} - (Q_n + Q_B) = 0 \quad \dots\dots(2.1)$$

- เมื่อ Q_G คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เกต (C/cm^2)
- Q_{SS} คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 กับ Si (C/cm^2)
- Q_n คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าของชั้นกลับ (inversion layer) ที่บริเวณช่องทางเดินกระแส (C/cm^2)
- Q_B คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณปลดพาหะที่ผิวขณะได้รับแรงดันถึงจุดที่ทำให้เกิดชั้นกลับพอดี (C/cm^2)



รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างของมอสคาปาซิเตอร์ (ข) โครงสร้างของแถบพลังงานที่เฟลตแบนด์ (ค) การกระจายของประจุไฟฟ้า และ โครงสร้างของแถบพลังงานที่สตรองอินเวอร์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 (ข) เป็นโครงสร้างของแถบพลังงานทางอุดมคติ เมื่อไม่มีการให้แรงดันไบอัสที่เกต จะไม่มีการโค้งงอของแถบพลังงาน ซึ่งเรียกเงื่อนไขว่า แพลตแบนด์ (flat band) แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ปรากฏว่าแถบพลังงานที่ได้จะมีการโค้งงอเกิดขึ้น เนื่องจากฟังก์ชันงาน (work function) ระหว่างโลหะกับซิลิกอน (ϕ_{MS}) และความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอน (Q_{SS}) ดังนั้นจะต้องให้แรงดันไบอัสแก่เกต เพื่อปรับเข้าสู่แพลตแบนด์ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าแรงดันแพลตแบนด์ (V_{FB}) มีค่าเป็น

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} \quad \dots\dots(2.2)$$

เมื่อ C_{OX} คือ ความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์ (F/cm^2) = $\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}$

ในรูปที่ 2.3 (ค) เป็นโครงสร้างของแถบพลังงานที่แรงดันขีดเริ่ม ซึ่งเกิดขึ้นที่เงื่อนไขของสตรองอินเวอร์ชัน (Strong inversion) สมการของแรงดันขีดเริ่มที่ได้จะเป็น

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{Q_B}{C_{OX}} \quad \dots\dots(2.3)$$

เมื่อ ϕ_F คือ ศักย์ไฟฟ้าเฟอร์มี (Fermi potential) (V) = $(kT/q) \ln(N_A/n_1)$

n_1 คือ ความหนาแน่นพาหะของซิลิกอนบริสท์ (cm^{-3})

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสม้าเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ (Q_B) จะมีค่าเท่ากับ

$$Q_B = qN_A x_{dmax} \quad \dots\dots(2.4)$$

เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (C)

N_A คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ (cm^{-3})

x_{dmax} คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่กว้างที่สุดที่สตรองอินเวอร์ชัน (cm)

และบริเวณปลอดพาหะที่กว้างที่สุดมีค่าเท่ากับ

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\epsilon_S(2\phi_F)}{qN_A}} \quad \dots\dots(2.5)$$

เมื่อ ϵ_S คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน

แทนค่า สมการที่ (2.4) และ (2.5) ลงในสมการที่ (2.3) ดังนั้นแรงดันขีดเริ่มจะได้เป็น

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{\sqrt{2q\epsilon_S N_A} (2\phi_F)}{C_{OX}} \quad \dots\dots(2.6)$$

2.2.2 แรงดันขีดเริ่มกับมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดสั้น ๆ [8], [9]

สำหรับกรณีของมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดสั้น ๆ (short channel MOS-FET) พบว่าเมื่อออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) มีค่าลดลง จะทำให้แรงดันขีดเริ่มจะมีค่าลดลง เนื่องจากผลของบริเวณปลอดพาหะที่แพร่ขยายกว้างขึ้นจนมีผลกระทบกับความยาวของช่องทางเดินกระแส ทำให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสที่แท้จริง (effective channel length : L_{eff}) มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งผลนี้จะกระทบกับค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะ (Q_B) ในเทอมสุดท้ายของสมการที่ (2.3) ดังนั้นเพียงแต่หาค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (Q'_B) ได้ จะทำให้สามารถคำนวณหาแรงดันขีดเริ่ม ในกรณีของมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดสั้น ๆ ได้

เมื่อนิยามาในรูปที่ 2.4 จะได้ค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป มีค่าเท่ากับ

$$Q'_B = -qN_A[L + L_{eff}]/2]x_{dmax} \dots\dots(2.7)$$

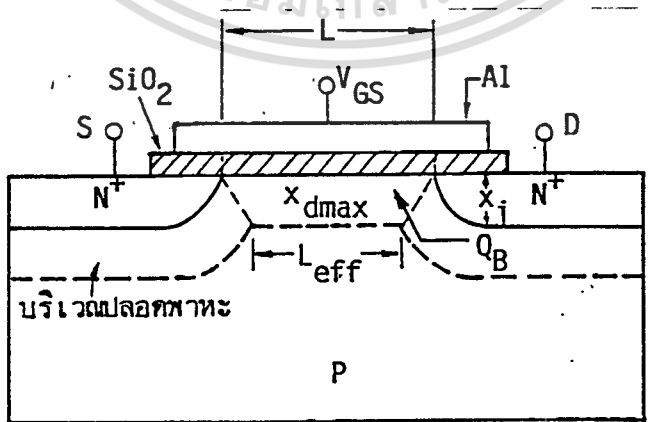
เมื่อ L_{eff} คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแสที่แท้จริง มีค่า $L_{eff} \approx L - 2x_{dmax}$ (cm)

และ

$$(L + L_{eff})/2 = L - [(1 + 2x_{dmax}/x_j)^{1/2} - 1]x_j/L \dots\dots(2.8)$$

เมื่อ x_j คือ ความลึกของรอยต่อ (cm)
แทนสมการที่ (2.7) และ (2.8) ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

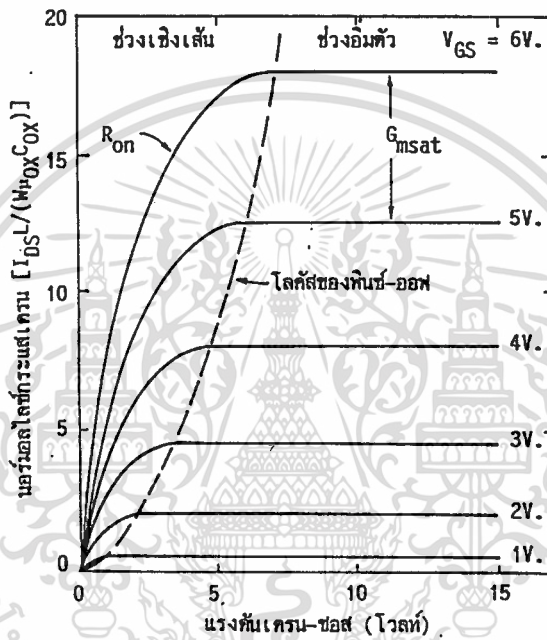
$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + (Q_B/C_{OX})\{1 - [(1 + 2x_{dmax}/x_j)^{1/2} - 1]x_j/L\} \dots\dots(2.9)$$



รูปที่ 2.4 มอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดสั้น ๆ และผลกระทบที่เกิดเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสของมอสเฟต

โดยทั่วไปแล้วกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS}) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 ที่แรงดันเดรน-ซอสมีค่าต่ำ ($V_{DS} < V_{GS} - V_T$) กระแสเดรนที่ไหลนี้จะอยู่ในช่วงเชิงเส้น (Linear region) นั่นคือ กระแสเดรนที่ได้จะแปรโดยตรงกับค่าแรงดันเดรน-ซอสที่เปลี่ยนไป แต่เมื่อแรงดันเดรน-ซอสมีค่าสูงขึ้น ($V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$) กระแสเดรนที่ได้จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่าแรงดันเดรน-ซอส และแรงดันเกตที่คงที่นี้ กระแสเดรนที่ได้จะมีค่าสูงสุดในช่วงนี้จะเรียกว่า ช่วงอิ่มตัว (Saturation region)



รูปที่ 2.5 การทำงานในช่วงต่าง ๆ ของกราฟคุณสมบัติกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอส สำหรับมอสเฟตชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

2.3.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสในช่วงเชิงเส้น

การวิเคราะห์สมการกระแสเดรนของมอสเฟต โดยปกติแล้วจะใช้วิธี gradual channel approximation [10] โดยสมมติให้สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในแนวช่องทางเดินกระแส ทิศทาง y ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 แปรค่าอย่างช้า ๆ และมีค่าน้อยกว่าสนามไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉาก (ทิศทาง x) กับผิวซิลิกอนมาก ๆ ส่วนช่องทางเดินกระแสที่เกิดขึ้นจะแปรอย่างช้า ๆ เป็นฟังก์ชันกับตำแหน่ง จากผลของการประมาณค่านี้ สามารถใช้วิเคราะห์มอสเฟตใน 1 มิติได้ โดยมีระยะทางในการวิเคราะห์เท่ากับช่องทางเดินกระแสจากส่วนซอสไปยังส่วนเดรน นอกจากนี้ความถูกต้องในการวิเคราะห์ยังขึ้นกับบริเวณหลอดพาหะที่เกิดขึ้นที่บริเวณปลายช่องทางเดินกระแสกับส่วนเดรนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์นี้จะพิจารณาในกรณีของมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสขนาดใหญ่ เมื่อให้แรงดันไบอัสบวกเข้าที่เกตมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} > V_T$) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดเป็นช่องทางเดินกระแสขึ้น และให้แรงดันตกคร่อมเดรน-ซอส ที่ทำให้ความยาวน้อย ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปของช่องทางเดินกระแส dy มีแรงดันตกคร่อมเป็น dV ซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสเดรน (I_{DS}) ขึ้น ดังนั้นความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปค่าน้อย ๆ dR จะมีค่าเท่ากับ dV/I_{DS} หรือ

$$dV = I_{DS}dR = \frac{-I_{DS}dy}{\mu_n Q_n(y)} \quad \dots\dots(2.10)$$

เมื่อ $Q_n(y)$ คือ ประจุไฟฟ้าที่ช่องทางเดินกระแสต่อหน่วยพื้นที่ (C/cm^2)

W คือ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส (cm)

μ_n คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน ($cm^2/V.s$)

และ $Q_n(y)$ จะมีค่าเท่ากับ

$$Q_n(y) = -C_{OX}[V_{GS} - V_{FB} - V(y) - 2\phi_F] + [2\epsilon_S q N_A (2\phi_F + V(y))]^{1/2} \quad \dots\dots(2.11)$$

แทนค่า $Q_n(y)$ ลงในสมการ (2.10) แล้ว อินทิเกรตด้วยเงื่อนไขขอบเขต สำหรับ V มีค่าจาก 0 ถึง V_{DS} และสำหรับ y มีค่าจาก 0 ถึง L ดังนั้นสมการของกระแสเดรนจะได้เป็น

$$I_{DS} = (W/L)\mu_n C_{OX} \left\{ (V_{GS} - V_{FB} - 2\phi_F - \frac{V_{DS}}{2})V_{DS} - \frac{2}{3} \left[(2\epsilon_S q N_A) / C_{OX}^2 \right]^{1/2} \left[(V_{DS} + 2\phi_F)^{3/2} - (2\phi_F)^{3/2} \right] \right\} \quad \dots\dots(2.12)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแส (cm)

และในบางกรณีของมอสเฟตจะมีการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับกับฐานรอง (Back gate voltage : V_{BG}) ดังนั้นสมการกระแสเดรนที่สมบูรณ์ของมอสเฟตเป็น

$$I_{DS} = (W/L)\mu_n C_{OX} \left\{ (V_{GS} - V_{FB} - 2\phi_F - V_{DS})V_{DS} - \frac{2}{3} \left[(2\epsilon_S q N_A) / C_{OX}^2 \right]^{1/2} \left[(V_{DS} + 2\phi_F + V_{BG})^{3/2} - (2\phi_F + V_{BG})^{3/2} \right] \right\} \quad \dots\dots(2.13)$$

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของมอสเฟตกำลัง ส่วน P-base ซึ่งเทียบเท่ากับส่วนฐานรองของมอสเฟต จะถูกเชื่อมต่อกับส่วนซอสเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นสมการที่ (2.12) จึงเป็นสมการสมบูรณ์ของมอสเฟตกำลัง

2.3.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสในช่วงอิ่มตัว

เมื่อเพิ่มแรงดันเดรน-ซอสที่มีค่าสูงมากขึ้น จนกระทั่งกระแสเดรนที่ได้รับมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันเดรน-ซอสที่สูงขึ้น จนกว่าจะเกิดปรากฏการณ์พังทลายของอุปกรณ์ การทำงานนี้จะอยู่ในช่วงอิ่มตัวซึ่งเป็นผลให้ คอนดักแตนซ์ ($g_{ds} = \frac{\partial I_{DSsat}}{\partial V_{DS}} \Big|_{V_{GS} = \text{const.}}$) มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อตีฟิสิกส์เพื่อเรติเอต สมการที่ (2.12) เทียบกับ V_{DS} และแก้สมการโดยให้ $V_{DS} = V_{DSsat}$ จะได้ว่า

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_{FB} - 2\phi_F + \frac{\epsilon_S q N_A}{C_{OX}} [1 - (1 + \frac{2C_{OX}^2 (V_{GS} - V_{FB})^2}{\epsilon_S q N_A})^{1/2}] \quad \dots\dots(2.14)$$

และจากสมการที่ (2.12) เมื่อแทน $V_{DS} = V_{DSsat}$ จะได้ว่า

$$I_{DSsat} = (W/L)\mu_n C_{OX} \left\{ (V_{GS} - V_{FB} - 2\phi_F - \frac{V_{DSsat}}{2}) V_{DSsat} - \frac{2}{3} [(2\epsilon_S q N_A)/C_{OX}]^{1/2} [(V_{DSsat} + 2\phi_F)^{3/2} - (2\phi_F)^{3/2}] \right\} \quad \dots\dots(2.15)$$

ดังนั้นสมการสมบูรณ์ของกระแสเดรนของมอสเฟตในช่วงอิ่มตัว หาได้โดยการแทนค่า V_{DSsat} จากสมการที่ (2.14) ลงในสมการที่ (2.12)

2.3.3 การวิเคราะห์กระแสเดรนแบบง่าย ๆ

การหาสมการของกระแสเดรนจากหัวข้อที่ 2.3.1 และ 2.3.2 จะมีเทอมต่าง ๆ มากมาย ซึ่งทำให้ต้องใช้เวลามากในการวิเคราะห์ และต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ดังนั้นถ้าต้องการทราบค่ากระแสเดรนโดยประมาณสามารถทำได้ โดยการลดเทอมของสมการกระแสจะช่วยให้การคำนวณเป็นไปได้รวดเร็วขึ้น โดยการแทนค่า $Q_n(y) = -C_{OX} [V_{GS} - V_T - V(y)]$ ลงในสมการ (2.10) เมื่ออินทิเกรตแล้ว จะได้สมการกระแสในช่วงเชิงเส้น เป็น

$$I_{DS} = (W/L)\mu_n C_{OX} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad \dots\dots(2.16)$$

และเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส ในช่วงอิ่มตัวจะได้ว่า $V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$ และเมื่อแทนค่า $V_{DS} = V_{DSsat}$ ลงในสมการที่ (2.16) จะได้สมการของกระแสเดรนในช่วงอิ่มตัวเป็น

$$I_{DSsat} = (W/2L)\mu_n C_{OX} (V_{GS} - V_T)^2 \quad \dots\dots(2.17)$$

สำหรับการวิเคราะห์มอสเฟตกำลังในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้สมการที่ (2.16) และ (2.17) เป็นสมการหลักในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอสตลอดจนพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันด้วย

2.4 อินครีเมนตัลพารามิเตอร์

อินครีเมนตัลพารามิเตอร์ (incremental parameters) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กน้อย ๆ ของมอสเฟต ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากของมอสเฟตที่มีสัญญาณขนาดเล็ก (small signal MOSFET) สำหรับในกรณีของมอสเฟตกำลัง ถึงแม้ว่าจะไม่ค่อยได้ใช้กับงานในระดับสัญญาณขนาดเล็ก แต่พารามิเตอร์เหล่านี้ก็สามารถใช้ในการบ่งบอกคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟตกำลังได้เป็นอย่างดี พารามิเตอร์เหล่านี้ คือ

2.4.1 คอนดักแตนซ์ (conductance : g_{ds})

คอนดักแตนซ์ คือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสเดรนต่อแรงดันเดรน-ซอส นั่นคือ

$$g_{ds} = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS} = \text{const.}} \quad \dots\dots(2.18)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.16) คอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้นจะได้เป็น

$$g_{ds} = \frac{\mu_n C_{ox}}{L} (V_{GS} - V_T - V_{DS}) \quad \dots\dots(2.19)$$

2.4.2 ทรานคอนดักแตนซ์ (transconductance : g_m)

ทรานคอนดักแตนซ์ คือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสเดรนต่อแรงดันเกต-ซอส นั่นคือ

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{const.}} \quad \dots\dots(2.20)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.16) ทรานคอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้น (g_m) จะได้เป็น

$$g_m = \frac{\mu_n C_{ox}}{L} V_{DS} \quad \dots\dots(2.21)$$

และ จากสมการที่ (2.17) ทรานส์คอนดักแตนซ์ ในช่วงอิ่มตัว (g_{msat}) จะได้เป็น

$$g_{msat} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T) \quad \dots\dots(2.22)$$

2.4.3 ความต้านทานในภาว่นำกระแส (on state resistance: R_{on})

ความต้านทานในภาว่นำกระแส คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันครน-ช้อสต่อกระแสเดรน นั่นคือ

$$R_{on} = \left. \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_{DS}} \right|_{V_{GS} = \text{const.}} \quad \dots\dots(2.23)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.16) ความต้านทานในภาว่นำกระแส ในช่วงเชิงเส้นจะได้เป็น

$$R_{on} = \frac{1}{(W/L) \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T - V_{DS})} \quad \dots\dots(2.24)$$

2.5 แรงดันพังทลาย

แรงดันพังทลาย (Breakdown voltage : V_{BV}) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของมอสเฟตและมอสเฟตกำลัง ซึ่งเหมือนกับแรงดันพังทลายของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่ว ๆ ไป เป็นการแสดงถึงความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดในการประยุกต์ใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อเกิดแรงดันพังทลายขึ้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ จนไม่สามารถควบคุมได้และจะเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ได้ สำหรับแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่ว ๆ ไป แบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. แรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ (avalanche breakdown voltage) คือ แรงดันพังทลายที่เกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดนาคะในสารกึ่งตัวนำ เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้น ทำให้พาหะอิสระที่วิ่งผ่านบริเวณปลอดนาคะนี้มีพลังงานมากพอจนทำให้เกิดการชนกับอะตอมภายในบริเวณปลอดนาคะ และเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นทวีคูณ จนไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ ปรากฏการณ์การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้ เรียกว่า การเกิดไอออนกระทบ (impact ionization) โดยปกติแล้วแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์จะเกิดขึ้นในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูง ๆ
2. แรงดันพังทลายแบบซีเนอร์ (zener breakdown voltage) คือ แรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นในรอยต่อที่มีบริเวณปลอดนาคะแคบมาก ๆ เมื่อรอยต่อนี้ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากพอ (มีค่าประมาณ 10^6 V/cm) ทำให้พาหะอิสระได้รับพลัง

งานมากจนเกิดปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์ เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าย้อนกลับจำนวนมากผ่านรอยต่อ โดยปกติแล้วแรงดันพังทลายแบบซีเนอร์จะเกิดขึ้นในกรณีที่สารกึ่งตัวนำ ได้ถูกเติมอะตอมสารเจือมาก ๆ จนเกิดเป็นรอยต่อ $N^+ - P^+$ ทำให้ค่าแรงดันพังทลายที่ได้มีค่า $< 6 \text{ V}$

3. แรงดันพังทลายแบบพัชท์รู (punch-through breakdown voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดจากการขยายของบริเวณปลอดพาหะ เมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ จนกระทั่งทะลุถึงรอยต่ออีกด้านหนึ่ง (เสมือนว่าได้เกิดการลัดวงจรระหว่างรอยต่อชั้น) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับจำนวนมาก ไหลผ่านรอยต่อ ปกติแล้วแรงดันพังทลายชนิดนี้จะถูกกำหนดด้วยระยะความลึกของรอยต่อ

4. แรงดันพังทลายของไดอิเล็กตริก (dielectric breakdown voltage) คือแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณชั้นสารไดอิเล็กตริกมีค่าสูงเกินกว่าที่ชั้นไดอิเล็กตริกจะทนได้ เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าจำนวนมาก ไหลผ่านชั้นสารไดอิเล็กตริกได้และทำให้สูญเสียคุณสมบัติในการเป็นไดอิเล็กตริกไป

การศึกษาผลของแรงดันพังทลายของมอสเฟตกำลัง ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกศึกษาเฉพาะแรงดันพังทลาย แบบอะวาลานซ์เท่านั้น เพราะว่าสามารถสร้างให้มอสเฟตกำลังมีความสามารถทนแรงดันได้สูงขึ้น สำหรับแรงดันพังทลายแบบซีเนอร์ แรงดันพังทลายแบบพัชท์รู และแรงดันพังทลายของไดอิเล็กตริก ไม่ได้ทำการศึกษาเนื่องจากไม่ได้ช่วยให้อุปกรณ์ทนแรงดันได้สูงขึ้น

2.5.1 แรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์

แรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ ได้ถูกนิยามภายใต้เงื่อนไขการเกิด ไอออนกระทบที่มีค่าเป็นอนันต์ เพราะว่า การเกิด ไอออนกระทบเป็นผลให้เกิดการแตกตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งจะแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ ไอออนกระทบ (impact ionization coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์ ไอออนกระทบของโฮล (α_p) ได้นิยามว่า เป็นจำนวนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดการแตกตัวเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโฮลเป็นระยะ 1 cm ผ่านบริเวณปลอดพาหะ ไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์ ไอออนกระทบของอิเล็กตรอน (α_n) ได้นิยามว่า เป็นจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดจากการแตกตัวเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นระยะ 1 cm ผ่านบริเวณปลอดพาหะ ไปในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า จากการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ ไอออนกระทบของซิลิกอน[5] จะได้

$$\alpha_n = a_n e^{-b_n/E} \quad \dots\dots(2.25)$$

$$\alpha_p = a_p e^{-b_p/E} \quad \dots\dots(2.26)$$

เมื่อ $a_n = 7 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $b_n = 1.23 \times 10^6 \text{ V/cm}$ สำหรับอิเล็กตรอน และ $a_p = 1.6 \times 10^5$ ค่าไม่แน่นอนใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cm^{-1} , $b_p = 2 \times 10^6 \text{ V/cm}$ สำหรับโฮล จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) พบว่าสัมประสิทธิ์ไอออนกระทบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นและเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณเราสามารถประมาณค่าของสัมประสิทธิ์ไอออนกระทบ ได้เป็น

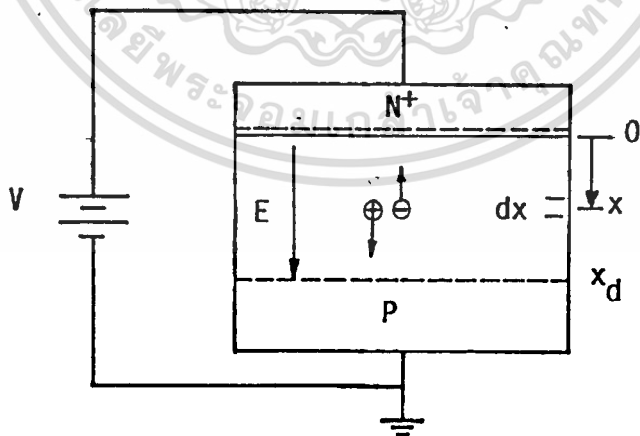
$$\alpha = 1.8 \times 10^{-35} E^7 \quad \dots\dots(2.27)$$

เมื่อพิจารณารอยต่อ $N^+ - P$ ที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เนื่องจากความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนของ N^+ สูงกว่าส่วนพี ดังนั้นบริเวณปลดพาหะส่วนมากจะขยายไปยังส่วนพี สำหรับการวิเคราะห์แรงดันพังทลาย แบบอะวาลานซ์ จะได้คู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดการแตกตัวที่ระยะ x จากรอยต่อ เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า E โฮลจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังส่วน N^+ ดังนั้นที่ระยะ dx โฮล และอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดการแตกตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลเป็น $\alpha_n dx$ และ $\alpha_p dx$ ตามลำดับ อิเล็กตรอน-โฮลที่แตกตัวทั้งหมดจากคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพียง 1 คู่ในบริเวณปลดพาหะที่ระยะ x จากรอยต่อ จะได้เป็น

$$M(x) = \frac{\exp[\int_0^x (\alpha_n - \alpha_p) dx]}{1 - \int_0^{x_d} \alpha_p \exp[\int_0^x (\alpha_n - \alpha_p) dx] dx} \quad \dots\dots(2.28)$$

จากสมการที่ (2.28) เมื่อต้องการหาค่าแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ ซึ่งเกิดจากจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลทั้งหมด ($M(x)$) ที่มีค่าเข้าสู่หนึ่งต์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\int_0^{x_d} \alpha_p \exp[\int_0^x (\alpha_n - \alpha_p) dx] dx = 1 \quad \dots\dots(2.29)$$



รูปที่ 2.6 บริเวณปลดพาหะของรอยต่อ $N^+ - P$ เมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ

สมการที่ (2.29) จะเรียกว่า อีออไนเซชันอินทิกรัล (ionization integral) และถ้าแทนค่าประมาณของสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันจากสมการที่ (2.27) จะหาอีออไนเซชันอินทิกรัลอย่างง่าย ๆ ได้จาก

$$\int_0^{x_d} \alpha dx = 1 \quad \dots\dots(2.30)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการอีออไนเซชันด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical technique) จะได้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันขั้วกลางแบบอะวาลานซ์ ซึ่งจะนำไปหาค่าแรงดันขั้วกลางแบบอะวาลานซ์ของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้นในหัวข้อถัดไป

2.5.2 รอยต่อลาดแบบเชิงเส้น

ในหัวข้อที่ 2.1 ได้กล่าวถึงรอยต่อระหว่างส่วน P-base กับ N-drift เป็นส่วนกำหนดการเกิดแรงดันขั้วกลาง ซึ่งในทางปฏิบัติรอยต่อนี้จะได้จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนและความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base ไม่สูงมากจนเกิดเป็นส่วน P⁺ ดังนั้นรอยต่อที่ได้นี้จะเป็นรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น (linearly graded junction) . ซึ่งจะมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงลดลงประมาณได้ว่าเป็นเชิงเส้นจากสารกึ่งตัวนำด้าน P-base จนกระทั่งผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำด้าน N-drift ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากสมการของนิวตันของสำหรับกรณีของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น สามารถแก้สมการของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าได้เป็น

$$E(x) = \frac{qa}{2\epsilon_s}(x_d^2 - x^2) \quad \dots\dots(2.31)$$

$$V(x) = \frac{qa}{\epsilon_s}\left(\frac{x^3}{6} - \frac{x_d^2x}{2} - \frac{x_d^3}{3}\right) \quad \dots\dots(2.32)$$

เมื่อ $a =$ สัมประสิทธิ์เชิงลาดของสารเจือ (impurity gradient) (cm^{-4}) [11]

และ

$$a = \frac{x_j N_{BG}}{2Dt}$$

จากสมการที่ (2.32) เมื่อให้แรงดันไบอัสที่ตำแหน่ง $x = x_d$ คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ V_a ดังนั้นบริเวณปลอดพาหะจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_a เป็น

$$x_d = \left(\frac{3\epsilon_s V_a}{qa}\right)^{1/3} \quad \dots\dots(2.33)$$

แรงดันขั้วกลางแบบอะวาลานซ์ของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น จะหาได้จากการแทนสมการที่ (2.27) และสมการที่ (2.31) ลงในสมการที่ (2.30) จะได้เป็น

$$\int_{-x_d}^{x_d} 1.85 \times 10^{-35} \left[\frac{qa}{2\epsilon_s}(x_d^2 - x^2)\right]^7 dx = 1 \quad \dots\dots(2.34)$$

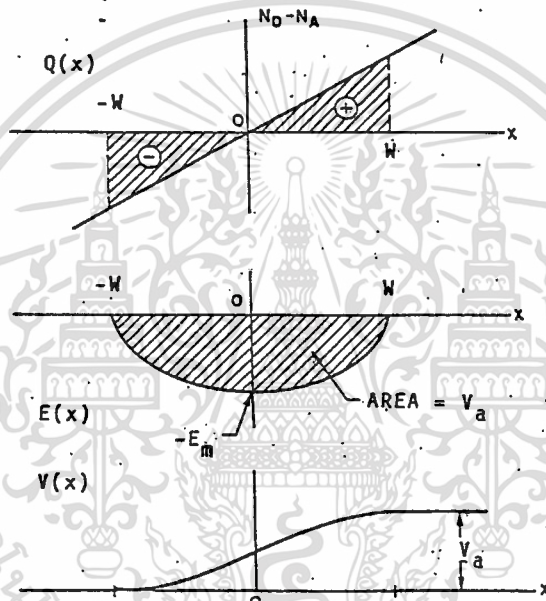
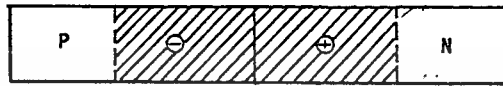
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการนี้ บริเวณปลอดพาหะในแต่ละด้านของรอยต่อสามารถหาได้เป็น

$$x_d = 9.1 \times 10^5 a^{-7/15} \quad \dots\dots (2.35)$$

และแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น จะได้จากการรวมสมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.35) เข้าด้วยกัน คือ

$$V_{BV} = 9.2 \times 10^9 a^{-2/5} \quad \dots\dots (2.36)$$

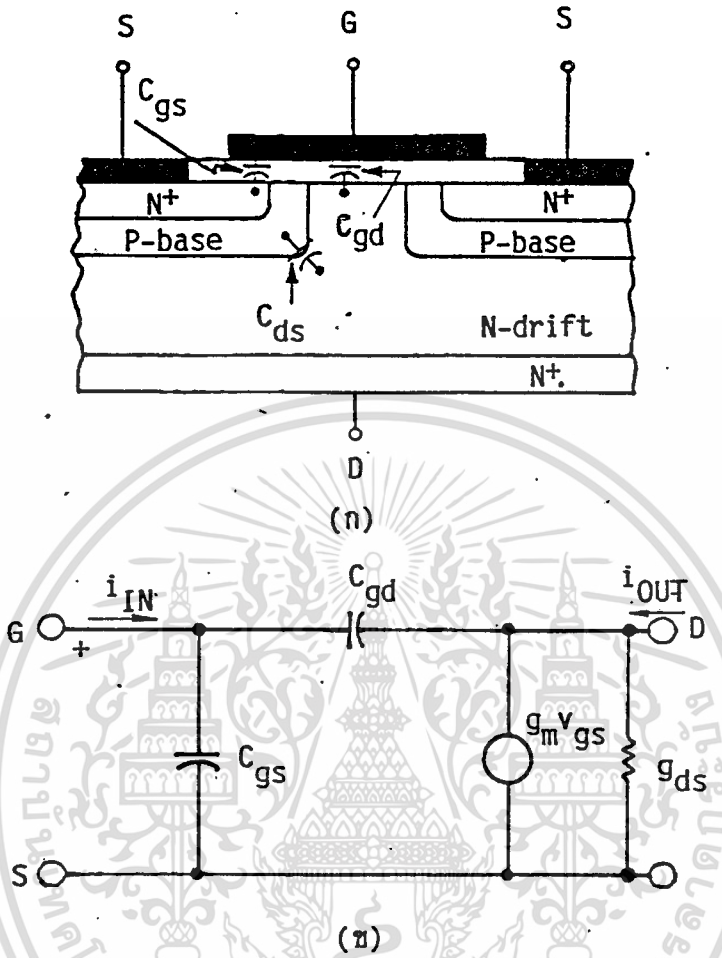


รูปที่ 2.7 การกระจายของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อลาด แบบเชิงเส้น

2.6 การตอบสนองความถี่

การตอบสนองความถี่ (frequency response) เป็นการหาค่าความถี่สูงสุดหรือความถี่คัท-ออฟ (cut-off frequency : f_T) ของมอสเฟต พบว่าความถี่คัท-ออฟจะขึ้นกับ ประการแรก คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของพาหะไปตามช่องทางเดินกระแส ประการที่สอง คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแส และประการสุดท้าย คือ ความจุไฟฟ้าที่แฝงอยู่ในโครงสร้างของมอสเฟต ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาจากโครงสร้างของดีมอส เนื่องจากส่วนของซอสจะเชื่อมต่อกับส่วนของ P-base (ในกรณีของมอสเฟต คือส่วนฐานรอง) ดังนั้นจึงพิจารณาความจุไฟฟ้าได้เป็น C_{gs} , C_{gd} และ C_{ds} ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 (ก) แบบจำลองความจุไฟฟ้าในโครงสร้างติมอส
 (ข) วงจรสมมูลของติมอสที่นำมาใช้ในการพิจารณาความถี่คัท-ออฟ

แสดงในรูปที่ 2.8 (ก) ส่วนในรูปที่ 2.8 (ข) เป็นวงจรสมมูลของติมอสที่นำมาใช้ในการพิจารณาหาความถี่คัท-ออฟ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.8 (ข) เราสามารถประมาณความถี่คัท-ออฟของติมอสได้ เมื่อความถี่คัท-ออฟ คือ ความถี่ที่ได้จากอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุตต่อกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 นั่นคือมอสเฟตจะไม่มีกรขยายสัญญาณไฟฟ้า เมื่อเอาต์พุตถูกลัดวงจร (short circuited) จากการทดสอบจะได้กระแสไฟฟ้าด้านอินพุต เมื่อเอาต์พุตของอุปกรณ์ถูกลัดวงจร [9], [12] เป็น

$$i_{IN} = \omega_T C_{IN} V_{GS} \dots\dots\dots(2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เมื่อ C_{IN} คือ ความจุไฟฟ้าด้านอินพุต $= C_{gs} + C_{gd} \approx C_{ox}WL$ (F) ไม่มีการเผยแพร่ทางอื่น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังและข้ออ้างอิงของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุต มีค่าเป็น

$$i_{OUT} = g_m V_{GS} \quad \dots\dots(2.38)$$

สมการที่ (2.38) หาด้วยสมการที่-(2.37) และจัดรูปสมการใหม่ เมื่อ $i_{OUT} / i_{IN} = 1$ จะได้เป็น

$$\omega_T = g_m / C_{IN} \quad \dots\dots(2.39)$$

เมื่อ ω_T คือ อัตราขยายเชิงมุม (angular gain) (s^{-1}) = $2\pi f_T$

g_m คือ ทรานส์คอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้น = $(W/L)\mu C_{ox} V_{DS}$

ดังนั้น ความถี่ตัด-ออกจะได้เป็น

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_{IN}} = \frac{\mu_n V_{DS}}{2\pi L^2} \quad \dots\dots(2.40)$$

แต่ในด้านเชิงพาณิชย์จะกำหนดค่าความจุไฟฟ้าในเทอมของ C_{iss} , C_{oss} และ C_{rss}

เมื่อ C_{iss} คือ ความจุไฟฟ้าด้านอินพุต (Common Source Input Capacitance) = C_{IN}

$$= C_{gd} + C_{gs}$$

C_{oss} คือ ความจุไฟฟ้าด้านเอาต์พุต (Common Source Output Capacitance)

$$= C_{gd} + C_{ds}$$

C_{rss} คือ ความจุไฟฟ้าย้อนกลับ (Reverse Transfer Capacitance)

$$= C_{gd}$$

บทที่ 3

การออกแบบมอสเฟตกำลัง

การออกแบบที่ดีจะช่วยให้มอสเฟตกำลังที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตให้ต่ำลง นอกจากนี้การออกแบบที่ดี ซึ่งต้องทำการศึกษาจากทฤษฎีของมอสเฟตกำลังให้เข้าใจอย่างละเอียดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการสร้างด้วย ดังนั้นการออกแบบมอสเฟตกำลัง เพื่อให้สัมพันธ์กับเทคโนโลยีที่มีอยู่จึงเป็นสิ่งสำคัญมาก ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบมอสเฟตกำลังที่เหมาะสมกับกระบวนการสร้างจากเทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน

3.1 การเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น

จุดเริ่มต้นของกระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังจะเริ่มจากการเลือกแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่จะใช้สร้างให้เหมาะสม ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้สร้างในปัจจุบันนี้ คือ ซิลิกอนและแกเลเลียมอะเซไนด์ (gallium arsenide) ถึงแม้ว่าแกเลเลียมอะเซไนด์จะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะใช้สร้างมอสเฟตกำลังมากกว่าซิลิกอน [6] แต่เนื่องจากราคาของแกเลเลียมอะเซไนด์ที่มีค่าสูงกว่าซิลิกอนหลายสิบเท่า ดังนั้นจึงมีมอสเฟตกำลังที่มีคุณสมบัติพิเศษบางประเภทเท่านั้นที่สร้างจากแกเลเลียมอะเซไนด์ เช่น ต้องการให้มีการตอบสนองความถี่สูงมาก ๆ และมีผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิมีค่าต่ำ ๆ เป็นต้น นอกจากนี้มอสเฟตกำลังที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปยังคงสร้างจากซิลิกอนเป็นหลัก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างมอสเฟตกำลังบนแผ่นผลึกซิลิกอนเท่านั้น ซึ่งแผ่นผลึกซิลิกอนนี้ได้มาจากกระบวนการไซโครลสกี (Czochralski) หรือวิธีฟลอตโซน (float zone) แล้วจึงนำมาตัดเป็นแผ่นบาง ๆ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นผลึกประมาณ 50-200 mm หลังจากนั้นจึงนำไปขัดผิวให้ผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนมีความสมบูรณ์พร้อมที่จะใช้สร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

สำหรับการเลือกแผ่นผลึกซิลิกอน เริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับสร้างมอสเฟตกำลัง จะต้องพิจารณา ดังต่อไปนี้ คือ

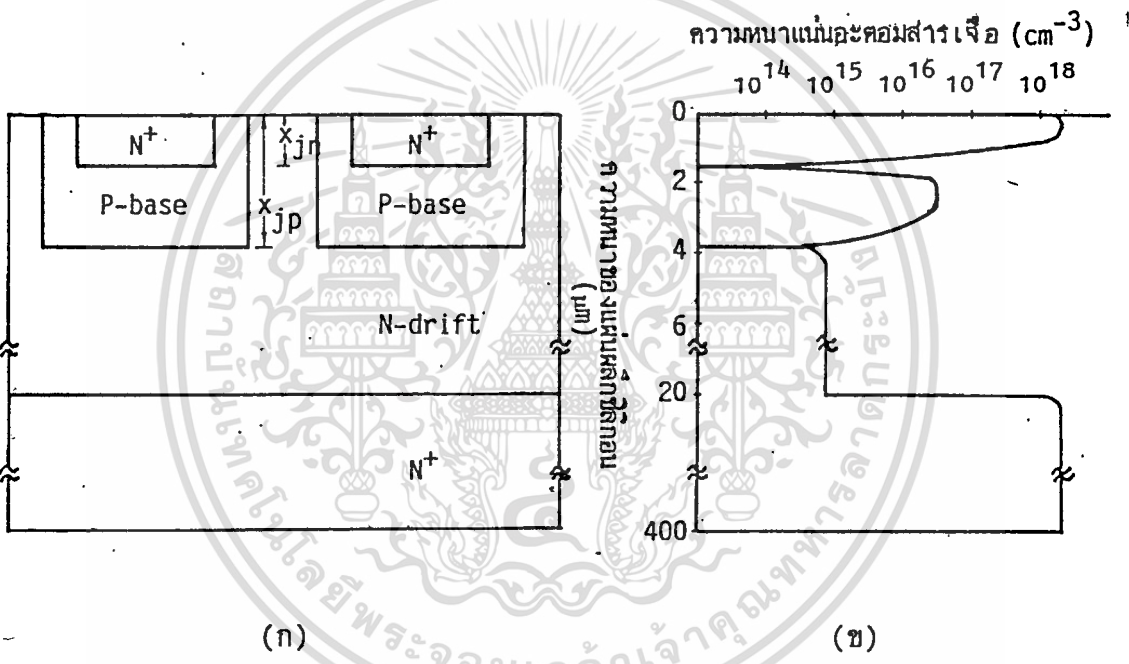
1. มีความคล่องตัวของพาหะสูง เพื่อนำกระแสไฟฟ้าได้สูง ๆ
2. มีความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 กับ Si มีค่าต่ำ
3. มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองต่ำ ๆ เพื่อให้ทนแรงดันพังทลายได้สูง ๆ
4. ความต้านทานรวมมีค่าต่ำ เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์

ดังนั้นจึงได้เลือกแผ่นผลึกซิลิกอนแบบอินเทกเซียล ระบาย (100) เนื่องจากแผ่นผลึกระบาย (100) มีความคล่องตัวของพาหะที่ผิวสูงกว่า และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 กับ Si มีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูงกว่าโฮล ทำให้มอสเฟตกำลังที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างเป็นชนิดเอ็น-แชนแนลจะนำกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าพี-แชนแนล ส่วนที่เลือกเป็นแบบอินเทก เซียล เพื่อให้ได้การทนแรงดันสูงตามที่กำหนดไว้ ในขณะที่ความต้านทานมีค่าต่ำ

3.2 การออกแบบโครงสร้างในแนวดิ่ง

$N^+ - P - N - N^+$ เป็นโครงสร้างในแนวดิ่งของมอสเฟตกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งปกติจะได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ โดยเริ่มต้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนแบบอินเทก เซียล $N/N^+ (N - N^+)$ จากนั้นจึงแพร่อะตอมสารเจือ โดยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ซึ่งจะทำการแพร่สารเจือในส่วน P-base ก่อน แล้วจึงแพร่สารเจือส่วน N^+ -source จะได้เป็นโครงสร้างในแนวดิ่งแบบ $N^+ - P - N - N^+$



รูปที่ 3.1 (ก) โครงสร้างในแนวดิ่ง $N^+ - P - N - N^+$ ของดีมอส (ข) การกระจายของสารเจือส่วนต่าง ๆ ของดีมอส

3.2.1 การแพร่สารเจือ[13]

การแพร่สารเจือ โดยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน เป็นการควบคุมปริมาณอะตอมสารเจือและลักษณะการกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่เติมให้แก่แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิสูง เป็นผลให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น การแพร่สารเจือมี 2 ขั้นตอนที่กระทำต่อเนื่องกัน คือ predeposition และการขับเคลื่อน (drive in)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.1 Predeposition

predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้น เพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือที่จะเข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ ภายในเตาแพร่อะตอมสารเจืออุณหภูมิสูง ความสม่ำเสมอ และการกระจายของอะตอมสารเจือ (dopant) จะพิจารณาได้จากสมการ

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{D_1 t_1}) - \dots\dots\dots(3.1)$$

เมื่อ N_0 คือ ค่า Solid solubility ของสารเจือ (cm^{-3})

erfc คือ ค่า error function complementary

x คือ ระยะทางจากผิวหน้าลึกลงไปในแผ่นผลึก (cm)

D_1 คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ในการ predeposition (cm^2/s)

t_1 คือ เวลาในการ predeposition (s)

ค่า N_0 , D_1 และ erfc หาได้จากกราฟในรูปที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ และจำนวนความหนาแน่นอะตอมทั้งหมด (Q) จาก predeposition จะมีค่าเป็น

$$Q = \int_0^\infty N(x,t) dx = \frac{2 \cdot N_0 \cdot \sqrt{D_1 t_1}}{\sqrt{\pi}} \dots\dots\dots(3.2)$$

ส่วนความลึกของรอยต่อที่ได้หลังจาก predeposition จะหาได้โดยให้เงื่อนไขขอบเขตของ

$N(x,t) = N_{BG}$ ดังนั้นจะได้

$$x_j = \sqrt{4D_1 t_1} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{N_{BG}}{N_0} \right] \dots\dots\dots(3.3)$$

3.2.1.2 การขับลึก

การขับลึกเป็นขั้นตอนที่ทำต่อเนื่องจาก predeposition ทั้งนี้ เพื่อกำหนดความลึกของรอยต่อ และลักษณะการกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่จะเข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการกระจายแบบ Gaussian ผลจากการขับลึกนี้จะทำให้ความหนาแน่นอะตอมสารเจือหาได้จากสมการ

$$N(x,t) = \frac{Q \cdot \exp(-x^2)}{\sqrt{\pi D_2 t_2} \cdot 4D_2 t_2} \dots\dots\dots(3.4)$$

เมื่อ Q คือ จำนวนความหนาแน่นอะตอมทั้งหมด (cm^{-2}) ได้จากสมการที่ (3.2)

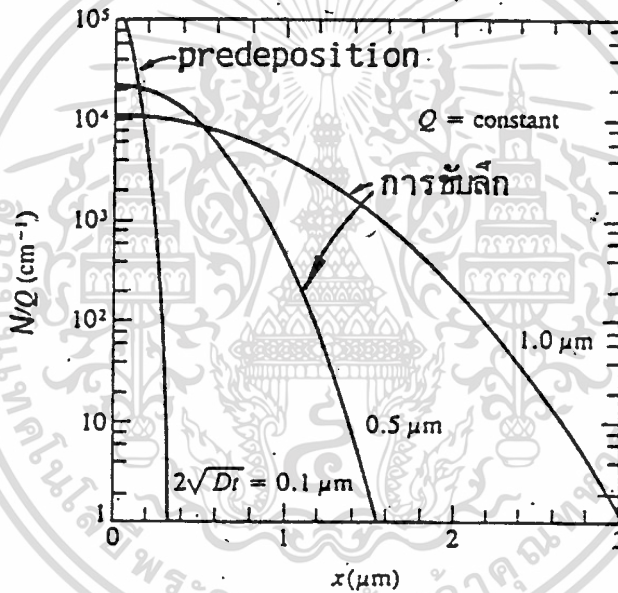
D_2 คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในการขับลึก (cm^2/s)

t_2 คือ เวลาในการขับลึก (s)

ส่วนความลึกของรอยต่อภายหลังจากการขับลิค โดยให้เงื่อนไขขอบเขตที่ $N(x,t) = N_{BG}$ จะได้เป็น

$$x_j^2 = 4D_2t_2 \cdot \ln\left(\frac{Q}{N_{BG} \cdot \sqrt{x D_2 t_2}}\right) \quad \dots\dots(3.5)$$

กราฟในรูปที่ 3.2 เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ได้จาก predeposition และการขับลิค



รูปที่ 3.2 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ได้จาก predeposition และการขับลิค

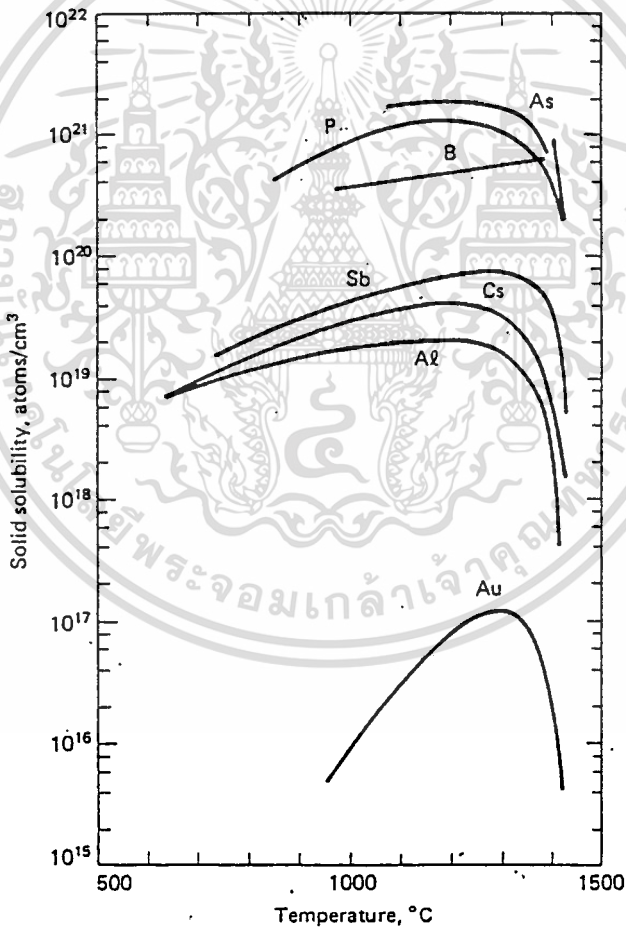
3.2.2 การแพร่สารเจือส่วน P-base

พิจารณาจากรูปที่ 3.1 ส่วนของ P-base จะต้องถูกแพร่อะตอมสารเจือก่อนส่วน N^+ -source และความลึกของรอยต่อ (x_{jP}) ส่วน P-base จะลึกมากกว่าส่วน N^+ -source นอกจากนี้บริเวณผิวของส่วน P-base ยังถูกกำหนดให้เป็นส่วนของช่องทางเดินกระแส ดังนั้นการแพร่อะตอมสารเจือในส่วน P-base จึงมีความสำคัญมากในการกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟตกำลัง

จากในรูปที่ 3.1 จะแพร่อะตอมสารเจือให้ลึกถึง 3.8 μm และมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ผิวประมาณ $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ เพื่อทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มอยู่ในช่วง 2-3 V ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไปในเรื่องการออกแบบแรงดันขีดเริ่ม

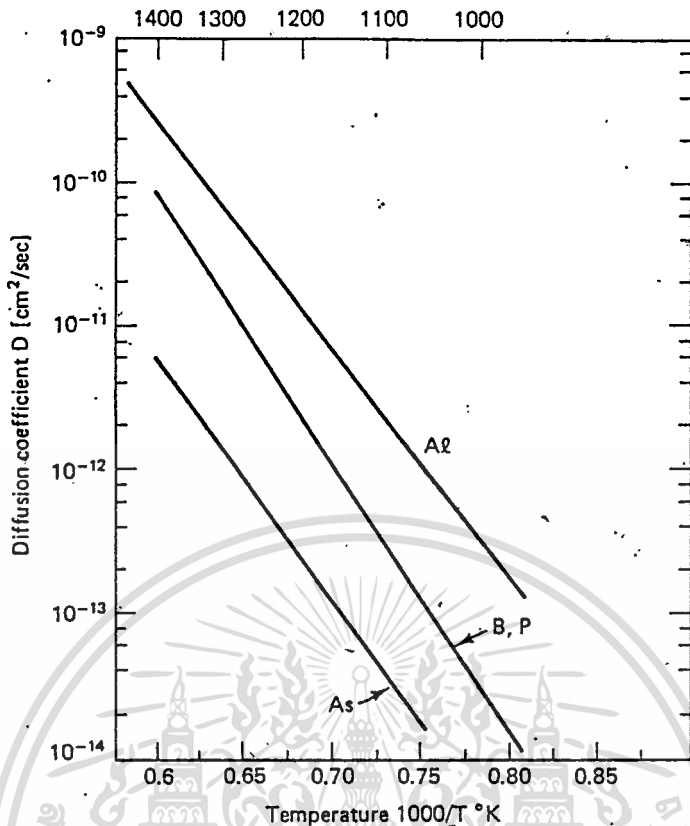
3.2.3 การแพร่สารเจือส่วน N^+ -source

เนื่องจากส่วน N^+ -source จะใช้เป็นแหล่งจ่ายประจุพาหะ (อิเล็กตรอน) ดังนั้นอะตอมสารเจือในส่วนนี้จึงต้องแพร่ให้มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือปริมาณสูง ๆ นอกจากนี้ยังทำให้ความต้านภายในส่วน N^+ -source มีค่าต่ำลง สำหรับปริมาณอะตอมสารเจือที่แพร่ในส่วนนี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1 จะมีค่ามากกว่า $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ($\rho_{\text{sc}} < 50 \Omega/\square$) และมีความลึกของรอยต่อ (x_{jn}) ประมาณ 1.5 μm

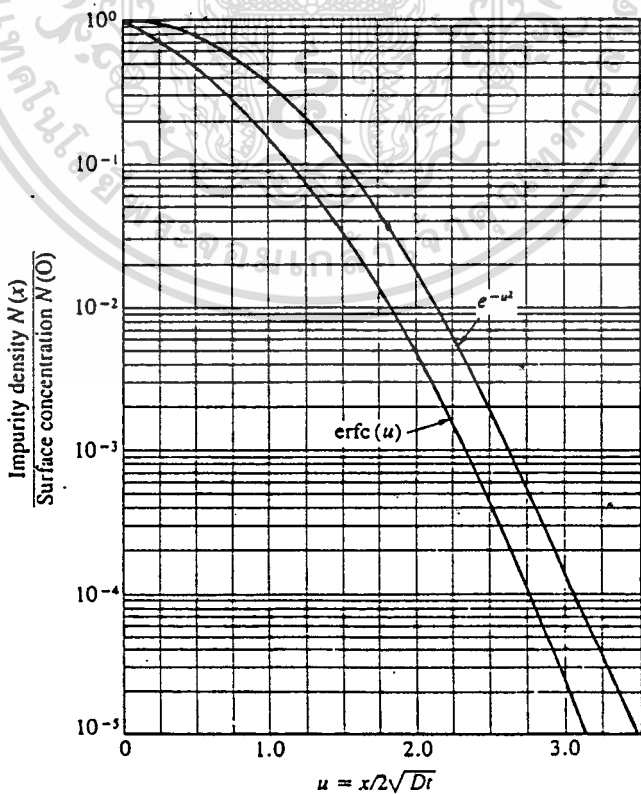


รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง solid solubility ของสารเจือต่าง ๆ ในซิลิกอน กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 กราฟนอร์มอลไลซ์ เพื่อหาการกระจายของสารเจือทั้งแบบ erfc และ Gaussian

3.3 การออกแบบแรงดันขีดเริ่ม

แรงดันขีดเริ่ม เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งซึ่งช่วยให้มอสเฟตกำลังมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ในกรณีของมอสเฟตกำลัง ชนิดเอ็น-แชนแนล ถ้าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเป็นลบ แสดงว่าอุปกรณ์ทำงานเป็นดีพลีชันโหมดหรือถ้าแรงดันขีดเริ่มต่ำเกินไป เมื่อสัญญาณรบกวนเข้ามาจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์มีความผิดพลาดได้ง่าย แต่ถ้าแรงดันขีดเริ่มสูงเกินไปจะทำให้ต้องใช้แรงดันอินพุตที่ส่วนเกินมีค่าสูง ๆ อุปกรณ์จึงจะทำงานได้ ซึ่งทำให้การสร้างวงจรทางด้านอินพุตของส่วนเกินมีความยุ่งยากมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตกำลังจะอยู่ในช่วง 2-4 V[14]

เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีแรงดันขีดเริ่มที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 (สมการที่ 2.6) ในการกำหนดแรงดันขีดเริ่ม จะทำการควบคุมได้ 3 วิธี คือ

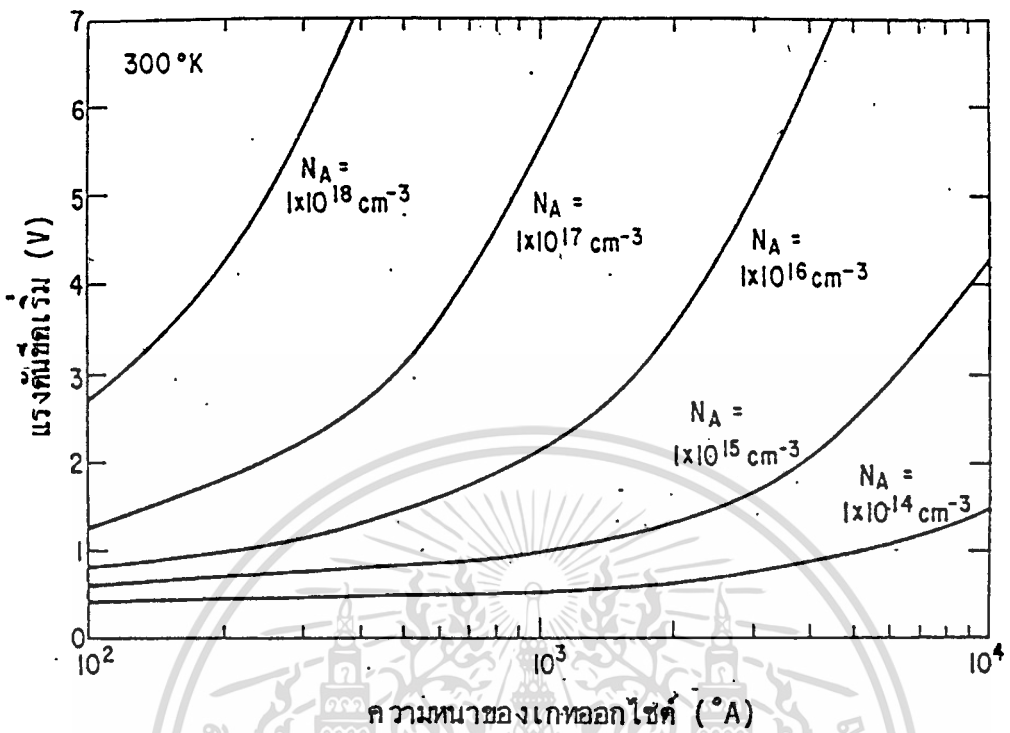
1. การเปลี่ยนแปลงความหนาของเกตออกไซด์ (t_{ox}) แรงดันขีดเริ่มจะแปรโดยตรงกับความหนาของเกตออกไซด์ แต่ถ้าเกตออกไซด์มีขนาดบาง ๆ จะทำให้การทรมแรงดันของเกตออกไซด์ลดลงด้วย โดยทั่วไปค่าที่เหมาะสมของเกตออกไซด์ของมอสเฟตกำลังจะมีค่าประมาณ 1000 \AA

2. การเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันงาน (ϕ_{ms}) ระหว่างโลหะกับซิลิกอนด้วยการสร้างชั้นไดอิเล็กทริกชนิดอื่น ๆ เช่น การสร้างชั้นโพลีซิลิกอนบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บาง ๆ ที่ส่วนเกิน จะมีผลทำให้แรงดันขีดเริ่มลดลง แต่ในกระบวนการสร้างนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Chemical Vapor Deposition (CVD) ซึ่งในห้องปฏิบัติการนี้ไม่มีอุปกรณ์ชนิดนี้

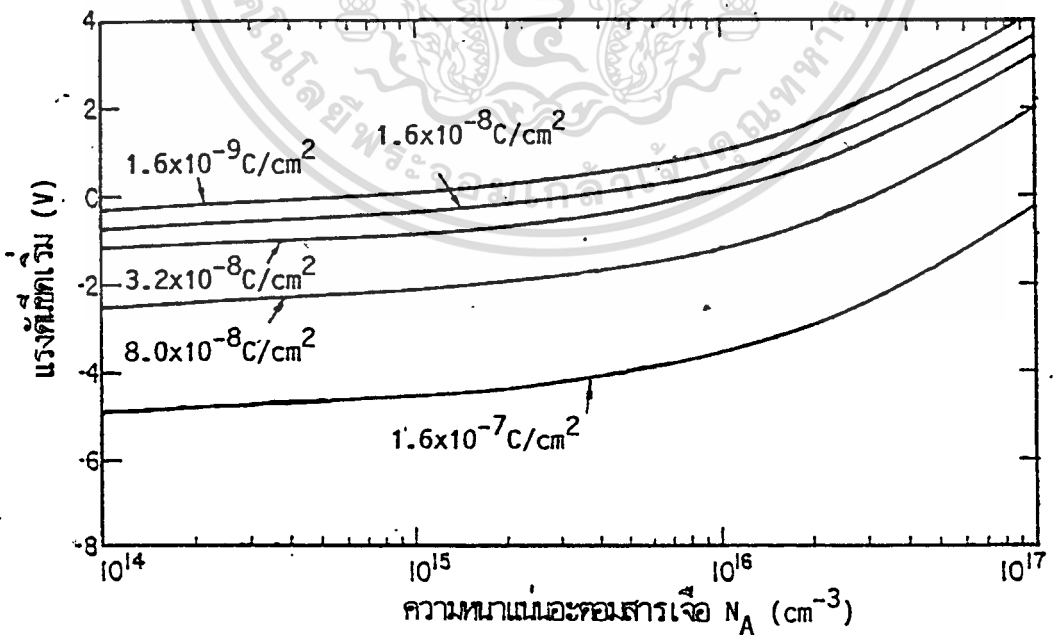
3. การควบคุมความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base (N_A) ซึ่งแรงดันขีดเริ่มจะแปรโดยตรงกับรากที่สองของความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ดังนั้นการควบคุมความหนาแน่นอะตอมสารเจือให้เหมาะสม จะสามารถควบคุมแรงดันขีดเริ่มได้ตามต้องการ

ดังนั้นการออกแบบแรงดันขีดเริ่มในห้องปฏิบัติการนี้จึงทำได้ 2 วิธี คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของเกตออกไซด์และการควบคุมความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base และเพื่อให้ง่ายในการออกแบบ จึงนำเอาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ (2.6) มาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความหนาของเกตออกไซด์ในช่วง $100-10,000 \text{ \AA}$ และความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base ในช่วง $1 \times 10^{14}-1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และไม่พิจารณาผลของความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 กับ Si (Q_{ss}) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 ส่วนในรูปที่ 3.7 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 ในช่วง $1.6 \times 10^{-7}-1.6 \times 10^{-9} \text{ C/cm}^{-2}$ และความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base ในช่วง $1 \times 10^{14}-1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ส่วนเกตออกไซด์หนา 1000 \AA

ดังนั้นถ้าเราต้องการออกแบบแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตกำลังเท่ากับ 2.5-3 V โดยมีเกตออกไซด์หนา 1000 \AA และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 กับ Si เท่ากับ $1.4 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^{-2}$ จะต้องแพร่อะตอมสารเจือส่วน P-base ในช่วง $5.0-7.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 3.6 แรงดันขั้วเริ่มของมอสเฟตกำลังในอุดมคติ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความหนาของเกตออกไซด์ และความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base



รูปที่ 3.7 แรงดันขั้วเริ่มเป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base สำหรับเกต

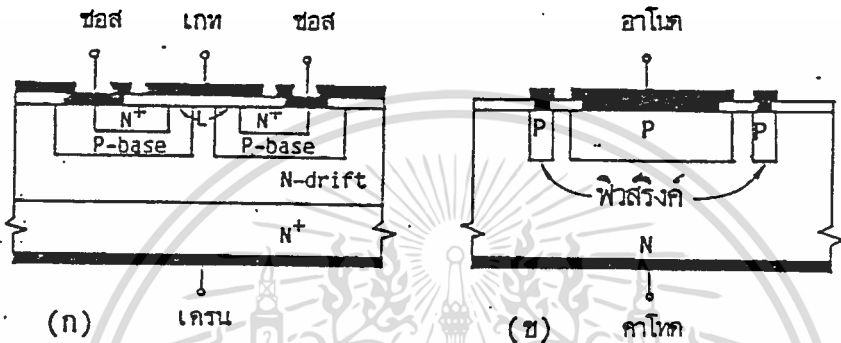
ออกไซด์หนา 1000 Å และแสดงผลกระทบของประจุไฟฟ้าที่ผิว SiO_2 กับ Si ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

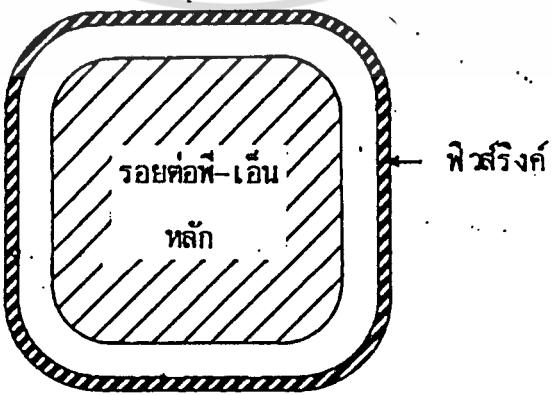
3.4 การออกแบบแรงดันพังทลาย

จากทฤษฎีของแรงดันพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.5 ได้กล่าวถึงแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของดีมอสกับโครงสร้างของไดโอด ที่แสดงในรูปที่ 3.8 แรงดันพังทลายที่เกิดขึ้นกับดีมอสจะเกิดขึ้นที่รอยต่อ P-base กับ N-drift ดังในรูปที่ 3.8 (ก) จะเทียบได้กับที่รอยต่อพี-เอ็นของไดโอด ในรูปที่ 3.8 (ข) ดังนั้นเพื่อให้สะดวกและรวดเร็วในการศึกษาแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ของดีมอส จึงได้ทำการศึกษากจากโครงสร้างของ ไดโอดก่อนแล้วจึงนำผลที่ได้ไปออกแบบร่วมกับดีมอสต่อไป



รูปที่ 3.8 (ก) โครงสร้างของดีมอสจะเกิดแรงดันพังทลายที่รอยต่อ P-base กับ N-drift
 (ข) โครงสร้างของ ไดโอดจะเกิดแรงดันพังทลายที่รอยต่อพี-เอ็น

แต่ในทางปฏิบัติแล้วแรงดันพังทลายที่ได้จะมีค่าประมาณ 50-60 % ของทฤษฎี เนื่องจากผลกระทบของความโค้งบริเวณปลายด้านข้างของรอยต่อ ซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้ามากกว่าบริเวณอื่น ๆ การศึกษาผลกระทบนี้เป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพื่อให้แรงดันพังทลายมีค่าสูงขึ้น สำหรับการแก้ไขปัญหานี้มีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการสร้างฟิวส์ริงค์ (field ring) และฟิวส์เพลต (field plate) ดังจะ ได้กล่าวต่อไป

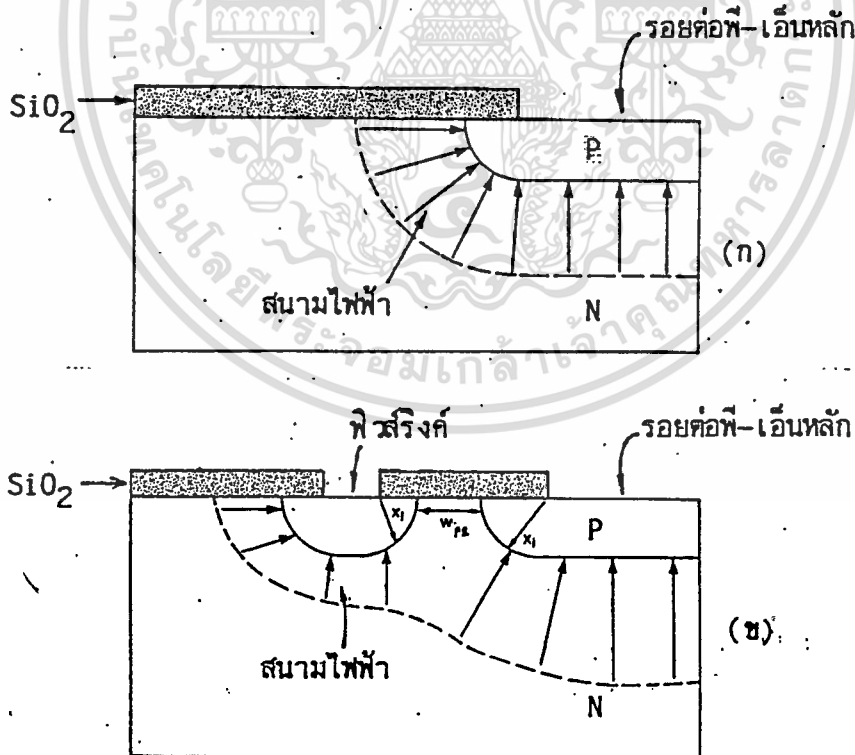


รูปที่ 3.9 ฟิวส์ริงค์ที่สร้างขึ้นล้อมรอบรอยต่อพี-เอ็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 พิวส์ริงค์

การสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลังสูงที่ใช้กระบวนการสร้างในแนวระนาบ (planar process) จะพบกับปัญหาในเรื่องแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์มีค่าต่ำ เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าที่ขอบด้านข้างของรอยต่อมีค่าสูงมาก แต่สามารถที่จะแก้ไขได้ด้วยการสร้างพิวส์ริงค์ (field ring) [9],[15] ลักษณะของพิวส์ริงค์ที่สร้างขึ้นจะสร้างล้อมรอบรอยต่อพี-เอ็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งปกติจะสร้างขึ้นพร้อมกับรอยต่อหลัก สำหรับรูปที่ 3.10 (ก) แสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้าที่ขอบของรอยต่อมีค่าสูงและสามารถลดค่าสนามไฟฟ้าที่สูงนี้ได้ด้วยการสร้างพิวส์ริงค์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.10 (ข) เมื่อรอยต่อพี-เอ็นหลักได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับน้อย ๆ ทำให้เกิดบริเวณปลอดภัยแคบ ๆ ขยายไปไม่ถึงส่วนพิวส์ริงค์ ดังนั้นพิวส์ริงค์จึงไม่มีผลกับรอยต่อพี-เอ็นหลัก แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมากขึ้น บริเวณปลอดภัยจะขยายมากขึ้นจนถึงส่วนพิวส์ริงค์และเกิดปรากฏการณ์ตันซ์ทรูระหว่างพิวส์ริงค์กับรอยต่อหลัก ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดเบือนของสนามไฟฟ้าที่ขอบและสนามไฟฟ้านี้จะมีค่าลดลง ดังนั้นแรงดันพังทลายที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น สำหรับการออกแบบพิวส์ริงค์ที่ดีจะต้องออกแบบให้ระยะห่างของพิวส์ริงค์ (W_{FR}) ที่เหมาะสมจะทำให้ได้แรงดันพังทลายมีค่าสูงสุด ซึ่งถ้าออกแบบให้ W_{FR} มีค่ามากจะทำให้เกิดแรงดันพังทลายก่อนที่บริเวณปลอดภัยขยายถึงพิวส์ริงค์ แต่ถ้าออกแบบให้ W_{FR} มีค่าน้อยจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่พิวส์ริงค์ใกล้เคียงกับรอยต่อหลัก ดังนั้นแรงดันพังทลายที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าเดิม



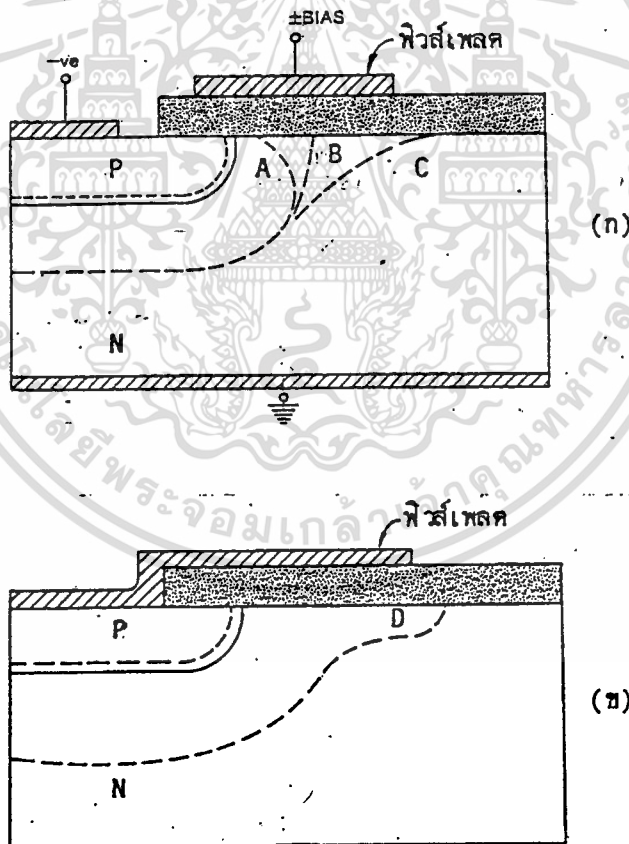
รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของรอยต่อในแนวระนาบ เมื่อ

(ก) ไม่มีพิวส์ริงค์ (ข) มีพิวส์ริงค์

3.4.2 ฟิวส์เพลต

ฟิวส์เพลต (field plate) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดผลของสนามไฟฟ้าที่ขอบด้านข้างของรอยต่อ ที่เกิดจากผลของความโค้งบริเวณปลดพาหะ โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ผิว ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าบนแผ่นโลหะด้านบนจะทำให้รูปร่างของบริเวณปลดพาหะเปลี่ยนแปลงไป คือ ถ้าแรงดันบวกไบอัสให้แก่วิวส์เพลตเทียบกับฐานรองชนิดเอ็น จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนขึ้นไปผิวเป็นเหตุให้บริเวณปลดพาหะเป็นรูป A ทำให้แรงดันพียงทลายที่ได้รับมีค่าต่ำลง แต่ถ้าไบอัสแรงดันลบที่ฟิวส์เพลตแล้ว จะทำให้เกิดการผลักอิเล็กตรอนไปจากผิวเป็นเหตุให้เกิดบริเวณปลดพาหะขยายตัวเป็นรูป C จากปรากฏการณ์นี้ทำให้แรงดันพียงทลายที่มีค่าสูงขึ้น

โดยปกติแล้วฟิวส์เพลตที่สร้างขึ้นบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ส่วนมากจะสร้างขยายจากส่วนโลหะของรอยต่อขึ้นไป ซึ่งแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ฟิวส์เพลตจะเท่ากับแรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ข) โดยมีบริเวณปลดพาหะขยายไปถึงจุด D การปรับปรุงโครงสร้างนี้เพื่อให้แรงดันพียงทลายมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.11 (ก) รอยต่อในแนวระนาบกับผลกระทบเนื่องจากฟิวส์เพลต

(ข) ฟิวส์เพลตที่สร้างขึ้น โดยการขยายส่วนโลหะของรอยต่อ

หลักเหนือส่วนซิลิกอน ไดออกไซด์ที่ขอบของรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบการตอบสนองความถี่

จากสมการที่ (2.40) ในบทที่ 2 พบว่าการตอบสนองความถี่แปรผกผันกับ $1/L^2$ และ $1/C_{in}$ (หรือ C_{gs}) ดังนั้น ถ้าต้องการออกแบบให้มอสเฟตกำลังมีการตอบสนองความถี่ได้สูง ๆ จะต้องออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ ซึ่งขีดจำกัดของการสร้างความยาวของช่องทางเดินจะขึ้นกับการทำต้นแบบและกระบวนการไมโครลิโทกราฟี สำหรับในกรณีของดีมอสจากขีดจำกัดทั้ง 2 นี้ทำให้ดีมอสที่สร้างขึ้นมีความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้นเท่ากับ $10 \mu m$ จะมีเสถียรภาพการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูง และ yield ของชิปบนแผ่นผลึกซิลิกอนมีค่าสูง แต่ถ้าต้องการออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้นกว่านี้ ด้วยโครงสร้างของดีมอสจะทำให้ yield ที่ได้มีค่าต่ำลงหรือจะต้องสร้างเป็นวีมอสแทนเนื่องจากความยาวของช่องทางเดินกระแสจะอยู่ในส่วนร่องตัววีและด้วยเทคนิคการแพร่สารเจือด้วยความร้อน จึงทำให้วีมอสสามารถสร้างความยาวของช่องทางเดินกระแสได้สั้นมากกว่าดีมอส ถึงแม้ว่าจะออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้นลงมาก ๆ ได้ตามต้องการ แต่ผลกระทบของอุปกรณ์ที่จะตามมาคือ ผลกระทบเนื่องจากโครงสร้างขนาดเล็กเป็นผลให้แรงดันขีดเริ่มและแรงดันนั้งกลางที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้น เพื่อให้การออกแบบเป็นไปตามที่กำหนดไว้ เมื่อออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ จะต้องออกแบบเพื่อถึงพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย

สำหรับผลของ C_{in} ซึ่งเป็นความจุไม่ฟ้าแฝงด้านอินพุทในโครงสร้างของมอสเฟตกำลัง ดังนั้น ถ้าเราต้องการออกแบบให้มีการตอบสนองความถี่สูง จะต้องออกแบบให้ C_{in} มีค่าน้อย ทำได้โดย

1. สร้างส่วนนิวส์ออกไซด์ (field oxide) ให้มีความหนามาก ๆ เพราะจะทำให้ความจุไม่ฟ้าแฝงของส่วนนิวส์ออกไซด์มีค่าน้อยลง
2. ลดส่วนซ้อนทับ (overlap) ของเกตออกไซด์ ที่เข้าไปในส่วน N^+ -source และ N-drift ให้น้อยลง
3. สร้างส่วนลวดลายอะลูมิเนียม ให้มีขนาดเล็กและสั้นที่สุด

3.6 พารามิเตอร์แฝงในโครงสร้างมอสเฟตกำลัง

ปกติแล้วพารามิเตอร์แฝง (parasitic parameters) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมอสเฟตกำลังจะทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำจัดหรือหลีกเลี่ยงให้เกิดผลกระทบเนื่องจากพารามิเตอร์แฝงนี้ให้น้อยที่สุด พารามิเตอร์แฝงในโครงสร้างมอสเฟตกำลังมีด้วยกันหลายตัว คือ

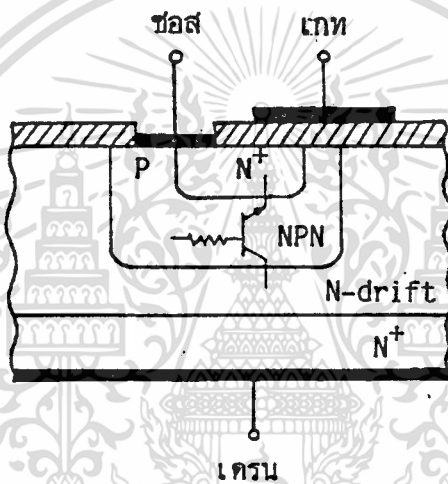
1. โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์
2. โครงสร้างแฝงของเจเฟต
3. ความจุไม่ฟ้าแฝง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลกระทบเนื่องจากความจุไฟฟ้าแฝงได้กล่าวไว้หัวข้อที่ 3.5 แล้ว ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และของเจเฟต

3.6.1 โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์[4] แสดงในรูปที่ 3.12 จากโครงสร้างของมอสเฟตกำลัง พบว่าถ้าโครงสร้างแฝงนี้ทำงาน เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างส่วน P-base และ N^+ -source จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในแนวตั้งเกิดเป็นกระแสรั่วไหลมากขึ้น เป็นผลให้มอสเฟตกำลังทำงานผิดพลาดได้ เราสามารถลดผลกระทบของโครงสร้างแฝงนี้ได้ โดยการเชื่อมต่อส่วนของ P-base กับ N^+ -source ด้วยลวดลายโลหะ



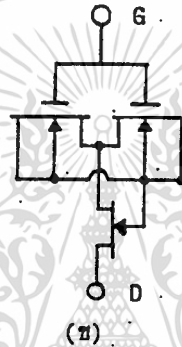
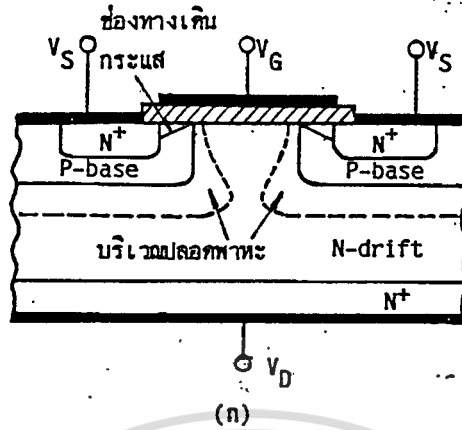
รูปที่ 3.12 โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในโครงสร้างของดีมอส

3.6.2 โครงสร้างแฝงของเจเฟต

โครงสร้างแฝงของเจเฟตแสดงในรูปที่ 3.13 เมื่อขั้วเดรนได้รับการไบอัสบวกเทียบกับขั้วซอส ดังในรูปที่ 3.13 (ก) รอยต่อพี-เอ็นระหว่างส่วน P-base กับ N-drift จะถูกไบอัสย้อนกลับ เป็นผลให้ยูนิตเซลล์ที่สมมาตรทั้ง 2 ข้างเกิดบริเวณปลอดพาหะขยายมากขึ้นจนกระทั่งเกิดเป็นพินช์ออฟ (pinch off) ขึ้นทำให้กระแสเดรนที่ผ่านส่วน N-drift มีค่าลดลง ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เปรียบเสมือนกับการเกิดโครงสร้างเจเฟตแฝงเข้ามาในโครงสร้างของมอสเฟตกำลัง[9] ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.13 (ข) ผลจากโครงสร้างแฝงนี้จะทำให้ความต้านทานมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างแฝงนี้ จะต้องออกแบบให้ระยะห่างส่วน P-base ของเซลล์ทั้งสองห่างกันเพียงพอ หรือออกแบบให้ส่วน N-drift มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูงขึ้นเพื่อให้บริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วน N-drift ได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



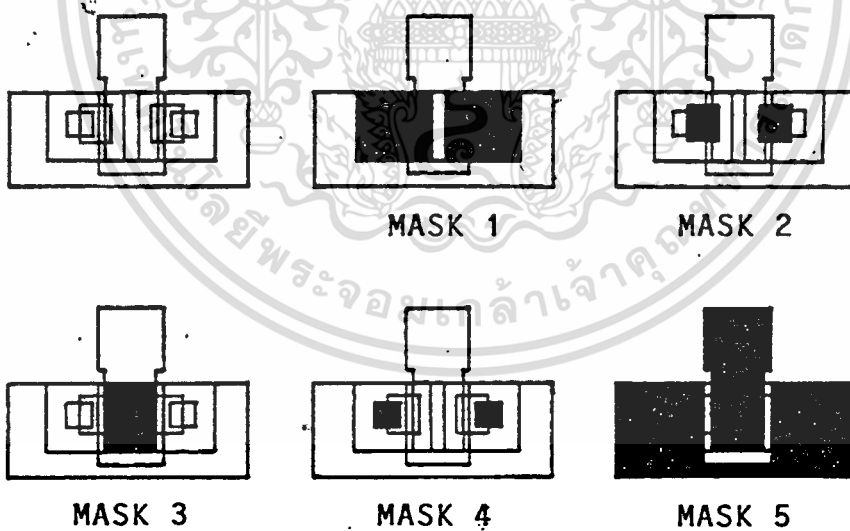
รูปที่ 3.13 (ก) ภาพตัดขวางโครงสร้างของดีมอส ซึ่งทำให้เกิดการพินซ์ออฟฟีน เนื่องจากโครงสร้างแฝงของเจเฟต
(ข) วงจรสมมูลของ โครงสร้างแฝงของเจเฟตในดีมอส

3.7 การออกแบบ และสร้างกระจกต้นแบบ

เริ่มต้นจากการศึกษา โครงสร้างและคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟตกำลังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น จากนั้นนำมาทำการการออกแบบเป็นลวดลายที่เรียกว่า การออกแบบลวดลายระดับหน้าฉาก (geometry layout design) ซึ่งได้ออกแบบชุดลวดลายต้นแบบบนกระดาษกราฟ จากนั้นนำไปตัดลวดลายบนแผ่น โปลิเอสเตอร์ด้วยเครื่อง ไมโครคัทเตอร์ เมื่อลอกลวดลายออกจะได้ต้นแบบต่าง ๆ บนแผ่น โปลิเอสเตอร์ตามต้องการ แล้วนำต้นแบบนี้ไปทำการถ่ายย่อ 50 เท่า ลงบนแผ่นกระจกต้นแบบ (photomask) ขนาด 3"x3" ชุดกระจกต้นแบบแต่ละชุดที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟตกำลังจะประกอบไปด้วย 4-5 แผ่น ดังนี้ :

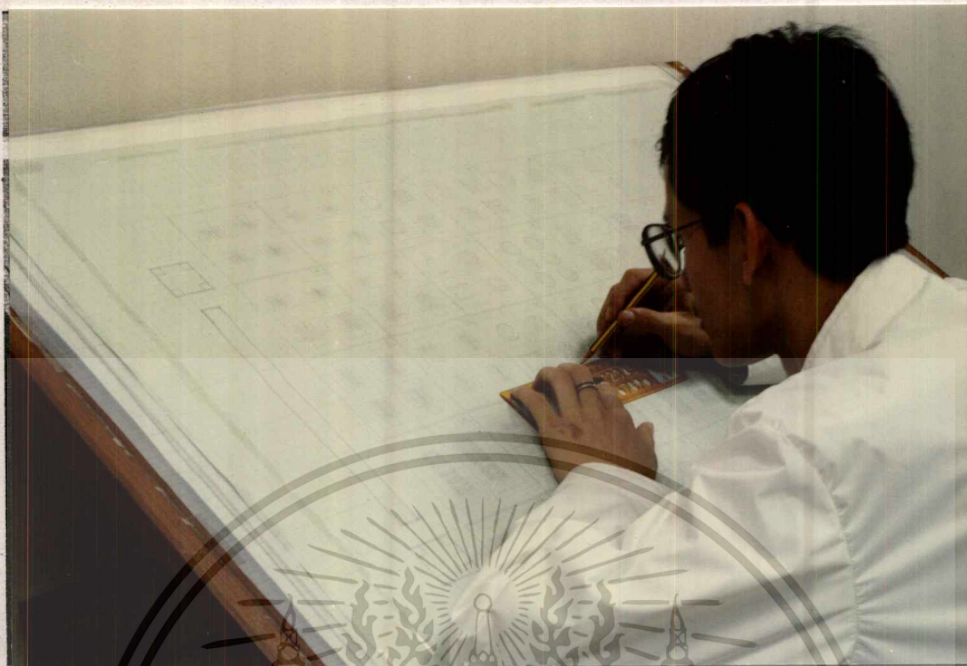
กระจกต้นแบบ	มอสเฟตกำลัง		ไดโอด
	แบบดีมอส	แบบวีมอส	
แผ่นที่ 1	P-base mask	P-base mask	P-field ring mask
แผ่นที่ 2	N ⁺ -source mask	N ⁺ -source mask	P-main junction mask
แผ่นที่ 3	Gate oxide mask	V-groove และ Gate oxide mask	Contact mask
แผ่นที่ 4	Contact mask	Contact mask	Metal mask
แผ่นที่ 5	Metal mask	Metal mask	-

รูปที่ 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 และ 3.18 แสดงขั้นตอนการออกแบบ และการสร้าง
กระจกต้นแบบของมอสเฟตกำลังและ ไดโอด



รูปที่ 3.14 ดีมอสที่ได้ทำการออกแบบลวดลายในระดับหน้าก (สีดำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

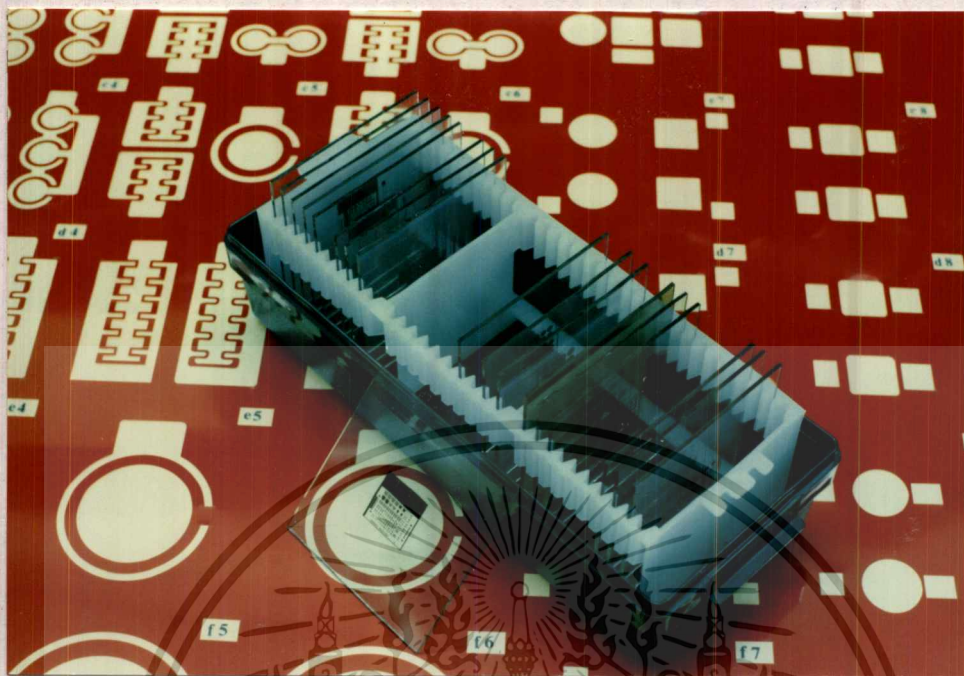


รูปที่ 3.15 การออกแบบลวดลายต้นแบบบนกระดาษกราฟ

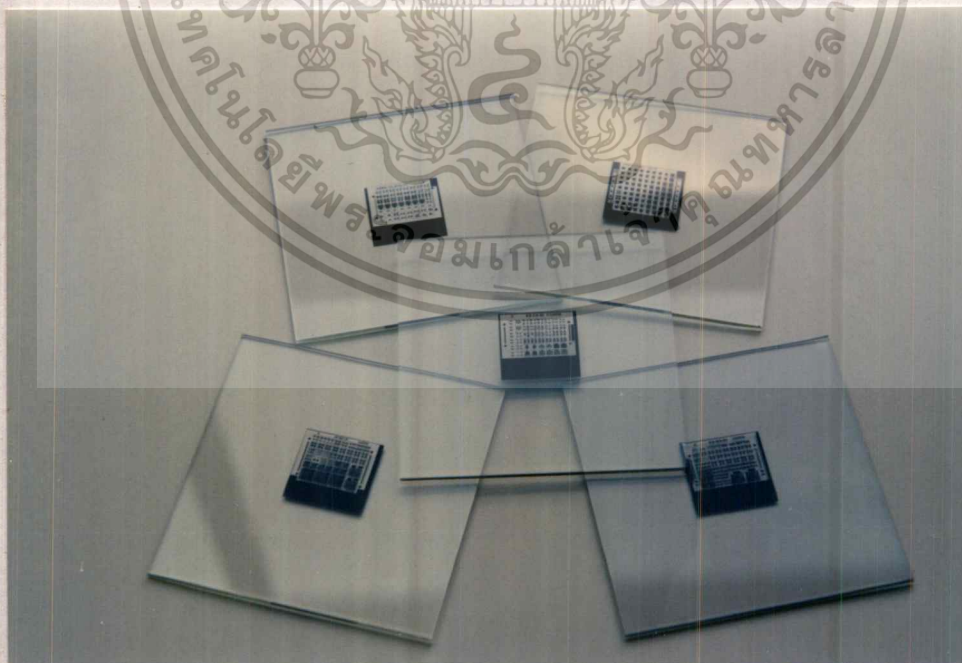


รูปที่ 3.16 การตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่น โปลี เอสเตอร์ด้วยเครื่อง ไมโครคัทเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แผ่นโพลีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดเสร็จแล้วและชุดกระจกต้นแบบที่ถ่ายยอลง 50 เท่าจากแผ่นต้นแบบ



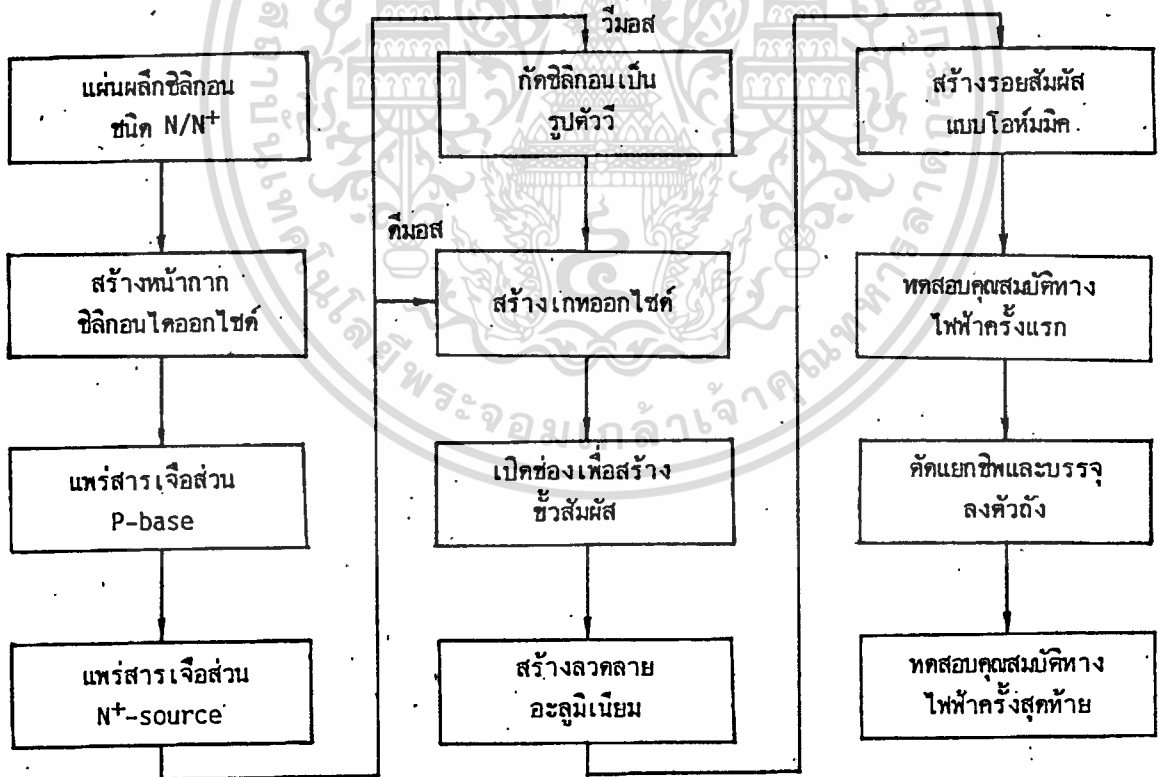
รูปที่ 3.18 กระจกต้นแบบลวดลายอะลูมิเนียมเนี่ยมของมอสเฟตกำลังที่ได้สร้างขึ้น 5 ชุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการสร้างและการเก็บรวบรวมสเฟดกำลัง

หลังจากได้ทำการศึกษาหลักการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของมอสเฟดกำลัง ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เพื่อสร้างให้มอสเฟดกำลังนำกระแสได้สูง ทนแรงดันได้สูง และตอบสนองความถี่ได้สูงด้วย ซึ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้ง 3 ประการนี้เป็นหัวใจที่สำคัญของมอสเฟดกำลัง จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปออกแบบและสร้างเป็นกระจกตัดแบบหรือที่เรียกว่า โฟโตมาสค์ (photomask) เพื่อใช้เป็นลวดลายที่จะสร้างลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน ในกระบวนการสร้างมอสเฟดกำลังที่จะกล่าวต่อไป

กระบวนการสร้างมอสเฟดกำลังที่นำเสนอในบทนี้ เป็นกระบวนการสุดท้ายที่ได้ปรับปรุงให้เป็นกระบวนการสร้างมาตรฐานสำหรับสร้างมอสเฟดกำลังแบบดีมอสและแบบวีมอส เฉพาะในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งขั้นตอนการสร้างทั้งหมดแสดงในโฟลชาร์ทรูปที่ 4.1



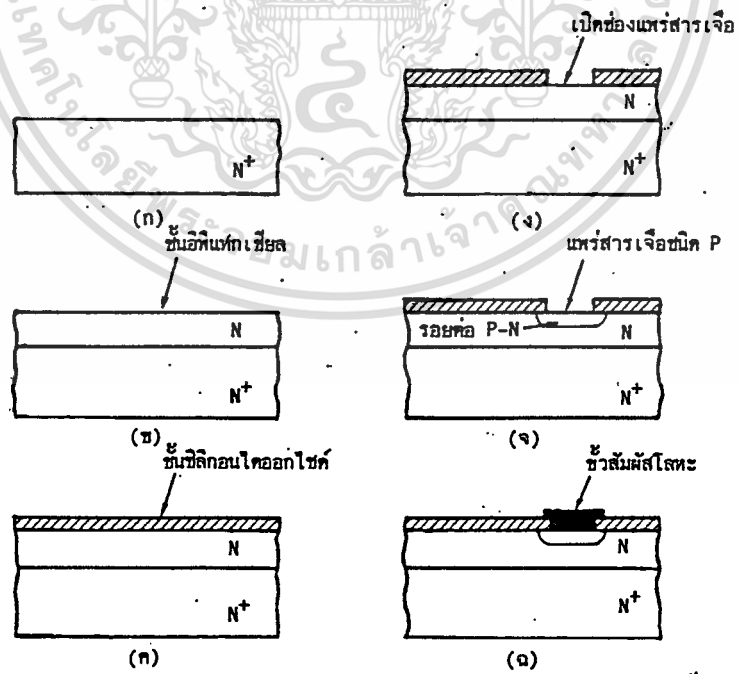
รูปที่ 4.1 โฟลชาร์ทแสดงกระบวนการสร้างทั้งหมดของมอสเฟดกำลังแบบดีมอสและแบบวีมอส

4.1 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบ

ในปัจจุบันนี้ กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการสร้างในแนวระนาบ (plannar process) ซึ่งรวมถึงมอสเฟตกำลังด้วย กระบวนการสร้างในแนวระนาบได้เริ่มต้นสร้างตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 ด้วยจุดเด่นของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการสร้างในยุคต้น ๆ เช่น วิธีการอัลลอยด์ เป็นต้น พบว่ากระบวนการสร้างในแนวระนาบมีข้อได้เปรียบ 2 ประการ ซึ่งทำให้เหมาะสมสำหรับสร้างเป็นวงจรรวม คือ

1. รอยต่อของสารกึ่งตัวนำจะถูกคลุมด้วยชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งป้องกันไม่ให้รอยต่อทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอากาศ หรือสิ่งเจือปนชนิดอื่น ๆ เป็นผลให้เกิดกระแสรั่วไหลต่ำมาก ดังนั้นอุปกรณ์จึงมีความเชื่อถือสูง (high reliability)
2. การออกแบบต้นแบบและเทคนิคการกัด ซึ่งใช้ในการกำหนดขนาดของโครงสร้าง ซึ่งจะทำได้สามารถลดขนาดได้เล็กลง และสะดวกในการสร้างอุปกรณ์จำนวนมาก ๆ ได้พร้อมกันบนแผ่นผลึกซิลิกอนเดียวกัน

กระบวนการสร้างในแนวระนาบประกอบด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐาน 5 กระบวนการ คือ อีพิทากซี (epitaxy), ออกซิเดชัน (oxidation), โฟโตลิโทกราฟี (photolithography), การแพร่สารเจือ (diffusion) และการสร้างลวดลายโลหะ (metallization) ในรูปที่ 4.2 เป็นภาพตัดขวางแสดงขั้นตอนการสร้างพื้นฐานในแนวระนาบของแผ่นผลึกซิลิกอน



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสร้างในแนวระนาบ : (ก) ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (ข) อีพิทากซี (ค) ออกซิเดชัน (ง) โฟโตลิโทกราฟี (จ) การแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร และ (ฉ) การสร้างลวดลายโลหะ วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบทั้ง 5 กระบวนการ อธิบายสรุปพอสังเขปได้ดังต่อไปนี้ [16], [17] คือ

4.1.1 กระบวนการอิมิทาซี

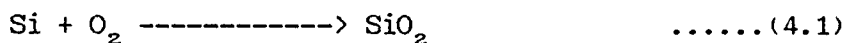
กระบวนการอิมิทาซี (epitaxy process) เป็นกระบวนการสร้างผลึกรูปเดี่ยวชั้นบาง ๆ ขึ้นบนฐานรองโดยอาศัยเทคนิคการพ่นผิว (deposition technique) ในลักษณะนี้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นใหม่กับของผลึกเดิมจะต่อเนื่องกันอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) กระบวนการอิมิทาซีจะใช้ในการสร้างทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลัง เพื่อต้องการให้ได้แรงดันพ่วงหลายมีค่าสูง ๆ ในขณะที่ส่วนฐานรองเป็นแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสูง ๆ เพื่อให้ความต้านทานมีค่าต่ำ สำหรับความหนาแน่นของชั้นอิมิทาซีซิล สามารถควบคุมได้แน่นอนจากเครื่องมือที่เรียกว่า Vapor Phase Epitaxy (VPE) หรือ Chemical Vapor Deposition (CVD) โดยปกติแล้วจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1-20 ไมครอน

เนื่องจากห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ไม่มีเครื่อง VPE และ CVD ดังนั้นจึงไม่สามารถสร้างชั้นอิมิทาซีซิลได้ แต่เพื่อต้องการให้มอสเฟตกำลังที่สร้างขึ้นมามีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี โดยเฉพาะให้มีการพ่นแรงดันได้สูง ๆ ดังนั้นจึงต้องสั่งแผ่นผลึกซิลิกอนที่สร้างชั้นอิมิทาซีซิลหนาประมาณ 20 ไมครอน มาเป็นแผ่นผลึกเริ่มต้นที่จะใช้สร้างมอสเฟตกำลัง

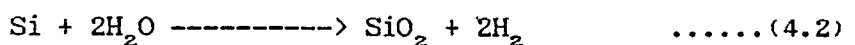
4.1.2 กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide : SiO_2) เป็นสารซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ลักษณะโปร่งแสง และใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี จากสาเหตุดังกล่าวนี้ จึงทำให้ซิลิกอนถูกนำมาใช้สร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมากที่สุด ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์สร้างได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2 (ค) โดยนำแผ่นผลึกซิลิกอนมาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูง $1000-1200^\circ\text{C}$ โดยมีปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังนี้ คือ

1. กระบวนการออกซิเดชัน แบบแห้ง (dry oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชัน แบบชื้น (wet oxidation)



โดยปกติแล้วเมื่อต้องการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนา ๆ จะใช้กระบวนการทั้งสองนี้ควบคู่กันไป สำหรับหน้าที่ที่สำคัญของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างในแนวระนาบคือ ประการแรกใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิกอนและป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกทำปฏิกิริยากับผิวของผลึกซิลิกอน (passivation layer) ประการที่ 2 ใช้เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือ

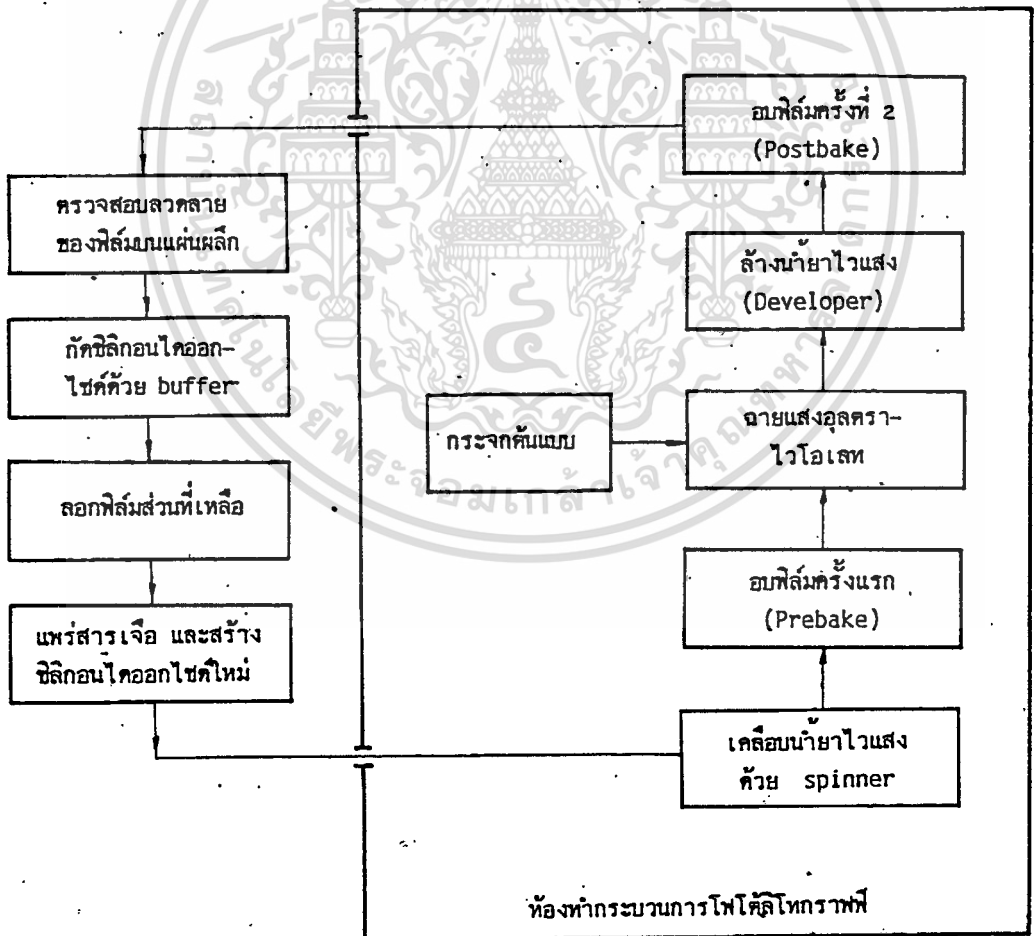
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประการที่ 3 ใช้สร้างส่วนเกทออกไซด์ เพื่อเป็นส่วนเหนียวทำให้เกิดช่องทางเดินกระแสในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต และประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิกอนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรของลวดลายอะลูมิเนียมกับผิวซิลิกอนส่วนอื่น ๆ และการคล้องกันของลวดลายอะลูมิเนียมที่สร้าง 2 ชั้น

4.1.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ สำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดให้จากต้นแบบ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2 (ง) โดยใช้เทคนิคในการถ่ายรูป (photographic technique) เข้าช่วย ขนาดของช่องเปิดซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก ๆ ได้ และความถูกต้องแม่นยำที่ได้รับจะขึ้นกับการปรับ (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ในรูปที่ 4.3 เป็นโฟลชาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทำฟิล์ม (ส่วนที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยม) และส่วนที่สองเป็นการกัดซิลิกอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.3 โฟลชาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือ (diffusion process) เป็นกระบวนการควบคุมปริมาณและการกระจายความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่เติมให้แก่แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิสูง 800-1000 °C เป็นผลทำให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (จ)

สำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในแผ่นผลึกซิลิกอน โบรอนจะเป็นสารเจือที่แพร่หลายสำหรับสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในขณะที่ฟอสฟอรัสจะใช้สร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือเหล่านี้จะมาจากหลาย ๆ ลักษณะ คือ แหล่งจ่ายสารเจือแผ่นแข็ง (solid sources) เช่น BN และ SiP_2O_7 เป็นต้น แหล่งจ่ายสารเจือของเหลว (liquid sources) เช่น BBr_3 และ POCl_3 เป็นต้น และแหล่งจ่ายสารเจือก๊าซ (gaseous sources) เช่น B_2H_6 และ PH_3 เป็นต้น

ในทางปฏิบัติกระบวนการแพร่จะแบ่งได้ออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้คือ

1. ขั้นตอน predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้น เพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่จะเข้าไปในแผ่นผลึกของสารกึ่งตัวนำ
2. ขั้นตอนการขับเคลื่อน (drive in) เป็นขั้นตอนที่ทำต่อเนื่องจากขั้นตอน predeposition ทั้งนี้ เพื่อควบคุมความลึกของรอยต่อ และกำหนดลักษณะการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ

ส่วนสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายสำหรับการแพร่สารเจือและลักษณะการกระจายของสารเจือได้กล่าวถึงรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 3

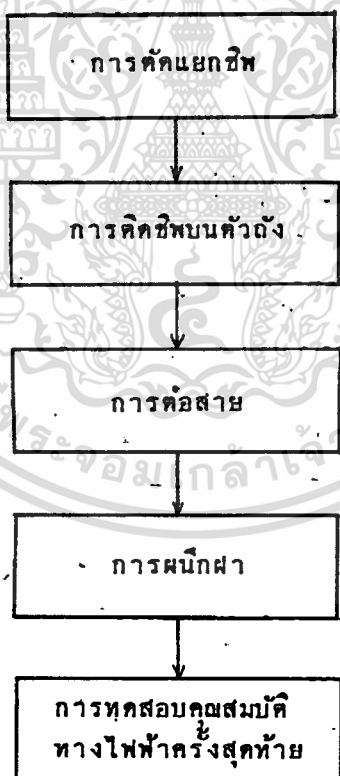
4.1.5 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ (metallization process) บนสารกึ่งตัวนำ เพื่อใช้เป็นขั้วในการต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยการเชื่อมลวดอะลูมิเนียมระหว่างขั้วกับขาตัวถัง ซึ่งสามารถสร้างได้โดยการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนของซิลิกอนที่ต้องการสร้างลวดลายโลหะหรือสร้างขั้วสัมผัสโลหะ แล้วนำไปเคลือบฟิล์มบาง ๆ (thin-film deposition) ของโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ดังเช่น อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ให้มีความหนาประมาณ 1 μm หลังจากนั้นนำไปกัดเป็นลวดลายตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ฉ) จากนั้นจึงนำมาขึ้นเตอริง เพื่อให้บริเวณรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

4.2 กระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

กระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (assembly process) ดังแสดงโพลซาร์ทในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกระบวนการนำเอาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกมาทำการตัดแยกชิพ แล้วตัดแยกชิพที่ทำงานได้มาติดลงบนตัวถัง ทำการต่อสายด้วยลวดอะลูมิเนียมระหว่างชิพกับขาตัวถัง จากนั้นปิดผนึกฝาเข้ากับตัวถัง และทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย จนมั่นใจว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้ตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้จากการออกแบบและสามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่น ๆ

สำหรับตัวถังส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเก็บบรรจุจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ ตัวถังแบบตัวตะขาบ (dual-in-line package หรือ DIP package), ตัวถังแบบกระป๋องโลหะ (metal cans) และตัวถังแบบแบน (flat packs) ในกรณีของมอสเฟตกำลังจะเลือกใช้ตัวถังแบบกระป๋องโลหะ เพราะว่าจะนอกจากจะนำไปใช้ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกได้แล้ว ยังช่วยระบายความร้อนบางส่วนด้วย



รูปที่ 4.4 โพลซาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

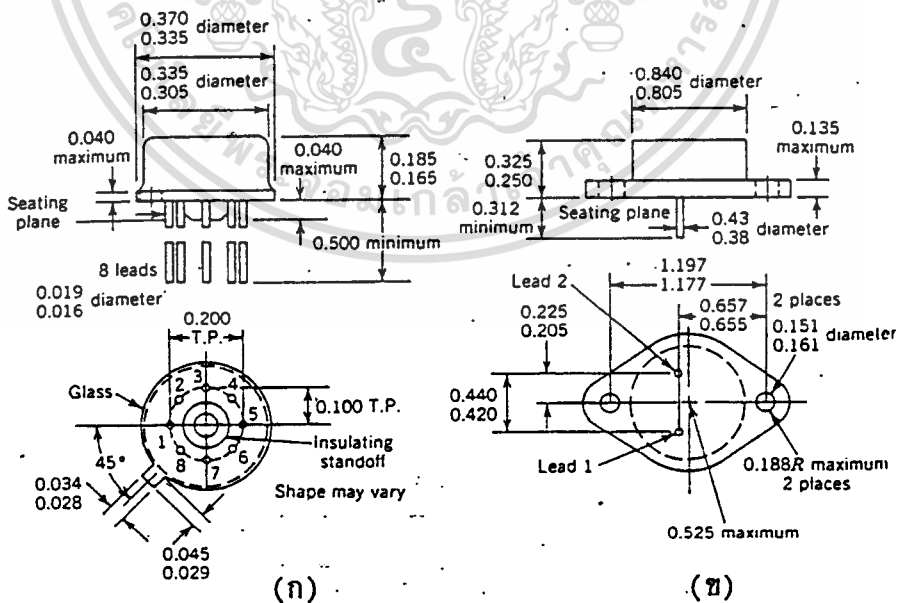
กระบวนการเก็บบรรจุ อธิบายสรุปพอสังเขปได้ดังต่อไปนี้ คือ

4.2.1 การตัดแยกชิพ

การตัดแยกชิพ (scribing) เป็นการตัดแบ่งแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยเครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องตัดแผ่นผลึก (sawing machine) ซึ่งควบคุมการตัดด้วยใบมีดที่หมุนด้วยความเร็วประมาณ 500 รอบต่อวินาที แผ่นผลึกชิ้นเล็ก ๆ ที่ได้ในขั้นนี้ คือ มอสเฟตกำลังหนึ่งตัว ซึ่งเรียกว่า ชิพ (chip) หรือ ได้ซ์ (die) แล้วคัดแยกชิพที่ทำงานได้ดี เพื่อนำไปติดบนตัวถังต่อไป

4.2.2 การติดชิพบนตัวถัง

การติดชิพ (die bonding) เป็นการนำเอาชิพที่ทำงานได้หลังจากที่ผ่านการทดสอบครั้งแรกและตัดออกเป็นชิพเรียบร้อยแล้ว มาติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 สำหรับมอสเฟตกำลังที่มีขนาดเล็ก และตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 สำหรับมอสเฟตกำลังที่มีขนาดใหญ่ โดยชิพขนาดเล็กที่นำมาติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 จะใช้เครื่องติดชิพที่ให้ความร้อนสูงประมาณ 400°C ช่วยในการยึดชิพให้ติดกับผิวของตัวถังที่เป็นทอง ส่วนชิพขนาดใหญ่ที่ติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 จะใช้กาวยเงิน (silver press) ติดชิพเข้ากับตัวถัง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับในรูปที่ 4.5 เป็นตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 และ TO-3 ซึ่งแสดงขนาดต่าง ๆ ของตัวถัง (หน่วยเป็นนิ้ว)



รูปที่ 4.5 ตัวถังกระป๋องโลหะที่ใช้เก็บบรรจุชิพของมอสเฟตกำลัง

(ก) ตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 (ข) ตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การต่อสาย

การต่อสาย (wire bonding) เป็นการเชื่อมต่อลวดอะลูมิเนียมระหว่างชิปกับขาของตัวถังที่จะต่อไปใช้กับงานภายนอก ซึ่งในการต่อสายจะใช้หลักการของความถี่สูง ในกรณีของตัวถังป้องกันโลหะแบบ TO-5 จะใช้ลวดอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 25 μm ส่วนตัวถังป้องกันโลหะแบบ TO-3 จะใช้ลวดอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 125 μm

4.2.4 การผนึกฝา

การผนึกฝา (encapsulate) เป็นการปิดฝาโลหะเข้ากับตัวถัง เพื่อป้องกันไม่ให้ชิปเกิดเสียหายอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรก สารเคมีภายนอก และการกระทบกับลวดโลหะที่ใช้ต่อสาย นอกจากนี้ในขณะทำงานยังช่วยระบายความร้อนบางส่วนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์

4.2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย

เมื่อนำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาเก็บบรรจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะต้องมีการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์อย่างละเอียดอีกครั้ง ซึ่งเรียกว่า การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย (final test) อาทิเช่น การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน การวัดค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อและส่วนของออกไซด์ การวัดการตอบสนองความถี่ เป็นต้น เพื่อนำไปสรุปเป็นข้อมูล (data sheet) ที่จะนำไปใช้กับงานอิเล็กทรอนิกส์ทั่ว ๆ ไป หรือนำมาปรับปรุงกระบวนการสร้างใหม่ ในกรณีที่อุปกรณ์ยังมีข้อบกพร่อง

4.3 กระบวนการสร้างมาตรฐานและกระบวนการเก็บบรรจุของมอสเฟตกำลัง

กระบวนการสร้างมาตรฐานและกระบวนการเก็บบรรจุของมอสเฟตกำลัง สำหรับในการวิจัยนี้แบ่งได้เป็น

- 4.3.1 กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอส
- 4.3.2 กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส
- 4.3.3 กระบวนการสร้างไดโอด
- 4.3.4 กระบวนการเก็บบรรจุมอสเฟตกำลังและ ไดโอด

4.3.1 กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอส

ในตารางที่ 4.1 เป็นตารางสรุปกระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอส ซึ่งได้ทำการสร้างบนแผ่นหลักซิลิกอนบนระนาบ (111) และ (100) ส่วนในรูปที่ 4.6 เป็นภาพตัดขวางแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส

ตารางที่ 4.1 กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอสบนแผ่นหลักซิลิกอน

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ	รูปที่ 4.6
แผ่นหลักซิลิกอน เริ่มต้น	-	-	แบบอินเทกเซียล N/N ⁺ , หนา 20 μm , ระนาบ(111), (100), $\rho=5.5-10 \Omega\text{-cm}$	(ก)
ทำความสะอาดผิว แผ่นหลัก เริ่มต้น	กำจัด โลหะหนัก กำจัด ไขมัน	กรดไนตริก ไตรโคลโรเอทธีลีน	-	
สร้างชั้นซิลิกอนได ออกไซด์ (SiO ₂) ครั้งแรก	ออกซิเดชันแบบ แห้งและแบบชื้น	1100°C, O ₂ 2 ชม. H ₂ O 1 ชม. O ₂ 1 ชม.	SiO ₂ \approx 5000 Å	(ข)
โฟโตลิโทกราฟี ส่วน P-base	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	waycoat สารละลายบัฟเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 1 อัตราการกัด 1000 Å/นาที	
แพร่สารเจือส่วน P-base	predeposition	ระนาบ(111), BN, 920°C, 30 นาที, N ₂ ระนาบ(100), BN, 820°C, 20 นาที, N ₂	N _A \approx 1.0x10 ¹⁷ cm ⁻³ N _A \approx 5.0x10 ¹⁸ cm ⁻³	(ค)
	ยับยั้งและสร้าง SiO ₂ ใหม่	ระนาบ(111), O ₂ 1100°C, 4 ชม. ระนาบ(100), O ₂ 1100°C, 14 ชม.	x _{JP} \approx 2.0-2.5 μm SiO ₂ (ใหม่) \approx 3000 Å x _{JP} \approx 3.5-3.8 μm SiO ₂ (ใหม่) \approx 4000 Å	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ	รูปที่ 4.6
โฟโตลิโทกราฟี ส่วน N ⁺ -source	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Waycoat สารละลายบัฟเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2 อัตราการกัด 1000 Å/นาที	
แพร่สารเจือส่วน N ⁺ - source	predeposition ชั้นลิกและสร้าง SiO ₂ ใหม่	SiP ₂ O ₇ , 1040 °C, 15 นาที, N ₂ 1000 °C, 10 นาที, O ₂	N _D ≈ 1.54x10 ¹⁸ cm ⁻³ (ง) x _{Jn} ≈ 1.2-1.5 μm SiO ₂ (ใหม่) ≈ 700 Å	
โฟโตลิโทกราฟี ส่วนเกตออกไซด์	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Waycoat สารละลายบัฟเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 อัตราการกัด 1000 Å/นาที	
เกตออกไซด์	ออกซิเดชันแบบ แห้ง	1100 °C, 30 นาที, O ₂	SiO ₂ = 1000 Å (จ)	
โฟโตลิโทกราฟี ส่วนขั้วสัมผัส	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Waycoat สารละลายบัฟเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4 (ฉ) อัตราการกัด 1000 Å/นาที	
สร้างลวดลายโลหะ	เคลือบฟิล์มบาง	เครื่องเคลือบสูญญากาศ, เส้นลวดอะลูมิเนียม	ความดัน=1.8x10 ⁻⁶ torr ฟิล์มอะลูมิเนียมหนา 1 μm	
โฟโตลิโทกราฟี ส่วนลวดลายโลหะ	ทำฟิล์ม กัดอะลูมิเนียม	AZ-1350 ส่วนผสมกรดฟอสฟอริก	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 5 (ช)	
ซินเตอร์ริง	-	500 °C, 10 นาที, N ₂	สร้างขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก	

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ	รูปที่ 4.6
ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรก	รอยต่อพี-เอ็น คุณสมบัติกระแส-แรงดัน	เครื่องโพรบสแตชั่น เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์	เพื่อตัดแยกอุปกรณ์ที่เสีย	

4.3.2 กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส

กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่เหมือนกับกระบวนการสร้างดีมอส แต่มีกระบวนการเพิ่มขึ้นอีก 1 กระบวนการ คือ กระบวนการกัดซิลิกอนเป็นร่องตัววี ก่อนการสร้างเกตออกไซด์ สำหรับตารางที่ 4.2 เป็นตารางสรุปของกระบวนการสร้างวีมอสบนแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ส่วนในรูปที่ 4.7 เป็นภาพตัดขวางแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส

ตารางที่ 4.2 กระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอสบนแผ่นผลึกซิลิกอน

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ	รูปที่ 4.7
แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น	-	-	แบบอิมเพกเซียล N/N^+ , หนา 20 μm , ระนาบ(100) $\rho = 5.5-5.7 \Omega\text{-cm}$	(ก)
ทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น	กำจัด โลหะหนัก	กรด ไนตริก	-	
	กำจัด ไขมัน	ไตรโคลโรเอทхіลีน		
สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂) ครั้งแรก	ออกซิเดชันแบบแห้งและแบบชื้น	1100 °C, O ₂ 2 ชม. H ₂ O 1 ชม. O ₂ 1 ชม.	SiO ₂ \approx 5000 Å	(ข)

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ	รูปที่ 4.6
โฟโวลติกกราฟฟี	ทำฟิล์ม	waycoat	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 1	
ส่วน P-base	กัด SiO ₂	สารละลายบัฟเฟอร์	อัตราการกัด 1000 °A/นาที	
แพร่สารเจือส่วน P-base	predeposition	ระนาบ(100), BN, 820 °C, 20 นาที, N ₂	N _A ≈ 5.0x10 ¹⁶ cm ⁻³ (ค)	
	ซัลลิกและสร้าง SiO ₂ ใหม่	1100 °C, 14 ชม., O ₂	x _{JP} ≈ 3.5-3.8 μm SiO ₂ (ใหม่) ≈ 4000 °A	
โฟโวลติกกราฟฟี	ทำฟิล์ม	Waycoat	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2	
ส่วน N ⁺ -source	กัด SiO ₂	สารละลายบัฟเฟอร์	อัตราการกัด 1000 °A/นาที	
แพร่สารเจือส่วน N ⁺ - source	predeposition	SiP ₂ O ₇ , 1040 °C, 15 นาที, N ₂	N _D ≈ 1.54x10 ¹⁸ cm ⁻³ (ง)	
	ซัลลิกและสร้าง SiO ₂ ใหม่	1000 °C, 10 นาที, O ₂	x _{JN} ≈ 1.2-1.5 μm SiO ₂ (ใหม่) ≈ 700 °A	
โฟโวลติกกราฟฟี	ทำฟิล์ม	Waycoat	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3	
ส่วนร่องตัววีและ เกทออกไซด์	กัด SiO ₂	สารละลายบัฟเฟอร์	อัตราการกัด 1000 °A/นาที	
กัดซิลิกอนเป็นร่อง ตัววี	กัดซิลิกอน	ด้วยสารละลาย PED ที่อุณหภูมิ 95-100 °C	อัตราการกัด 1.55 μm/นาที (จ)	
	กัด SiO ₂	สารละลายบัฟเฟอร์ 30 วินาที	อัตราการกัด 1000 °A/นาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ	รูปที่ 4.6
เกทออกไซด์	ออกซิเดชันแบบแห้ง	1100 °C, 30 นาที, O ₂	SiO ₂ = 1500 Å	(จ)
โฟโตลิโทกราฟี	ทำฟิล์ม	Waycoat	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4	(ข)
ส่วนหัวสัมผัส	กัด SiO ₂	สารละลายบัฟเฟอร์	อัตราการกัด 1000 Å/นาที	
สร้างลวดลายโลหะ	เคลือบฟิล์มบาง	เครื่องเคลือบสุญญากาศ, เส้นลวดอะลูมิเนียม	ความดัน = 1.8 × 10 ⁻⁶ torr ฟิล์มอะลูมิเนียมหนา 1 μm	
โฟโตลิโทกราฟี	ทำฟิล์ม	AZ-1350	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 5	(ข)
ส่วนลวดลายโลหะ	กัดอะลูมิเนียม	ส่วนผสมกรดฟอสฟอริก		
ขึ้นเตอร้ง	-	500 °C, 10 นาที, N ₂	สร้างหัวสัมผัสแบบโอห์มมิก	
ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรก	รอยต่อพี-เอ็น คุณสมบัติกระแสแรงดัน	เครื่องโพรบสเตชัน เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์	เพื่อตัดแยกอุปกรณ์ที่เสีย	

4.3.3 กระบวนการสร้างไดโอด

การสร้างไดโอดในการวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการพังทลายแบบอะลวามันซ์ของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งเทียบได้กับส่วน P-base กับ N-drift ดังได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ทำให้ได้รับความสะดวกและรวดเร็ว ในการออกแบบและสร้าง ก่อนที่จะนำผลที่ได้ไปออกแบบร่วมกับโครงสร้างมอสเฟตกำลังต่อไป กระบวนการสร้างไดโอดแสดงในตารางที่ 4.3 และในรูปที่ 4.8 เป็นภาพตัดขวางแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างไดโอด

ตารางที่ 4.3 กระบวนการสร้างไดโอดบนแผ่นผลึกซิลิกอน

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ	รูปที่ 4.8
แผ่นผลึกซิลิกอน เริ่มต้น	-	-	ชนิด N, ระบาย (100) $\rho = 5-50 \Omega\text{-cm}$	(ก)
ทำความสะอาดผิว แผ่นผลึก เริ่มต้น	กำจัด โลหะหนัก กำจัด ไขมัน	กรด ไนตริก ไตรโคล โรเอทซีลีน	- -	
สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂) ครั้งแรก	ออกซิเดชันแบบ แห้งและแบบชื้น	1100°C, O ₂ 2 ชม. H ₂ O 1 ชม. O ₂ 1 ชม.	SiO ₂ \approx 5000 Å	(ข)
โฟโตลิโทกราฟี ส่วนฉนวนสร้าง	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Waycoat สารละลายบัฟเฟอร์	กระจกแบบแผ่นที่ 1 อัตราการกัด 1000 Å/นาที	
แพร่สารเจือส่วน ฉนวนสร้าง	predeposition ชั้นฟิล์มและสร้าง SiO ₂ ชั้นใหม่	BN, 820°C, 20 นาที, N ₂ 1000°C, O ₂ 30 นาที H ₂ O 30 นาที O ₂ 30 นาที	$N_A \approx 5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ $x_{jpr} \approx 3.5-3.8 \mu\text{m}$ SiO ₂ \approx 3000 Å	(ค)
โฟโตลิโทกราฟี ส่วนรอยต่อไดโอด หลัก	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Waycoat สารละลายบัฟเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2 อัตราการกัด 1000 Å/นาที	
แพร่สารเจือส่วน รอยต่อไดโอดหลัก	predeposition ชั้นฟิล์มและสร้าง SiO ₂ ใหม่	BN, 820°C, 20 นาที, N ₂ 1100°C, 14 ชม., O ₂	$N_A \approx 5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ $x_{jpm} \approx 3.0-3.5 \mu\text{m}$ SiO ₂ (ใหม่) \approx 4000 Å	(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ	รูปที่ 4.8
โฟโตลิโทกราฟี ชั้นสัมผัส	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Waycoat สารละลายบัฟเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 อัตราการกัด 1000 Å/นาที	(จ)
สร้างลวดลายโลหะ	เคลือบฟิล์มบาง	เครื่องเคลือบสุญญากาศ, เส้นลวดอะลูมิเนียม	ความดัน = 1.8×10^{-6} torr ฟิล์มอะลูมิเนียมหนา 1 µm	
โฟโตลิโทกราฟี ส่วนลวดลายโลหะ	ทำฟิล์ม กัดอะลูมิเนียม	AZ-1350 ส่วนผสมกรดฟอสฟอริก	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4	(ฉ)
ขึ้นเตอร์ริง	-	500 °C, 10 นาที, N ₂	สร้างชั้นสัมผัสแบบโอห์มมิก	
ทดสอบคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าครั้งแรก	รอยต่อพี-เอ็น คุณสมบัติกระแส- แรงดัน	เครื่องไพริสเตชัน เครื่องวัดคุณสมบัติของ ทรานซิสเตอร์	เพื่อตัดแยกอุปกรณ์ที่เสีย	

4.3.4 การเก็บบรรจุมอสเฟตกำลังและไดโอด

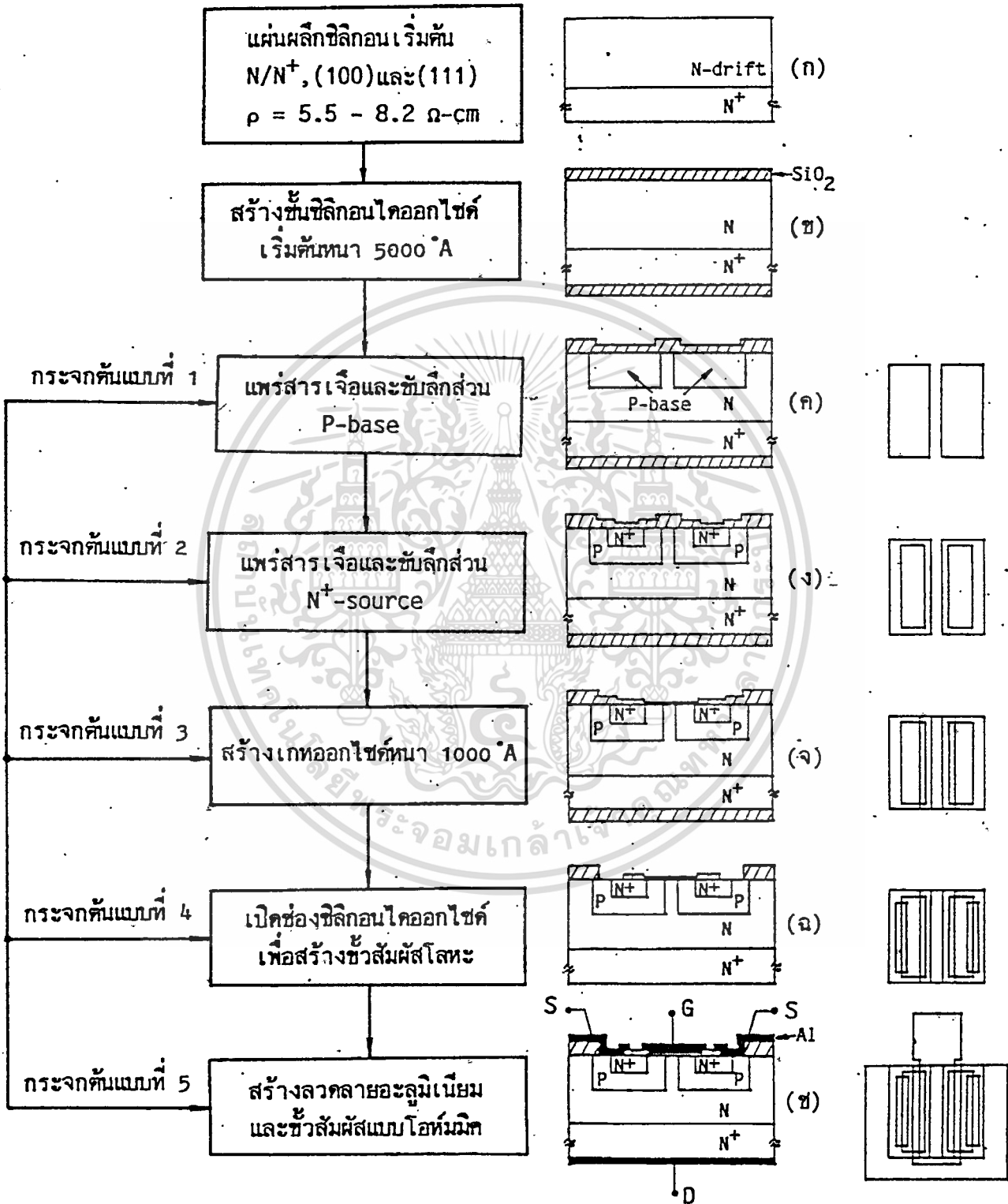
การเก็บบรรจุมอสเฟตกำลังและไดโอด รวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย แสดงในตารางที่ 4.4 สำหรับรายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ในรูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายของมอสเฟตกำลังที่สร้างเสร็จแล้ว ส่วนในรูปที่ 4.10 เป็นภาพถ่ายของชิพมอสเฟตที่ตัดแยกแล้วและบรรจุลงตัวถัง TO-5 และ TO-3

ตารางที่ 4.4 การเก็บบรรจุมอสเฟตกำลังและไดโอดลงบนตัวถัง TO-5 และ TO-3

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ
การตัดแยกชิพ	เครื่องตัดชิพ	ใบมีดหมุน 500 รอบ/วินาที	
การติดชิพลงตัวถัง	ด้วยความร้อน	มอสเฟตกำลังขนาดเล็กและ ไดโอด	TO-5
	กาวเงิน	มอสเฟตกำลังขนาดใหญ่ และอบเป็นเวลา 1 ชม.	To-3
การต่อสาย	เครื่องต่อสาย	มอสเฟตกำลังขนาดเล็ก	ลวดขนาด 25 μm
		มอสเฟตกำลังใหญ่	ลวดขนาด 125 μm
การฉีกฉา	-	ใช้กาวในการฉีกฉา	-
ทดสอบคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าครั้งสุดท้าย	พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2	-	เครื่องมือสำหรับวัดอุปกรณ์ สารกึ่งตัวนำที่มีอยู่ในห้อง ปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

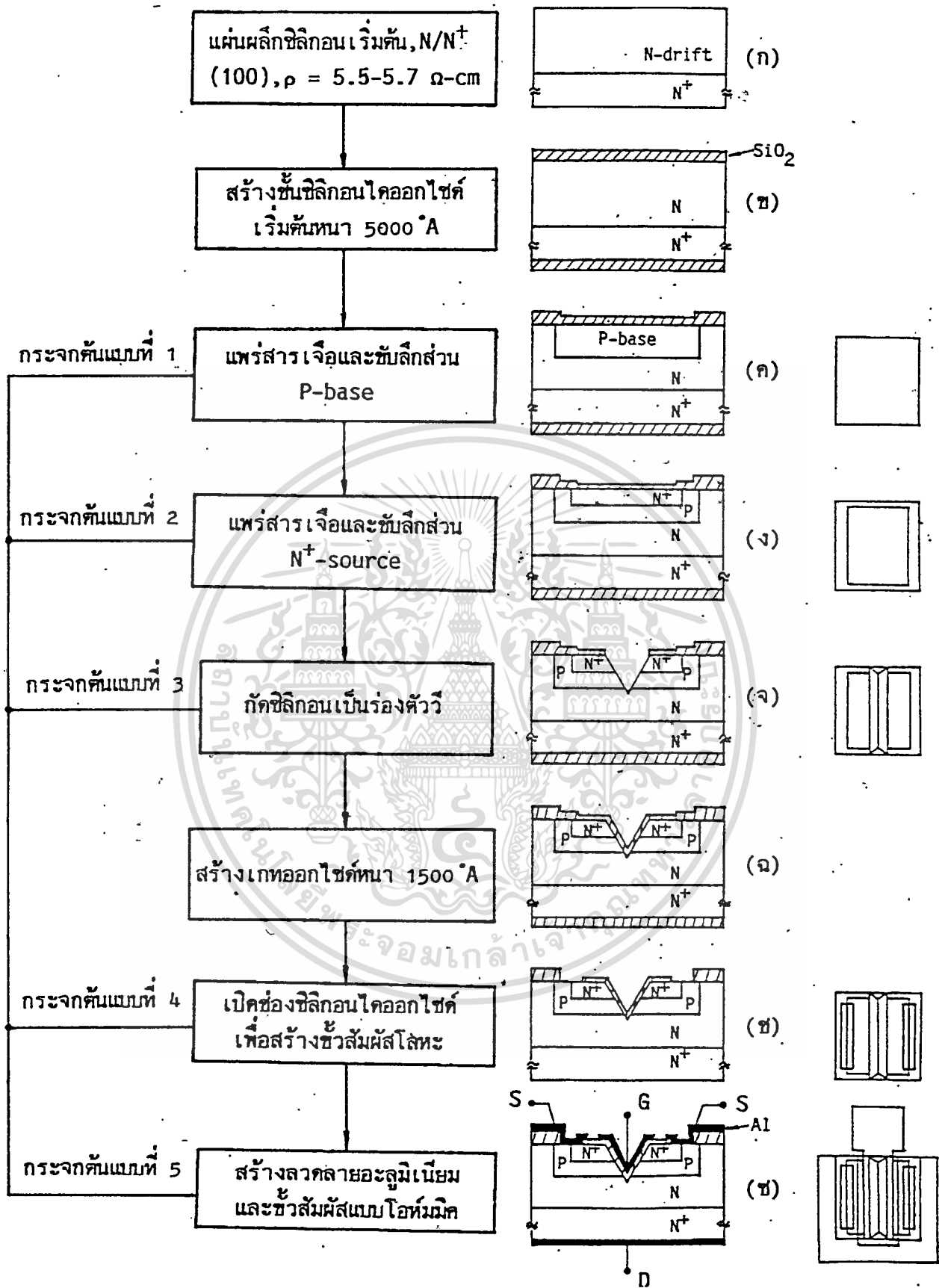
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางและภาพด้านบนแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอส

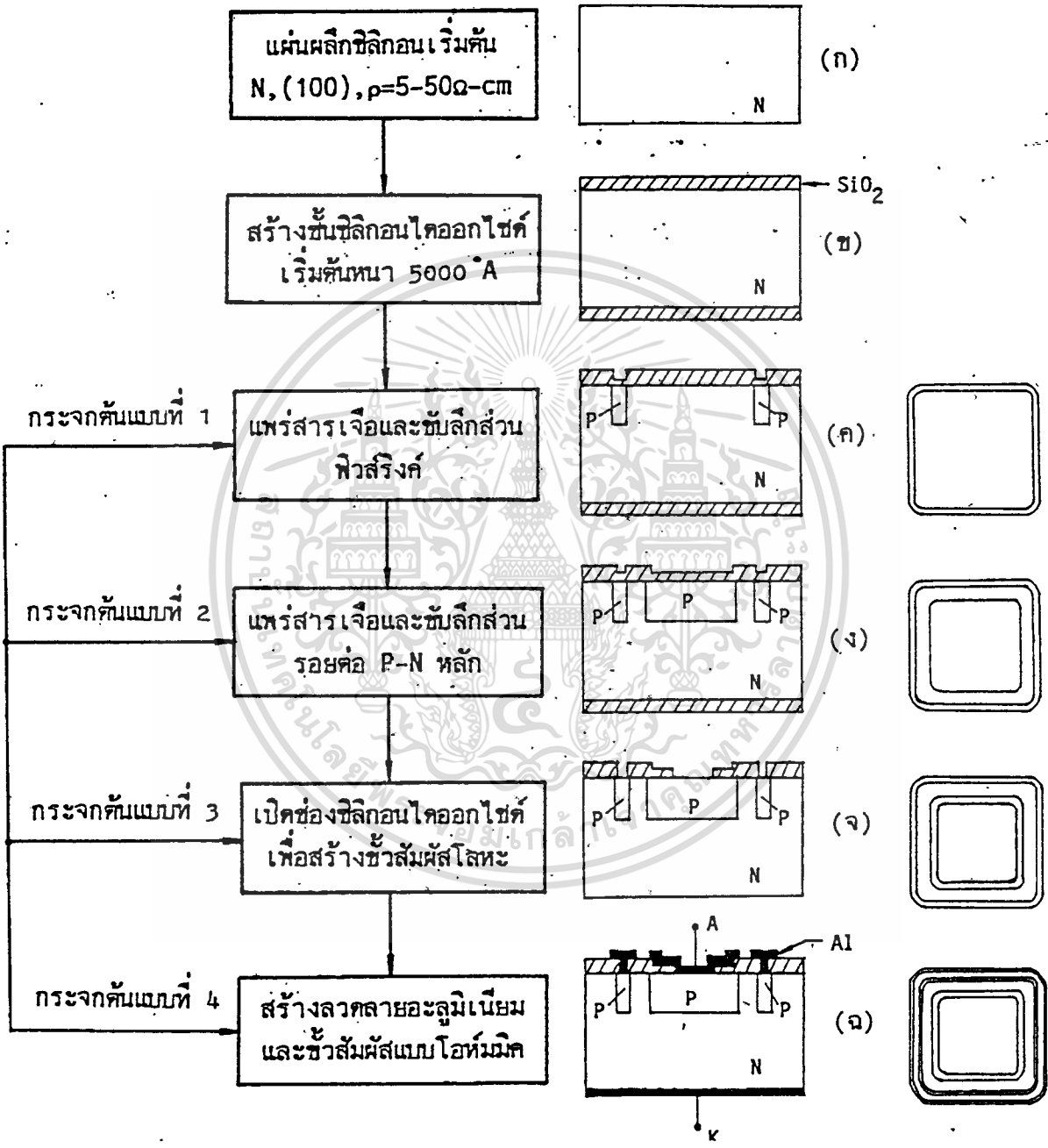
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางและภาพด้านบนแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส

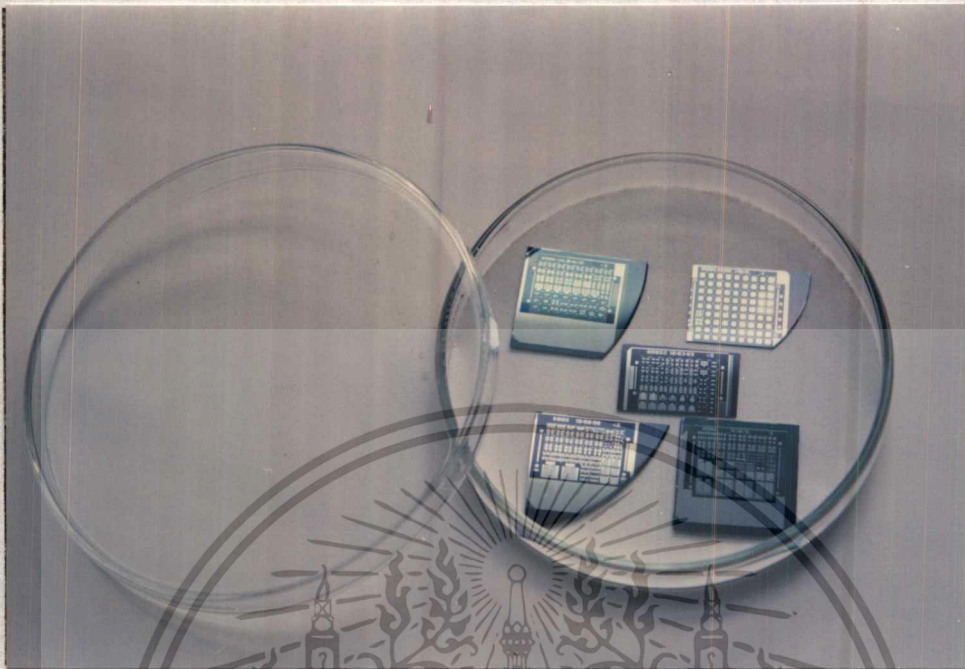
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



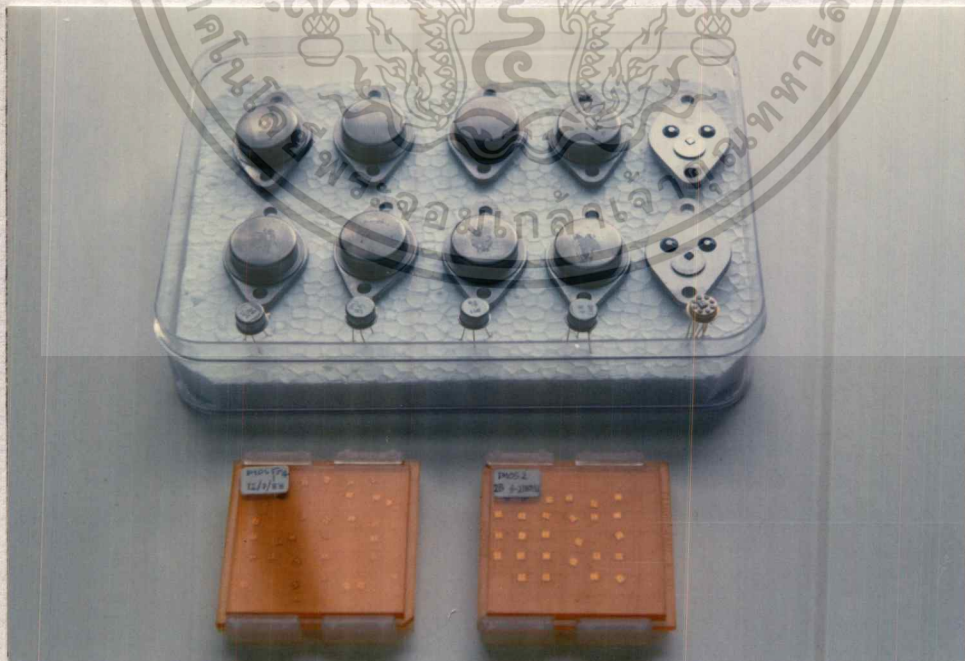
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางและภาพด้านบนแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 มอสเฟตกำลังแบบดีมอส, แบบวีมอสและ ไดโอดที่สร้างเสร็จแล้วบนแผ่นผลึกซิลิกอน



รูปที่ 4.10 ซิงที่ตัดแยกแล้วและเก็บบรรจุลงในตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 และ TO-5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลจากการทดลอง

จากคุณสมบัติทางไฟฟ้าหลักของมอสเฟตกำลังที่ต้องการให้มีการนำกระแส และแรงดันสูงได้พร้อมกันหรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ต้องการให้มีการทนกำลังได้สูง ๆ และยังต้องให้ผลการตอบสนองความถี่ที่สูงด้วย แต่ถ้าอุปกรณ์ที่ทำการศึกษาที่มีการนำกระแสสูง ๆ แล้วจะทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่มาก ซึ่งจะมีความยุ่งยากในการศึกษาคุณสมบัติของพารามิเตอร์พื้นฐานของมอสเฟตกำลัง เป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติบางประการที่แอบแฝงอยู่ทำให้ยากแก่การวิเคราะห์ นอกจากนี้การออกแบบมอสเฟตกำลังที่มีขนาดเล็กทำให้มีจำนวนอุปกรณ์มากขึ้น ซึ่งจะเป็นการยืนยันความถูกต้องของข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานเหล่านี้จึงได้ทำการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบวัดผลจากการทดลองจากมอสเฟตกำลังที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก (Small-signal DMOS and VMOS FET) ก่อน แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองไปทำการออกแบบและสร้างเป็นมอสเฟตที่มีกำลังสูงต่อไป

สำหรับมอสเฟตกำลังที่ได้สร้างขึ้นและวัดผลจากการทดลองทั้งหมดเป็นมอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดเท่านั้น โดยเริ่มสร้างขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 เป็นมอสเฟตกำลังแบบดีมอสซึ่งได้สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอน ระบาย (111) เพื่อทดสอบโครงสร้าง และการทำงานของดีมอส แต่เนื่องจากแผ่นผลึก ระบาย (111) มีความคล่องตัวของพาหะ (μ) ที่ผิวต่ำกว่าแผ่นผลึกระบาย (100) ทำให้การนำกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าต่ำเกินไปตามสมการที่ (2.16) และ (2.17) ดังนั้นในผลการทดลองตั้งแต่หัวข้อ 5.4 จึงได้สร้างมอสเฟตกำลังบนแผ่นผลึกซิลิกอน ระบาย (100) เท่านั้น

จากนั้นในปี พ.ศ. 1990 จึงได้ทำการออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของดีมอสที่สร้างขึ้น ซึ่งมีการนำกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า วีมอสที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าดีมอสประมาณ 3 เท่า ในขณะที่ใช้เนื้อที่ด้านบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีขนาดเท่ากัน ในกรณีของวีมอสนี้จะกล่าวเฉพาะวีมอสที่มีโครงสร้างขนาดเล็กเท่านั้น

5.1 การทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตพื้นฐานของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส

5.1.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นของดีมอส

การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นของดีมอส เป็นการแยกตรวจสอบคุณภาพโครงสร้างที่รอยต่อพี-เอ็นต่าง ๆ ว่าสมบูรณ์พอตามที่ได้ออกแบบสร้างไว้หรือไม่ โดยได้ทำการตรวจสอบดังนี้ คือ

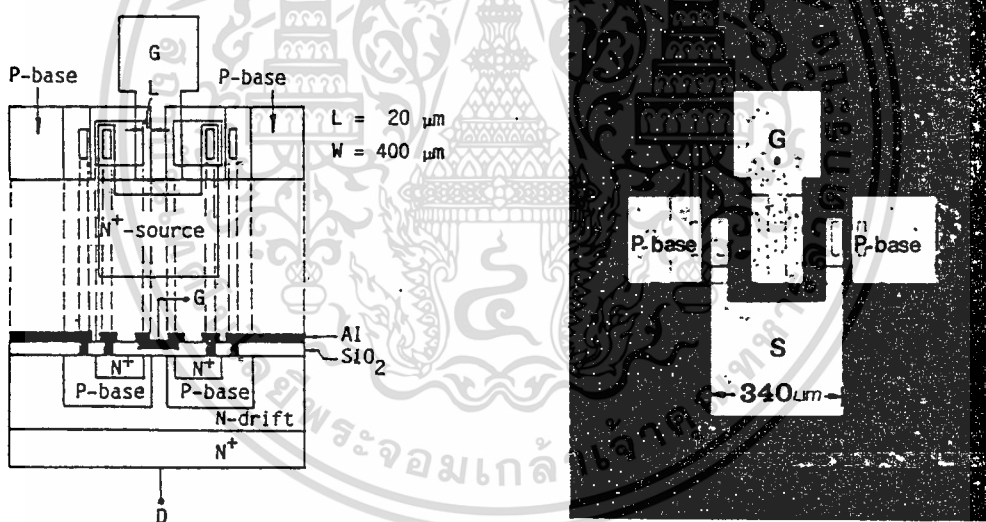
- ก. การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N^+ -source กับ P-base
- ข. การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง P-base กับ N-drift

การออกแบบและสร้าง

ในการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อของดีมอส จึงได้ทำการออกแบบดีมอส ให้มีขนาดของความยาว (L) และความกว้าง (W) ของช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับ $20\ \mu\text{m}$ และ $400\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังออกแบบให้ส่วนขั้วอะลูมิเนียมของส่วน N^+ -source แยกส่วนกับ P-base เพื่อจะได้วัดรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N^+ -source กับ P-base ได้

ในกระบวนการสร้าง เพื่อวัดคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นนี้ เป็นกระบวนการสร้างเริ่มต้นเหมือนกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 โดยเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนแบบอิมแพกเซียล N/N^+ ความหนาอิมแพกเซียล $20\ \mu\text{m}$ ระบาย (111) มีกััดความต้านทาน $8.2\ \Omega\text{-cm}$ นำมาสร้างเป็นดีมอส โดยแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P-base มีค่า $1.08 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N^+ -source มีค่า $1.54 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ แล้วจึงสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกต และซอส

ในรูปที่ 5.1 (ก) แสดงลวดลายด้านบนที่ออกแบบและภาพตัดขวางของดีมอส ซึ่งแสดงให้เห็นถึงรอยต่อที่ต้องการทดสอบ ส่วนรูปที่ 5.1 (ข) เป็นภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่ได้สร้างเสร็จแล้ว

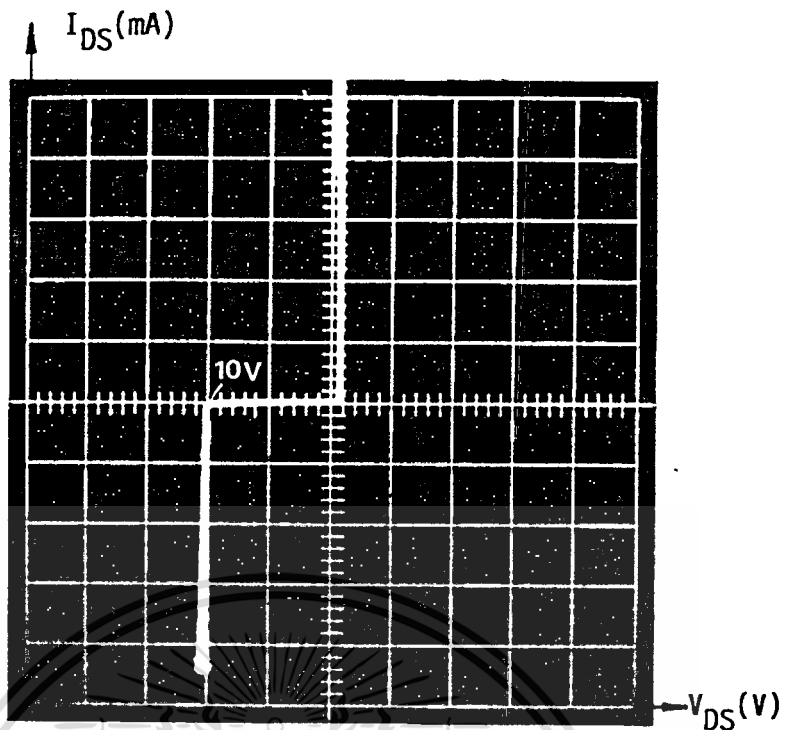


รูปที่ 5.1 (ก) ลวดลายต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบและภาพตัดขวางของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส
(ข) ภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่ได้สร้างเสร็จแล้ว ซึ่งมีขนาดของ $L = 20\ \mu\text{m}$ และ $W = 400\ \mu\text{m}$

การทดลอง และผลการทดลอง

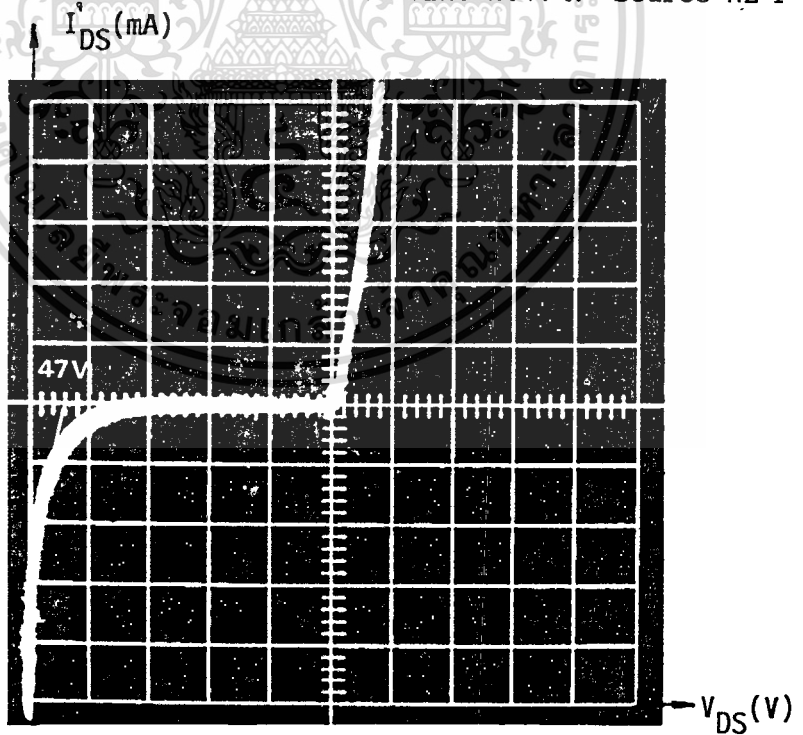
นำเอาดีมอส ที่ได้สร้างขึ้นมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ (Transistor Curve Tracer) ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ver. : 1 mA/div. , Hor. : 5 V/div.

รูปที่ 5.2 กราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N^+ -source กับ P-base



Ver. : 0.02 mA/div. , Hor. : 10 V/div.

รูปที่ 5.3 กราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง P-base กับ N-drift

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงให้เห็นว่ารอยต่อทั้งสอง คือ รอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N^+ -source กับ P-base และ P-base กับ N-drift ที่สร้างขึ้นมีความสมบูรณ์ดีพอที่จะสร้างเป็นดีมอส ซึ่งในการออกแบบดีมอสความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน N^+ -source (N_D) จะมีค่าสูง (โดยปกติแล้ว N^+ มีค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือ $> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) เพื่อให้ค่าความต้านทานในส่วน N^+ -source มีค่าต่ำ เมื่อนำผลที่ได้จากกระบวนการสร้างมาคำนวณในสมการที่ (5.1) คือ

$$N = 1/q\mu_e \rho_{Exp} \dots\dots (5.1)$$

เมื่อ ρ_{Exp} คือ นิกัดความต้านทานจากการทดลอง = $\rho_s \cdot x_j$
 x_j คือ ความลึกของรอยต่อ (cm)*

จากการคำนวณจะได้ $N_D = 1.54 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ แสดงว่าการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในส่วนของ N^+ -source เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ผลที่ได้นี้ทำให้แรงดันพังทลายของรอยต่อระหว่าง N^+ -source กับ P-base มีค่าต่ำ จากในรูปที่ 5.2 พบว่าแรงดันพังทลายมีค่าเท่ากับ 10 โวลต์ ในกรณีของดีมอสผลของรอยต่อนี้ไม่ได้มีความสำคัญมากนัก เนื่องจากโครงสร้างของดีมอสส่วน N^+ -source กับ P-base จะเชื่อมต่อกันด้วยอะลูมิเนียม ทำให้ศักย์ไฟฟ้าในส่วนทั้งสองมีค่าเท่ากันตลอดเพื่อหลีกเลี่ยงคุณสมบัติแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ส่วนความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base (N_A) จากกระบวนการสร้างจะมีค่าเท่ากับ $1.08 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

สำหรับรอยต่อ P-base กับ N-drift เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างที่ 5.1(ก) รอยต่อนี้จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ ซึ่งจะเหมือนกับรอยต่อคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (C-E) ในกรณีของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ในรูปที่ 5.3 พบว่ารอยต่อ P-base กับ N-drift สามารถทนแรงดันได้ถึง 47 โวลต์ นอกจากนี้ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ผิวในส่วน P-base ยังเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องกำหนดการแพร่สารเจือในส่วน P-base ให้มีค่าแน่นอนจึงจะทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับรายละเอียดของเรื่องทั้งสองนี้จะกล่าวต่อไป

5.1.2 การทดสอบการทำงานของดีมอสในลักษณะของทรานซิสเตอร์

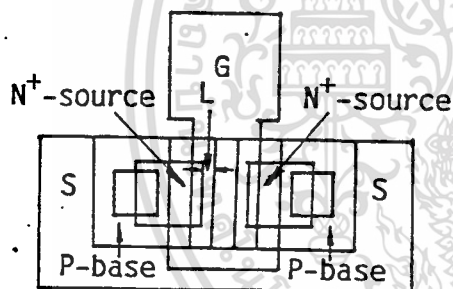
เพื่อเป็นการทดสอบว่าโครงสร้างทางเรขาคณิตของดีมอสที่สร้างขึ้นมาสามารถทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้ โดยการทดสอบออกมาในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS})

* วิธีการหาความลึกของรอยต่อ แสดงในภาคผนวก ค.

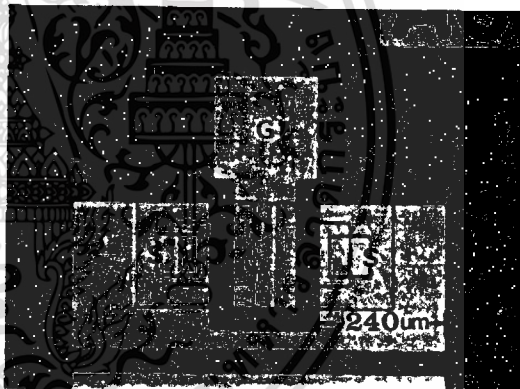
การออกแบบและสร้าง

ในการศึกษาในหัวข้อนี้ได้ออกแบบดีมอส ให้มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นในหัวข้อ 5.1.1 ซึ่งดีมอสมีขนาดความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ $10\ \mu\text{m}$ และ $400\ \mu\text{m}$ ตามลำดับและออกแบบให้ส่วน N^+ -source กับ P-base ต่อเข้าด้วยกันด้วยโลหะอะลูมิเนียม เพื่อกำจัดผลของคุณสมบัติแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลในแนวตั้งผ่านรอยต่อ N^+ -P-N ได้ นอกจากกระแสรั่วไหล เนื่องจากพาหะส่วนน้อยเท่านั้น

กระบวนการสร้างของดีมอส เพื่อทดสอบการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ ได้ใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 เลือกแผ่นผลึกซิลิกอนแบบอินเทกเซียล N/N^+ ความหนาอินเทกเซียล $20\ \mu\text{m}$ ระนาบ (111) พิกัดความต้านทาน $8.2\ \Omega\text{-cm}$ อย่างไรก็ตามดีมอสที่สร้างขึ้นนี้จะอยู่บนแผ่นผลึกเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 5.1.1 ในรูปที่ 5.4 เป็นภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่ได้สร้างเสร็จแล้ว



$$L = 10\ \mu\text{m},\ W = 400\ \mu\text{m}$$



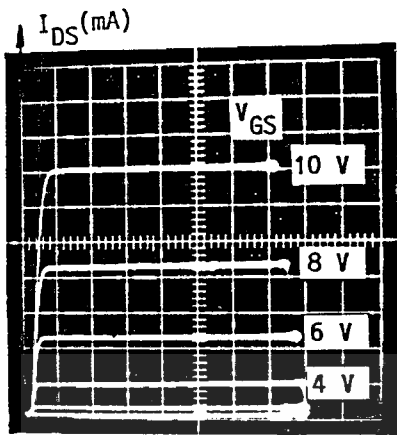
รูปที่ 5.4 (ก) ลวดลายต้นแบบของดีมอสที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อวัดการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์

(ข) ภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่ได้สร้างเสร็จแล้ว ซึ่งมีขนาดของ $L = 10\ \mu\text{m}$ และ $W = 400\ \mu\text{m}$

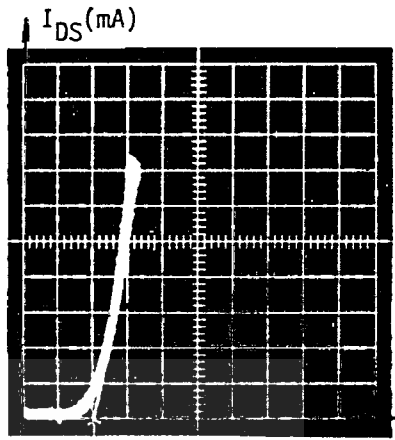
การทดลองและผลการทดลอง

นำเอาดีมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน กับ แรงดันเดรน-ซอส โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$V_{DS}(V)$



$V_T = 2.0 V$

$V_{DS}(V)$

Ver. : 0.1 mA/div., Hor. : 5 v/div.

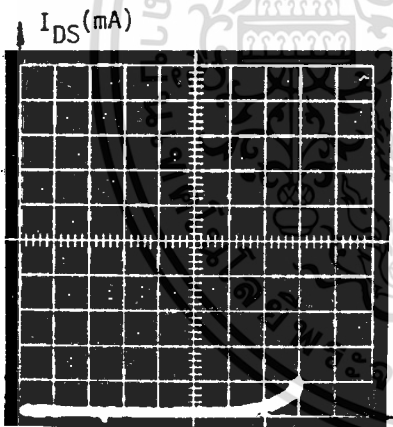
Ver. : 0.05 mA/div.

Step : 2 V , No. of step : 5

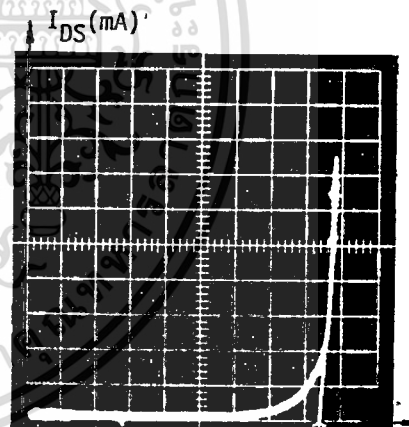
Hor. : 1 V/div.

(ก)

(ข)



$I_{DSS} = 6 \mu A$ $V_{DS}(V)$



$V_{BV} = 42. V$ $V_{DS}(V)$

Hor. : 0.02 mA/div.

Hor. : 0.02 mA/div.

Ver. : 5 V/div.

Ver. : 5 V/div.

(ค)

(ง)

รูปที่ 5.5 (ก) กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส

(ข) แสดงแรงดันขีดเริ่ม

(ค) แสดงกระแสรั่วไหล วัดที่ $V_{GS} = 0 V$, $V_{DS} = 35 V$

(ง) แสดงแรงดันพังทลาย วัดที่ $V_{GS} = 0 V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.5 (ก) แสดงว่าดีมอสที่สร้างขึ้นสามารถทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดี และสามารถนำดีมอสไปใช้งานในวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าได้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีค่าทรานคอนดักแตนซ์ ($G_{m_{sat}}$) เท่ากับ 0.13 mS (วัดที่ $V_{GS} = 10$ V และ $V_{DS} = 15$ V) และความต้านทานในภาวนำกระแส (R_{ON}) เท่ากับ 430 Ω ในรูปที่ 5.5 (ข) เป็นการวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) มีค่าเท่ากับ 2.0 V ส่วนรูปที่ 5.5 (ค) และ (ง) เป็นการวัดค่ากระแสรั่วไหล (I_{DSS}) และ แรงดันพังทลาย (V_{BV}) ตามลำดับ ซึ่งกระแสรั่วไหลส่วนใหญ่จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่ไหลผ่านบริเวณปลดพาหะของรอยต่อ P-base กับ N-drift เนื่องจากกรไบอัสย้อนกลับที่มีค่าสูงขึ้นกระแสรั่วไหลนี้เท่ากับ 6 μA (วัดที่ $V_{GS} = 0$ V และ $V_{DS} = 35$ V) ส่วนแรงดันพังทลายที่ได้ในรูปที่ 5.5 (ง) มีค่าเท่ากับ 42 V (วัดที่ $V_{GS} = 0$ V)

5.2 การศึกษาความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส

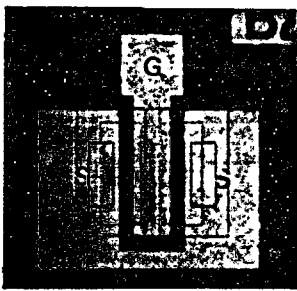
การศึกษาความกว้าง และความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างดีมอสให้มีคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าที่สูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่ง นอกจากนี้ยังศึกษาถึงขีดจำกัดในการออกแบบและสร้างความยาวของช่องทางเดินกระแสจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและเทคนิคการแพร่สาร เพื่อด้วยความร้อนด้วย

การออกแบบและสร้าง

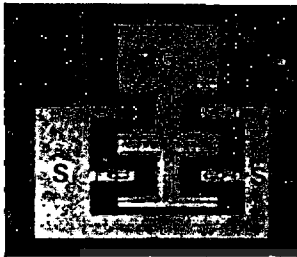
ในการศึกษาความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อดีมอส จึงได้ทำการออกแบบดีมอสที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสแตกต่างกัน 2 ชุด โดยชุดแรกให้มีความกว้างของช่องทางเดินกระแสแสดงที่ 200 μm ส่วนความยาวของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 6, 10, 20 และ 40 μm ส่วนชุดที่สองมีความยาวของช่องทางเดินกระแสแสดงที่ 10 μm ส่วนความกว้างของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 200, 400, 1000, 1600, 2800 และ 12040 μm

กระบวนการสร้าง เพื่อศึกษาผลของความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานที่กล่าวในบทที่ 4 โดยสร้างดีมอสบนแผ่นผลึกแบบอินทิเกรตเชิงซิล N/N^+ ความหนาของอินทิเกรตเชิงซิล 20 μm ระนาบ (111) พิกัดความต้านทาน 8.2 Ω -cm แล้วทำการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P-base มีค่า 1.0×10^{17} cm^{-3} และสารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N^+ -source มีค่า 1.54×10^{18} cm^{-3} จากนั้นจึงสร้างเกตออกไซด์และซิวส์สัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกต และซอส ในรูปที่ 5.6 เป็นตัวอย่างภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่สร้างขึ้น สำหรับศึกษาในหัวข้อนี้

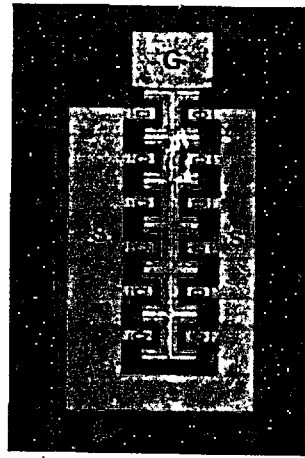
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



L = 10 μm
W = 1000 μm



L = 10 μm
W = 1600 μm

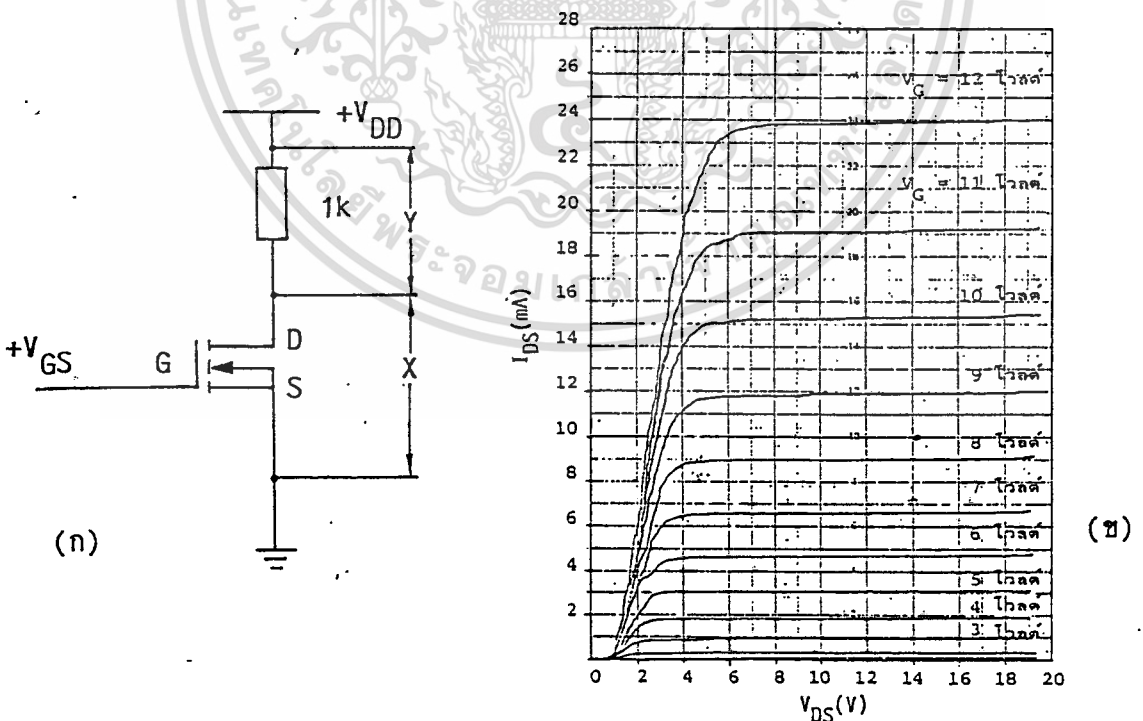


L = 10 μm
W = 2880 μm

รูปที่ 5.6 ตัวอย่างภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่ได้สร้างขึ้น

การทดลองและผลการทดลอง[18]

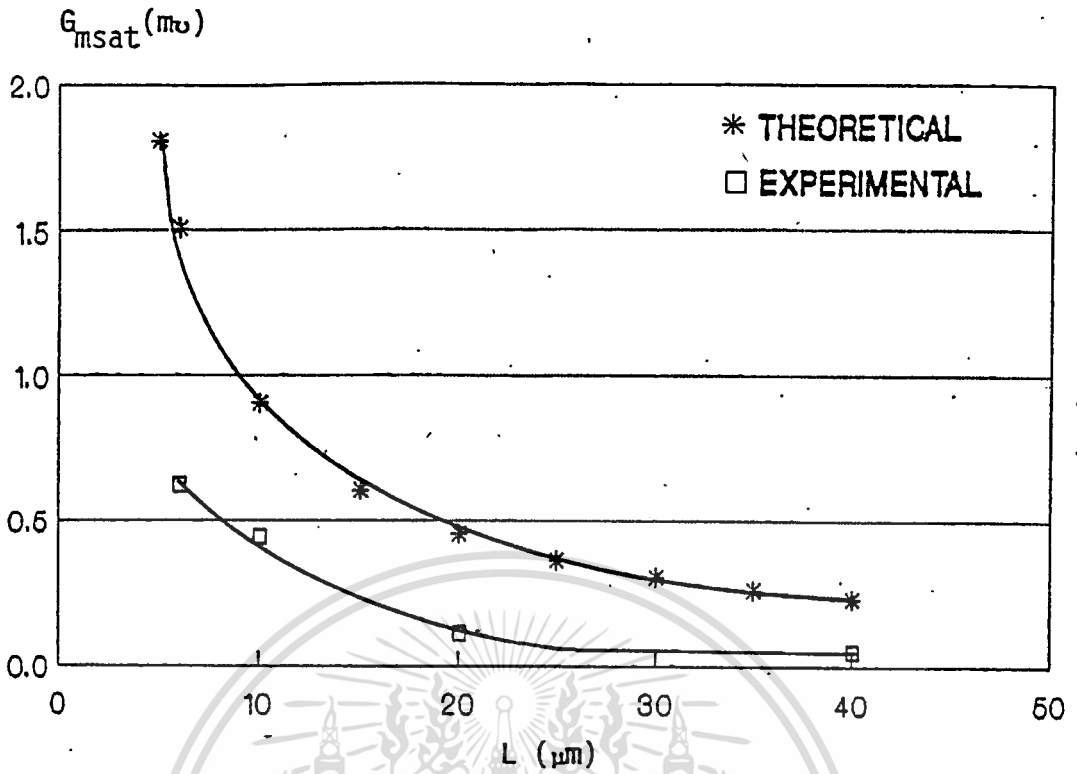
นำเอาดีมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส โดยนำไปต่อร่วมกับเครื่องเขียนกราฟ (x-y recorder) ดังวงจรในรูปที่ 5.7 (ก) และจะได้กราฟในรูปที่ 5.7 (ข) จากนั้นนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ ทรานคอนดักแตนซ์, ความต้านทานในภาวะนำกระแส เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.8, 5.9, 5.10 และ 5.11



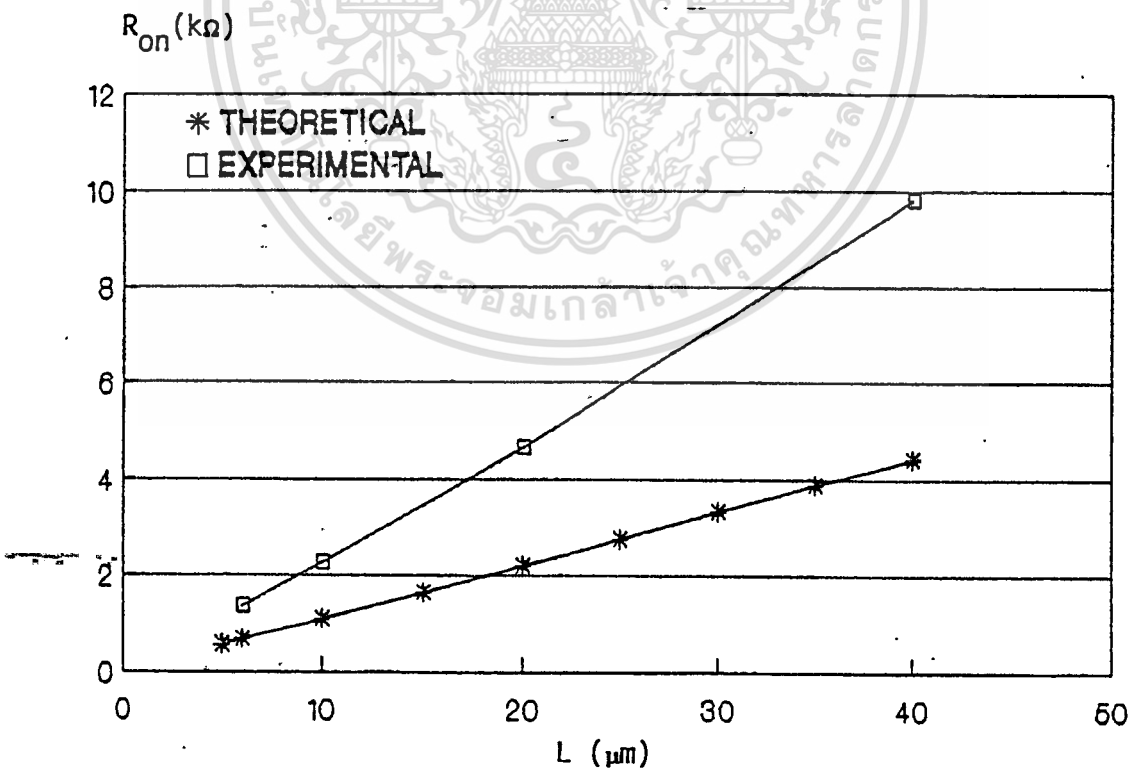
รูปที่ 5.7 (ก) วงจรวัดความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} จากเครื่องเขียนกราฟ

(ข) ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ของดีมอส $L=10 \mu m$, $W=2880 \mu m$

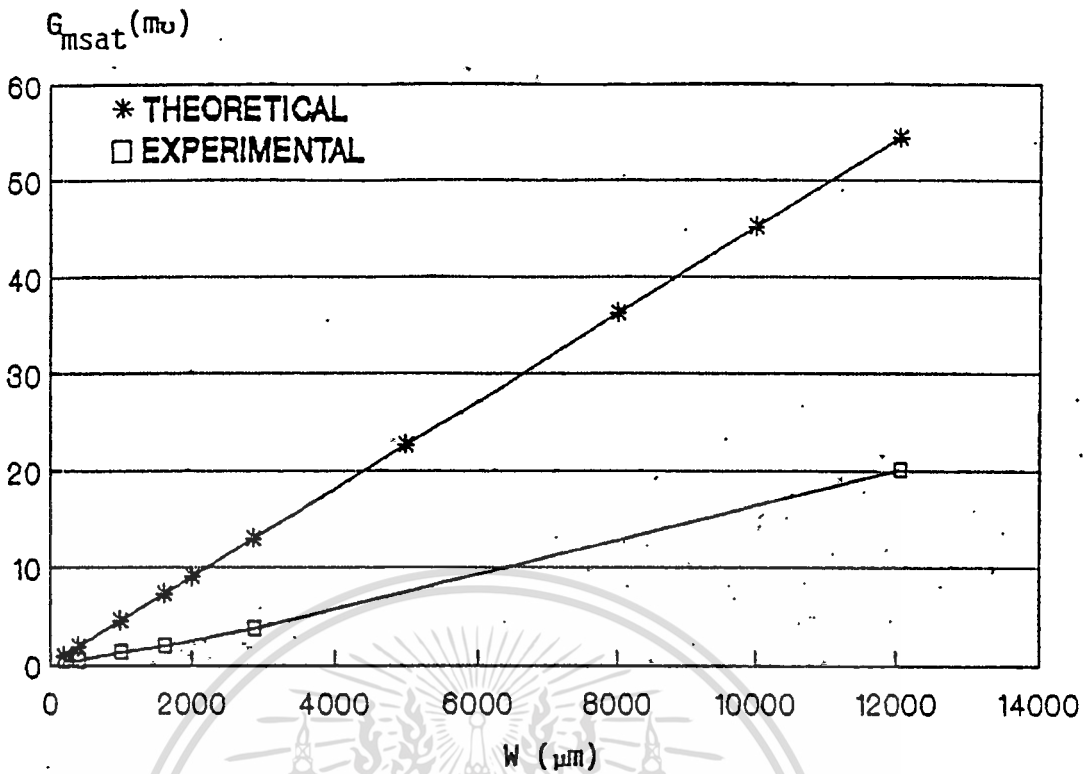
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



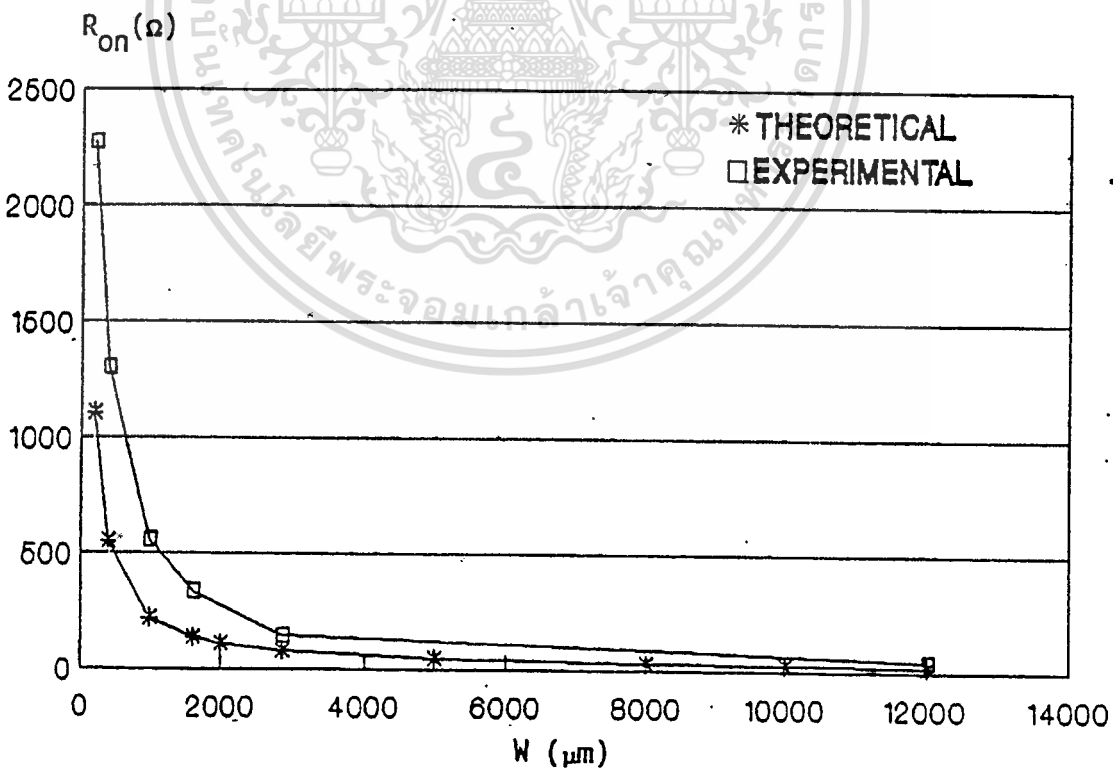
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{msat} กับ L จากการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณของดีมอสที่มีขนาด $W = 200 \mu\text{m}$ เมื่อวัดที่ $V_{DS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 10 \text{ V}$



รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{on} กับ L จากการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณของดีมอสที่มีขนาด $W = 200 \mu\text{m}$ เมื่อวัดที่ $V_{DS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 10 \text{ V}$



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{msat} กับ W จากการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณของดีมอสที่มีขนาด $L = 10 \mu\text{m}$ เมื่อวัดที่ $V_{DS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 10 \text{ V}$



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{on} กับ W จากการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณของดีมอสที่มีขนาด $L = 10 \mu\text{m}$ เมื่อวัดที่ $V_{DS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 10 \text{ V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ของ G_{msat} เมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลง จาก 6 ถึง 40 μm โดยที่ความกว้างของช่องทางเดินกระแสคงที่ที่ 200 μm ดังแสดงในรูปที่ 5.8 พบว่า G_{msat} จะเปลี่ยนแปลงลดลงในลักษณะไฮเปอร์โบลากับการเพิ่มขึ้นของความยาวของช่องทางเดินกระแส ซึ่ง G_{msat} นี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.620-0.049 $m\Omega$ *

ส่วนค่า R_{on} ในกราฟรูปที่ 5.9 จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความยาวของช่องทางเดินกระแสในแบบเชิงเส้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1369.9-9800 Ω *

จากกราฟความสัมพันธ์ของ G_{msat} เมื่อความกว้างของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปจาก 400 ถึง 12040 μm โดยที่ความยาวของช่องทางเดินกระแสคงที่ที่ 10 μm ดังแสดงในรูปที่ 5.10 พบว่า G_{msat} จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความกว้างของช่องทางเดินกระแสในแบบเชิงเส้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.427-20.10 $m\Omega$ *

ส่วนกราฟของ R_{on} ที่แสดงในรูปที่ 5.11 พบว่า R_{on} จะเปลี่ยนแปลงลดลงในลักษณะไฮเปอร์โบลากับการเพิ่มขึ้นของความกว้างของช่องทางเดินกระแส ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 555.55-38.40 Ω *

จากการคำนวณในทางทฤษฎีจากสมการที่ (2.22) และ (2.24) เพื่อการเปลี่ยนแปลงของ G_{msat} และ R_{on} เมื่อความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไป โดยเทียบกับผลการทดลองในทางปฏิบัติ พบว่ามีค่าแตกต่างกันประมาณ 3 เท่าเป็นผลเนื่องจากมีความต้านทานในเนื้อสารส่วนอื่นมากเกินไป ซึ่งในการคำนวณไม่ได้คำนึงถึง เพราะการคำนวณจะพิจารณาเพียงแต่ความต้านทานในส่วนช่องทางเดินกระแสเท่านั้น แต่ในลักษณะโครงสร้างของดีมอสนอกจากจะมีกระแสไหลผ่านช่องทางเดินกระแสในแนวนอนแล้ว กระแสส่วนนี้ยังจะต้องไหลผ่านเนื้อสารในแนวตั้งไปยังส่วนเดรนด้วย

สำหรับขีดจำกัดจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี พบว่าจะมีผลต่อการสร้างดีมอสที่มีความยาวช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ เท่านั้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การออกแบบความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 10 μm ทำให้ดีมอสทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีและได้จำนวนผลผลิต (yeild) สูง อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ก็ได้ออกแบบความยาวของช่องทางเดินกระแสให้สั้นถึง 6 μm พบว่าผลผลิตที่ได้มีค่าต่ำลง และจะมีปัญหาอย่างมากในการออกแบบให้เป็นชิพขนาดใหญ่ ดังนั้นในการออกแบบและสร้างในครั้งต่อ ๆ ไปจึงให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 10 μm

ดังนั้นจากผลการทดลองจะสรุปได้ว่า ลักษณะโครงสร้างของดีมอส แบบอื่นเช่นเนลเอ็นฮานเมนต์โหนดที่สร้างขึ้นสามารถนำไปออกแบบสร้างในลักษณะอุปกรณ์กำลังได้ดี โดยการกำหนดส่วนความกว้างของช่องทางเดินกระแสต่าง ๆ และความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ ซึ่งจะมีผลทำให้ดีมอสที่สร้างขึ้นมีทรานคอนดักแตนซ์สูงขึ้น ส่วนความต้านทานในภาชนะนำกระแสจะมีค่าต่ำลง

* วัดค่าที่แรงดันเกต-ซอส (V_{GS}) = 10 V.

5.3 การเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนที่เหมาะสมกับดีมอส

การพิจารณาการเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นให้เหมาะสมมีความสำคัญมาก ซึ่งทำให้มอสเฟตกำลังทำงานได้มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะในเรื่องการนำกระแสไฟฟ้าได้สูง ๆ ซึ่งจะพบว่า การสร้างดีมอสบนระนาบ (100) จะให้การนำกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าระนาบ (111) ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1 ซึ่งเป็นผลมาจากความคล่องตัว (mobility : μ) ของพาหะที่ผิวของระนาบ (100) จะมีค่าสูงกว่าของระนาบ (111) สำหรับในการทดลองนี้จะแสดงให้เห็นว่าความคล่องตัวของพาหะที่ผิว (อิเล็กตรอน) ของระนาบ (100) มีค่าสูงกว่าระนาบ (111)

จากสมการที่ (2.19) เราสามารถตัดเทอม V_{DS} ได้ เนื่องจากการหาค่าความคล่องตัวของพาหะจะพิจารณาในช่วง V_{DS} น้อย ๆ ดังนั้นจึงหาความคล่องตัวของอิเล็กตรอนได้เป็น

$$\mu_n(\text{eff}) = \frac{g_{ds}(L/W)}{C_{OX}(V_{GS} - V_T)} \quad \dots\dots(5.2)$$

เมื่อ $\mu_n(\text{eff})$ คือ ความคล่องตัวที่แท้จริง (effective mobility) ของอิเล็กตรอนในดีมอส เนื่องจากการไหลของอิเล็กตรอนในดีมอสจะไหลทั้งในแนวระดับที่ผิว และในเนื้อสารของผลึกซิลิกอน

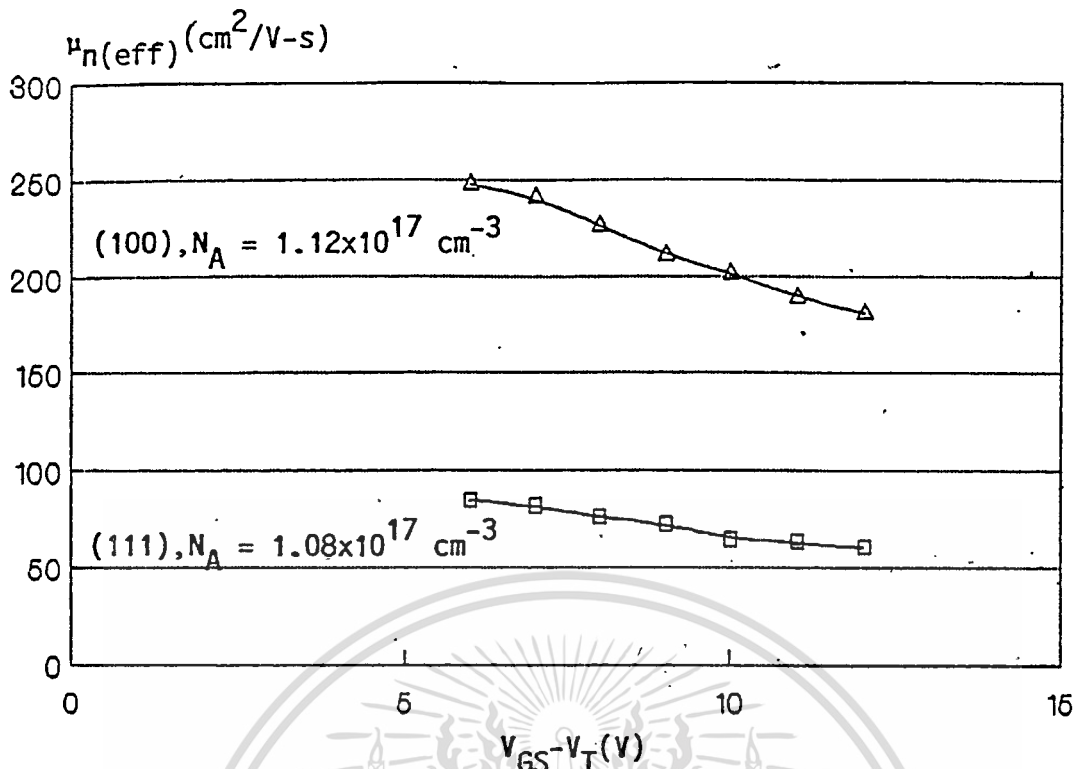
การออกแบบและสร้าง

ในการศึกษาเรื่องนี้ได้ทำการออกแบบดีมอส ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกันกับในรูปที่ 5.4 (หัวข้อที่ 5.1.2) แต่มีขนาดความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ $10 \mu\text{m}$ และ $400 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

กระบวนการสร้างดีมอสบนระนาบ (111) จะเหมือนกับในหัวข้อที่ 5.2 ส่วนดีมอสที่สร้างบนระนาบ (100) จะสร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอน แบบอินทิเกรต เชียล N/N^+ ความหนาของอินทิเกรต เชียล $20 \mu\text{m}$ พิกัดความต้านทาน $8-10 \Omega\text{-cm}$ แล้วแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P-base เท่ากับ $1.12 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N^+ -source เท่ากับ $1.53 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ แล้วจึงสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกต และซอส

การทดลองและผลการทดลอง

นำเอาดีมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส โดยใช้วงจรในรูปที่ 5.7 (ก) จากนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าความคล่องตัวที่แท้จริงตามสมการที่ (5.2) แล้วจึงนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนกับแรงดัน $V_{GS} - V_T$ ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนกับแรงดัน

$V_{GS} - V_T$ ของดีมอสที่สร้างบนผลึกระนาบ (100) กับระนาบ (111)

จากผลการทดลองรูปที่ 5.12 พบว่า ความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนของระนาบ (100) และ (111) มีค่าลดลง เมื่อแรงดัน $V_{GS} - V_T$ มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนที่ $V_{GS} - V_T = 10$ V ของระนาบ (100) จะมีค่าเท่ากับ $201 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ส่วนความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนในระนาบ (111) จะมีค่าเท่ากับ $64 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ดังนั้นความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนของระนาบ (100) จะมีค่ามากกว่าระนาบ (111) ประมาณ 3 เท่า

ผลึกซิลิกอนระนาบ (100) นอกจากจะมีความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่สูงกว่าระนาบ (111) และยังมีอีกว่า หลังจากสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ประจุที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ (Q_{SS}) ของระนาบ (100) จะมีค่าต่ำกว่าของระนาบ (111) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการควบคุมแรงดันขีดเริ่ม ดังนั้นถ้าให้สารเจือในส่วน P-base เท่ากับ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ จะได้แรงดันขีดเริ่มจากการคำนวณของระนาบ (100) เท่ากับ 2.67 V ส่วนระนาบ (111) เท่ากับ 0.76 V (Q_{SS} ที่ใช้ในการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก) ซึ่งแรงดันขีดเริ่มที่ได้จากระนาบ (111) มีค่าต่ำ ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน ดังนั้นถ้าต้องการให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าสูงขึ้นจะต้องแพร่สารเจือส่วน P-base ให้มากขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสร้างสูงขึ้น สำหรับในการทดลองนี้ไม่ได้พิจารณาผลของ Q_{SS} เนื่องจากมีความยุ่งยากในเทคนิคการวัด

ดังนั้นจากผลการทดลองจะสรุปได้ว่า การเลือกแผ่นผลึกระนาบ (100) เป็นแผ่นผลึกเริ่มต้นจะทำให้ดีมอสที่สร้างขึ้นนำกระแสไฟฟ้าได้สูงขึ้นกว่าการเลือกระนาบ (111) ถึง 3 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การศึกษาการควบคุมและการเปลี่ยนแปลงแรงดันขั้วเริ่มของดีมอส

เนื่องจากการสร้างดีมอสที่ผ่านมา พบว่าแรงดันขั้วเริ่มที่ได้มีค่ากระจายอยู่ระหว่าง 0-4.8 V [18],[20] เพื่อที่จะควบคุมแรงดันขั้วเริ่มให้มีค่าอยู่ในช่วง 2-4 V ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการควบคุมแรงดันขั้วเริ่ม โดยวิธีการควบคุมความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

5.4.1 การควบคุมแรงดันขั้วเริ่มของดีมอส โดยวิธีการควบคุมความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

ในกรณีของดีมอสที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งแสดงโครงสร้างตัดขวางในรูปที่ 5.1 ส่วนของช่องทางเดินกระแสจะอยู่ที่บริเวณผิวของส่วน P-base ได้ส่วนเกต และเมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการที่ (2.6) พบว่าแรงดันขั้วเริ่มแปรโดยตรงกับรากที่สองของความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base (N_A) ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base แรงดันขั้วเริ่มที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย

การออกแบบและสร้าง

ในการควบคุมแรงดันขั้วเริ่ม โดยวิธีการควบคุมความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base จึงได้ทำการออกแบบดีมอส ซึ่งมีโครงสร้างและขนาดเดียวกันกับในรูปที่ 5.4 (หัวข้อที่ 5.1.2) มีความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 20 μm และ 400 μm ตามลำดับ กระบวนการสร้างในการศึกษานี้ได้ใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานในบทที่ 4 โดยการเลือกแผ่นพอลิซิลิกอน แบบอินทิเกรตชนิด N^+/N^+ ความหนาอินทิเกรตชนิด 20 μm ระบาย (100) นิกัดความต้านทาน 5.5-5.7 $\Omega\text{-cm}$ นำมาสร้างเป็นดีมอส โดยแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P-base เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $5.1 \times 10^{16} - 3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 จากนั้นแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N^+ -source เท่ากับ $1.53 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ โดยมีความลึกของรอยต่อส่วน P-base และ N^+ -source เท่ากับ 3.5 μm และ 1.5 μm ตามลำดับ แล้วจึงสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกต และซอร์ส

ตารางที่ 5.1 แสดงการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P-base 4 ชุด

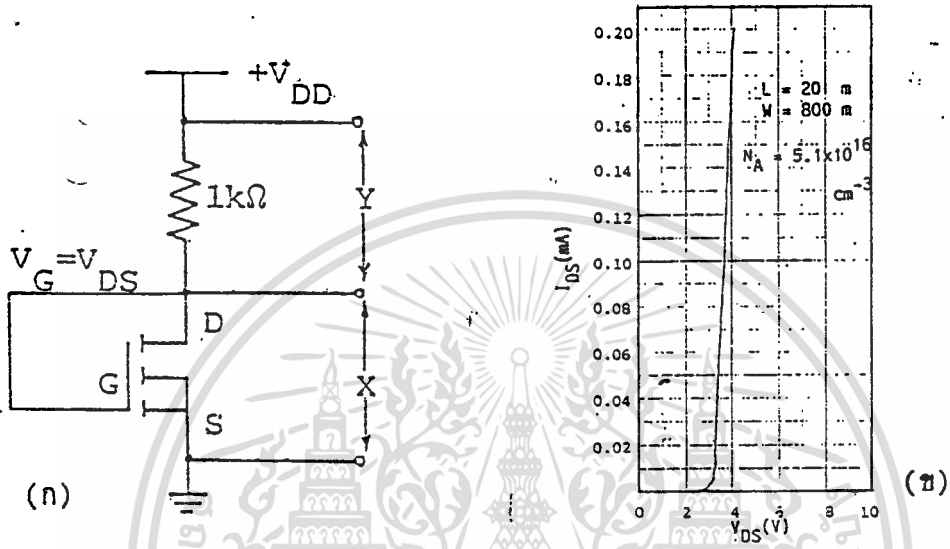
แผ่น	การแพร่สารเจือ		การขับลึก		อะตอมสารเจือโบรอน (cm^{-3})
	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา(ชม.)	
A	820	20	1100	14	5.1×10^{16}
B	850	20	1100	14	1.1×10^{17}
C	880	20	1100	14	1.7×10^{17}
D	910	20	1100	14	3.7×10^{17}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

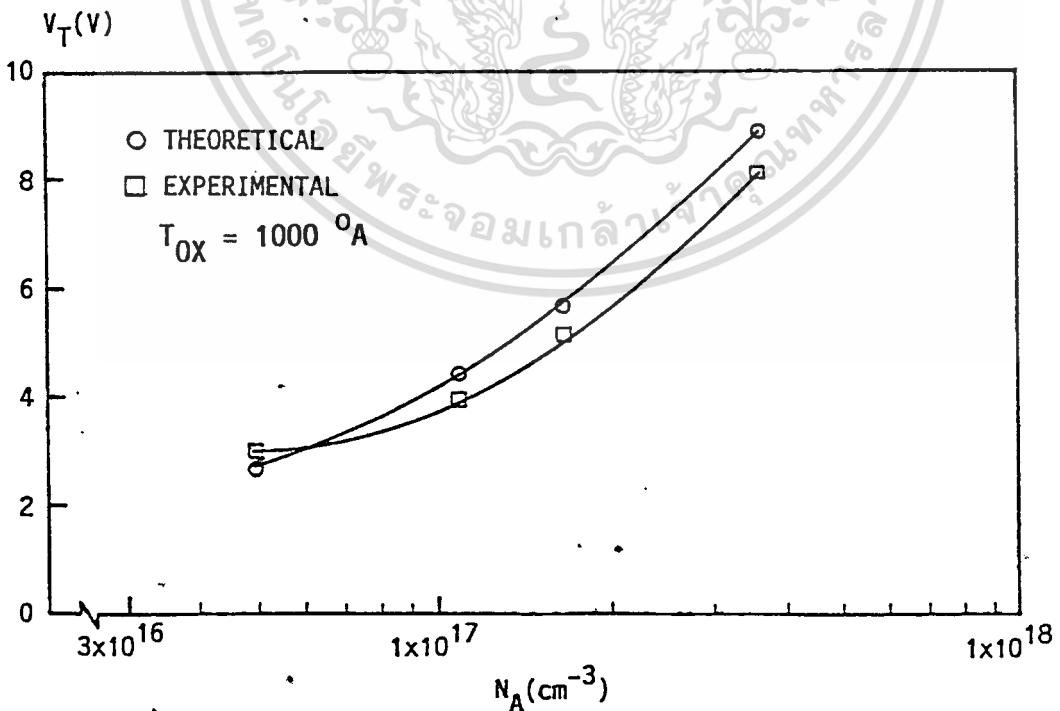
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและผลการทดลอง[19]

นำดีมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเกต (V_{GS}) เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยวิธี $\sqrt{I_D}$ กับ V_G โดยต่อวงจรในรูปที่ 5.13 (ก) และได้ตัวอย่างการวัดดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ข) แล้วนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} จากนั้นลากเส้นตรงจากกราฟลงมาตัดแกน V_{GS} ที่จุดตัดแกนนี้จะเป็นค่าแรงดันขีดเริ่ม สำหรับผลการทดลองการควบคุมแรงดันขีดเริ่ม แสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 (ก) วงจรวัดความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม
 (ข) ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ที่ได้จาก (ก)



รูปที่ 5.14 แรงดันขีดเริ่มที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะพบว่า ดิมอสที่สร้างขึ้น โดยมีค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำบริเวณได้ส่วนเกณฑ์ต่าง ๆ กัน คือ 5.1×10^{16} , 1.1×10^{17} , 1.7×10^{17} และ $3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ทำให้แรงดันขีดเริ่มของดิมอสเป็น 3.0, 4.0, 5.2 และ 8.2 V ตามลำดับ และเมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี (จากสมการที่ (2.6)) ซึ่งแรงดันขีดเริ่มจะกระจายตั้งแต่ 2.71-8.96 V โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของการควบคุมจากการทดลองแตกต่างจากการคำนวณประมาณ 10 %

5.4.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่มของดิมอส

นอกจากสมการพื้นฐานที่ (2.6) ซึ่งความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base จะเป็นตัวกำหนดแรงดันขีดเริ่มแล้ว ยังมีพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์นี้ คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแสลื่น ๆ

ถึงแม้การออกแบบให้ดิมอสมีความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) ลื่น ๆ จะทำให้ดิมอสสามารถนำกระแสเดรนได้สูงขึ้น และให้ผลการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์สูงขึ้นด้วย แต่การออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสลื่น ๆ นี้จะส่งผลกระทบต่อแรงดันขีดเริ่ม ทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าลดลงเป็นไปตามสมการที่ (2.9)

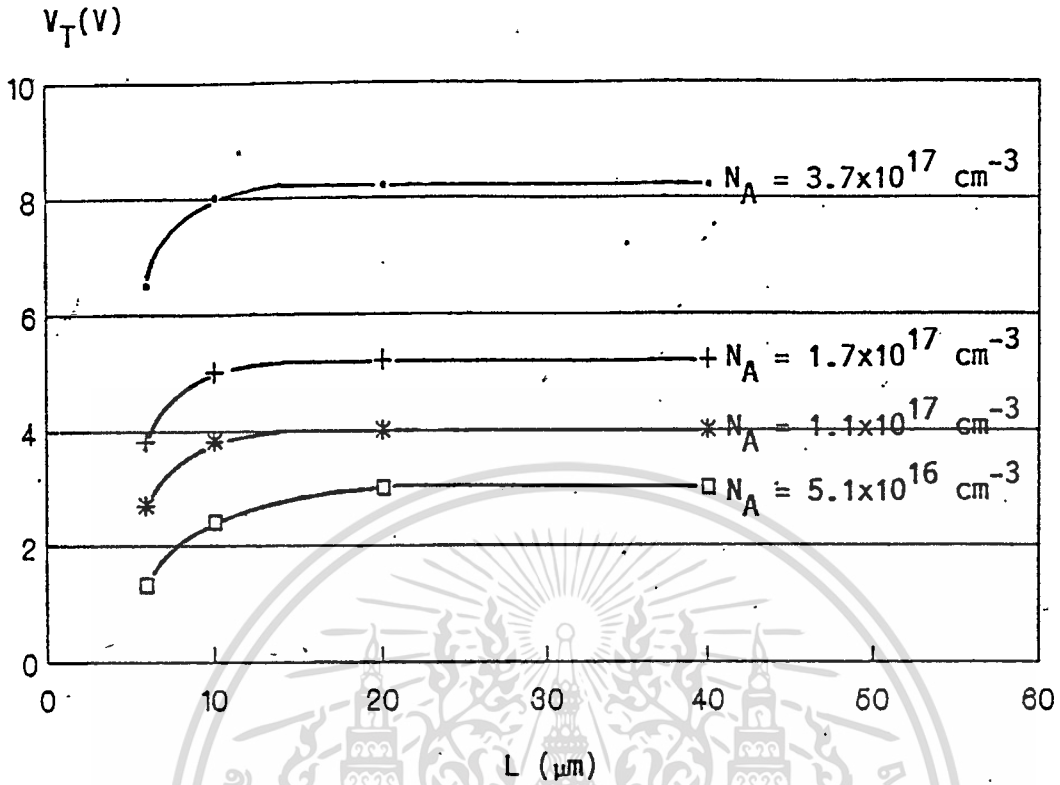
การออกแบบและสร้าง

เพื่อศึกษาผลของแรงดันขีดเริ่มกับความยาวของช่องทางเดินกระแสลื่น ๆ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบดิมอสที่มีโครงสร้างและขนาดเดียวกันกับรูปที่ 5.4 โดยมีความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 6, 10, 20 และ 40 μm และความกว้างของช่องทางเดินกระแสลื่นที่เท่ากับ 400 μm

สำหรับกระบวนการสร้างเหมือนกับหัวข้อ 5.4.1 เนื่องจากดิมอสที่สร้างขึ้นอยู่กับแผ่นผลึกซิลิกอนเดียวกัน

การทดลองและผลการทดลอง [19]

นำเอาดิมอสที่สร้างเสร็จมาวัดค่าแรงดันขีดเริ่มเหมือนในหัวข้อ 5.4.1 แล้วนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความยาวของช่องทางเดินกระแส ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แรงดันขีดเริ่มที่ขึ้นกับผลของความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base ค่าต่าง ๆ

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.15 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความยาวของช่องทางเดินกระแส ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ 5.1×10^{16} , 1.1×10^{17} , 1.7×10^{17} และ $3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ แสดงว่า จากกราฟที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่าต่าง ๆ ความยาวของช่องทางเดินกระแสที่น้อยกว่า $20 \text{ } \mu\text{m}$ แรงดันขีดเริ่มจะมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งความยาวของช่องทางเดินกระแสน้อยกว่า $10 \text{ } \mu\text{m}$ แรงดันขีดเริ่มจะลดลงอย่างรวดเร็ว

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การควบคุมแรงดันขีดเริ่ม โดยวิธีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base ให้ผลการควบคุมที่ดี และเมื่อเทียบผลการทดลองกับการคำนวณจากทฤษฎีจะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 10 % นอกจากนี้ยังพบว่าผลของความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้นในการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบแรงดันขีดเริ่มของดีมอสต้อ ๆ ไป จึงต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ให้สอดคล้องกัน รวมถึงผลของค่าความคลาดเคลื่อน 10 % ด้วย จะทำให้ดีมอสที่สร้างขึ้นมีแรงดันขีดเริ่มเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นอุปกรณ์กำลังต่อไป

5.5 การศึกษาแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ของดีมอสจากโครงสร้างไดโอด

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์กำลังจะต้องมีการทรมานแรงดันได้สูง ๆ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการศึกษา การเกิดปรากฏการณ์แรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส ซึ่งรวมถึงการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อให้แรงดันพังทลายที่ได้รับมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาปรากฏการณ์แรงดันพังทลาย (ในที่นี้จะหมายถึงแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์) ของดีมอสในตอนแรกจะทำการศึกษาจากโครงสร้างของไดโอดก่อน ซึ่งรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดจะเทียบได้กับรอยต่อพี-เอ็นของส่วน P-base กับ N-drift ของดีมอส หลังจากนั้นจึงนำผลรับที่ได้ไปทำการออกแบบร่วมกับโครงสร้างของดีมอส ทำให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการศึกษาเรื่องนี้

5.5.1 ความหนาแน่นอะตอมสารเจือกับแรงดันพังทลาย

จากสมการที่ (2.36) พบว่า ความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนฐานรอง (N_{B0}) จะมีผลต่อแรงดันพังทลาย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนฐานรองกับแรงดันพังทลาย เพื่อวัตถุประสงค์ในการเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้นให้เหมาะสมกับการกำหนดแรงดันพังทลายที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน

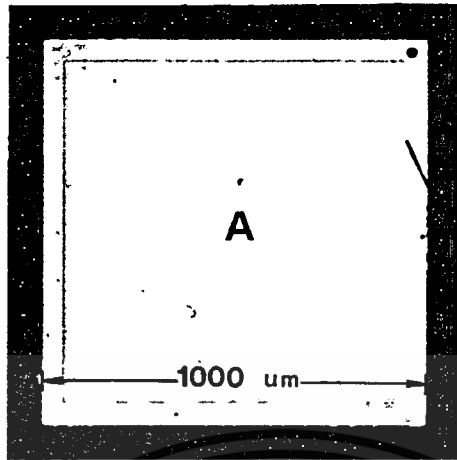
การออกแบบและสร้าง

ในการศึกษาผลของความหนาแน่นอะตอมสารเจือกับแรงดันพังทลาย ได้ทำการออกแบบไดโอด ให้มีขนาด $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ และเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้นที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนฐานรองเท่ากับ $9.92 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $4.96 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และ $8.70 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

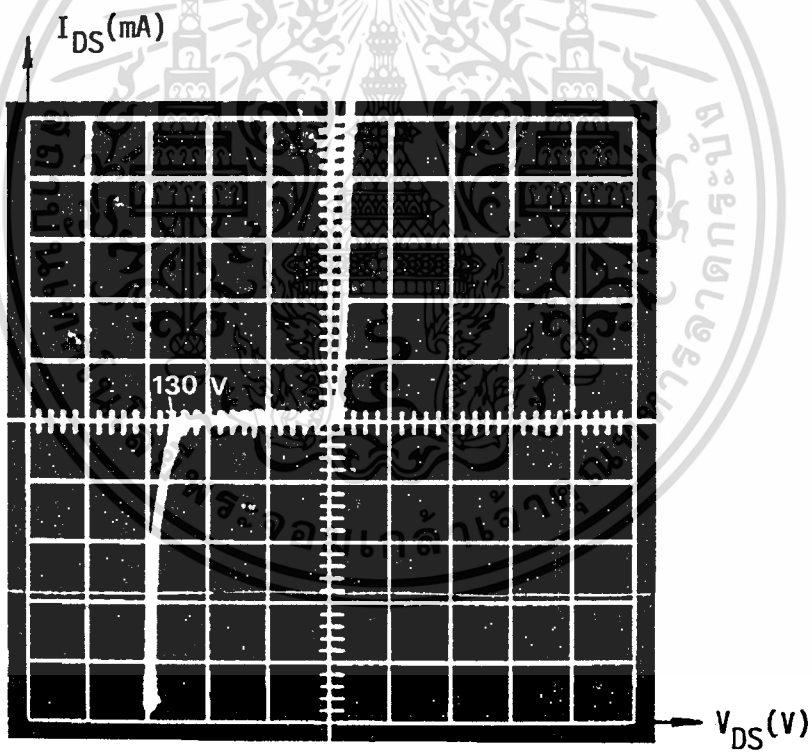
สำหรับกระบวนการสร้างแสดงในบทที่ 4 โดยอ้างอิงกระบวนการสร้างให้เหมือนกับส่วน P-base ของดีมอส โดยเลือกแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดเอ็น ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน $5.7 \text{ } \Omega\text{-cm}$, $10 \text{ } \Omega\text{-cm}$ และ $50 \text{ } \Omega\text{-cm}$ นำมาสร้างเป็นไดโอด โดยแพร่สารเจือโบรอนในส่วนที่มีค่า $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ แล้วจึงสร้างขั้วสัมผัสเป็นส่วนอานาโนดและคาโทด สำหรับรูปที่ 5.16 เป็นภาพถ่ายด้านบนของไดโอดที่ได้สร้างเสร็จแล้ว

การทดลองและผลการทดลอง

นำไดโอดที่สร้างขึ้นมาวัดแรงดันพังทลาย โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.17 แล้วนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายกับสัมประสิทธิ์ของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น (a) ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.18



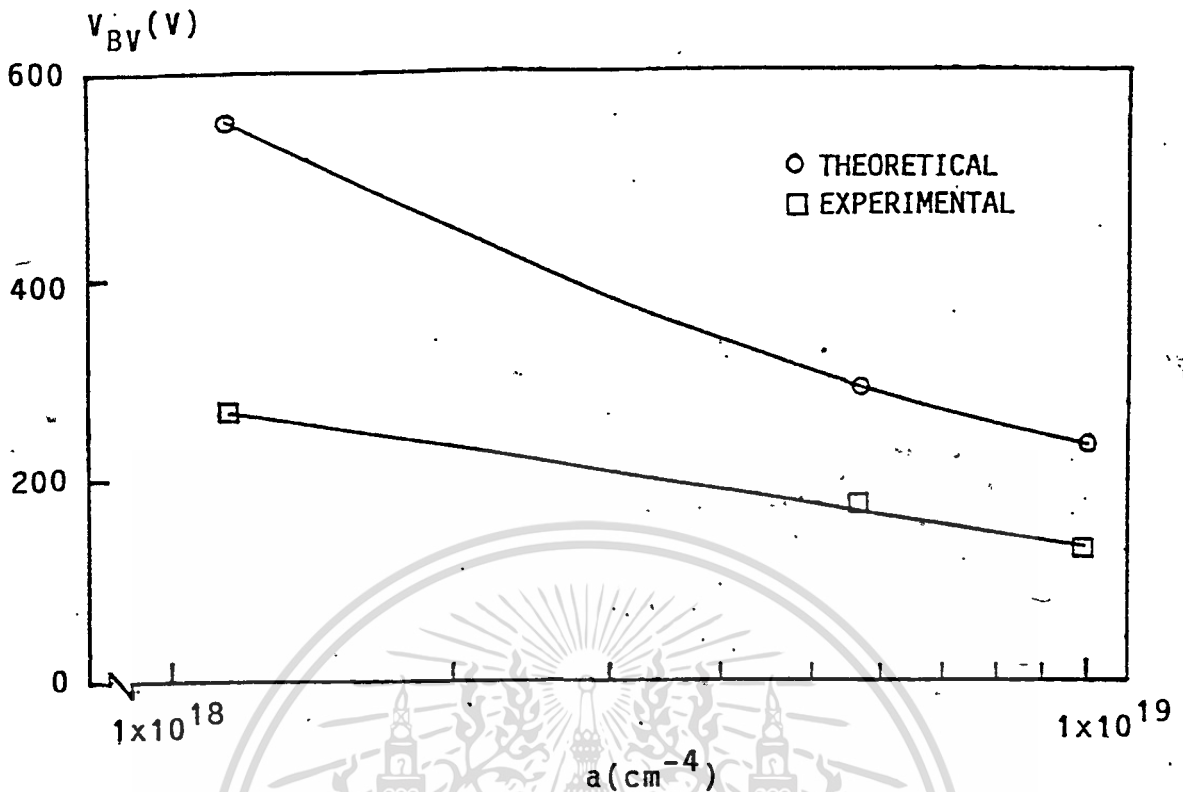
รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายด้านบนของไดโอดที่สร้างเสร็จแล้ว ที่มีขนาด $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$



Ver. : 0.2 mA/div. , Hor. : 50 V/div.

รูปที่ 5.17 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ ไดโอดที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนฐานรอง $8.70 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งจะได้แรงดันพังทลาย 130 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์กับสัมประสิทธิ์ของรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น

ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 5.17 เป็นกราฟคุณสมบัติกระแสกับแรงดันของไดโอดที่สร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานของ $8.70 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ พบว่ารอยต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้นสมบูรณ์ดี มีกระแสรั่วไหลต่ำเท่ากับ $0.5 \mu\text{A}$ (วัดที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ (V_R) = 100 V) และแรงดันพังทลายมีค่าประมาณ 130 V ส่วนในรูปที่ 5.18 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายกับสัมประสิทธิ์ของรอยต่อลาด แสดงให้เห็นว่าแรงดันพังทลายจะแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์ของรอยต่อลาด สำหรับแผ่นซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองเป็น $9.92 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $4.96 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และ $8.70 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ เมื่อแพร่สารเจือโบรอนเป็นส่วนพี รอยต่อที่ได้จะเป็นลักษณะรอยต่อลาดแบบเชิงเส้น ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของรอยต่อลาดเป็น $1.15 \times 10^{18} \text{ cm}^{-4}$, $5.74 \times 10^{18} \text{ cm}^{-4}$ และ $1.00 \times 10^{19} \text{ cm}^{-4}$ ทำให้ได้รับแรงดันพังทลายเป็น 250 V, 170 V และ 130 V ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับผลการคำนวณตามทฤษฎีจากสมการที่ (2.36) เมื่อสัมประสิทธิ์เชิงลาดของสารเจืออยู่ในช่วง $1.15 \times 10^{18} - 1.00 \times 10^{19} \text{ cm}^{-4}$ แรงดันพังทลายจะมีค่าจาก 550-230 V ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะมีค่าประมาณ 45-58 % ของทฤษฎีเท่านั้น เป็นผลเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากในบริเวณของด้านข้างของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นจึงต้องหาวิธีลดค่าสนามไฟฟ้านี้ให้น้อยลง เพื่อให้แรงดันพังทลายมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 การปรับปรุงแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ให้มีความสูงขึ้น

เนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.5.1 แรงดันพังทลายมีค่าเพียง 45-58 % ของ ทฤษฎี ซึ่งเป็นผลเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบด้านข้างของรอยต่อมีความสูง ดังนั้นในการทดลองใน หัวข้อนี้จึงได้เสนอวิธีการลดสนามไฟฟ้านี้ลง โดยการปรับปรุงลักษณะลวดลายและโครงสร้างของ ไดโอด ดังนี้คือ

1. การเปลี่ยนแปลงลักษณะลวดลายของ ไดโอด
2. การสร้างฟิวส์ริงค์
3. การสร้างฟิวส์เพลต

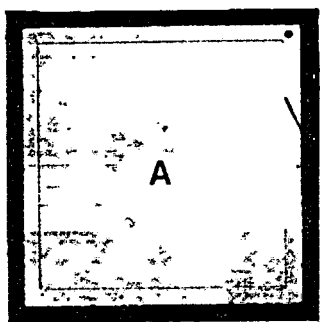
การออกแบบและสร้าง

- เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะลวดลายของ ไดโอดกับแรงดันพังทลาย จึง ได้นำการออกแบบให้ ไดโอดมีลักษณะลวดลายเป็นรูปสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมมนขอบ, หกเหลี่ยม และ วงกลม

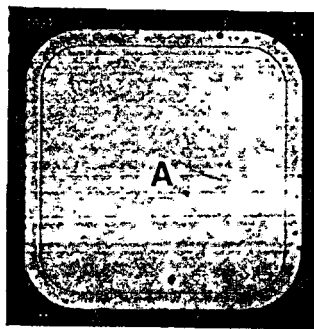
- เพื่อศึกษาผลระยะห่างของฟิวส์ริงค์ (W_{FR}) กับแรงดันพังทลาย โดยสร้างส่วนฟิวส์ ริงค์ล้อมรอบไดโอด ความกว้างของส่วนฟิวส์ริงค์ 30 μm ส่วนระยะห่างระหว่างฟิวส์ริงค์กับ ไดโอดมี ค่าเป็น 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 และ 150 μm

- เพื่อศึกษาผลของระยะห่างของฟิวส์เพลต (W_{FP}) กับแรงดันพังทลาย โดยสร้างส่วน อะลูมิเนียมให้ซ้อนทับบนชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งมีระยะห่างจากขอบของ ไดโอดเป็น 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 μm

สำหรับกระบวนการสร้างเหมือนกับกระบวนการสร้างในหัวข้อที่ 5.5.1 เนื่องจาก สร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอนเดียวกัน ในรูปที่ 5.19 เป็นภาพถ่ายด้านบนของ ไดโอดที่มีลวดลายแบบต่างๆ รูปที่ 5.20 (ก) และ (ข) เป็นโครงสร้างด้านบนและภาพตัดขวางของ ไดโอดที่สร้างฟิวส์ริงค์ล้อม รอบและภาพถ่ายด้านบนของ ไดโอดที่สร้างเสร็จแล้วตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 5.21 (ก) และ (ข) เป็นโครงสร้างด้านบนและภาพตัดขวางของ ไดโอดที่สร้างฟิวส์เพลตและภาพถ่ายด้านบนของ ไดโอดที่ สร้างเสร็จแล้วตามลำดับ



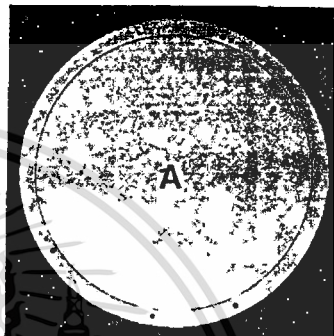
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

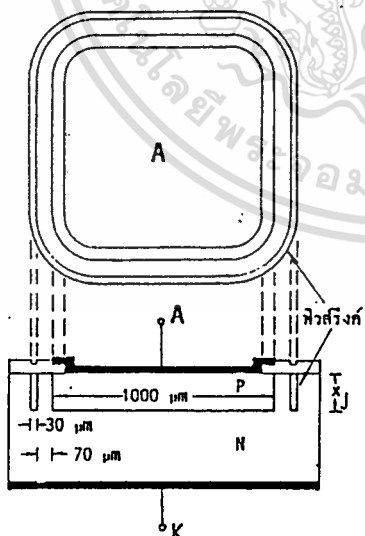
รูปที่ 5.19 เป็นภาพถ่ายด้านบนของไดโอดที่ออกแบบเป็นลวดลายแบบต่าง ๆ

(ก) สี่เหลี่ยม

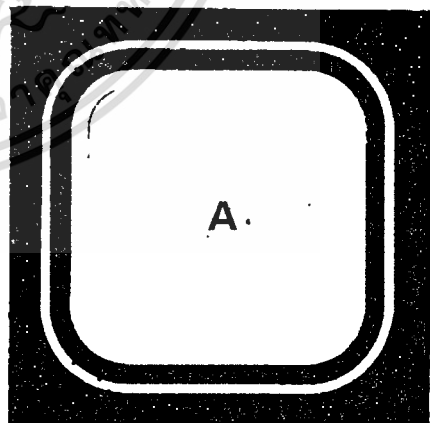
(ข) สี่เหลี่ยมมนขอบ

(ค) หกเหลี่ยม

(ง) วงกลม



(ก)

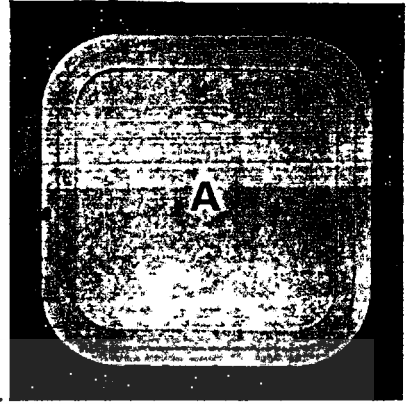
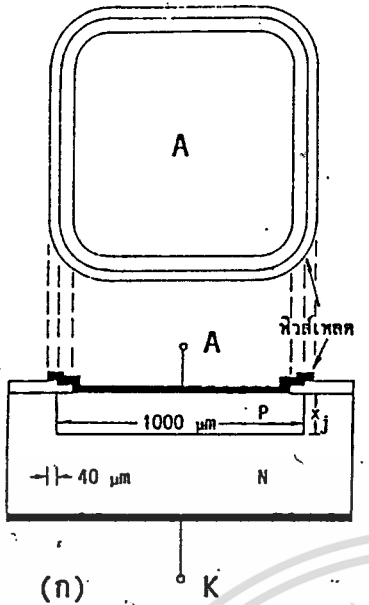


(ข)

รูปที่ 5.20 (ก) ลวดลายต้นแบบของโครงสร้างด้านบนและภาพตัดขวางของไดโอดที่สร้าง
นิวส์ริงค์ล้อมรอบ

(ข) ภาพถ่ายด้านบนของไดโอดที่มีนิวส์ริงค์ที่สร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.21 (ก) ลวดลายต้นแบบของ โครงสร้างด้านบนและภาพตัดขวางของ ไดโอดพร้อมด้วย ส่วนเฟิร์สเฟลต

(ข) ภาพถ่ายด้านบนของ ไดโอดพร้อมส่วนเฟิร์สเฟลตที่สร้างเสร็จแล้ว

การทดลองและผลการทดลอง

นำเอา ไดโอดที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดแรงดันพังทลาย โดยใช้ เครื่องวัดคุณสมบัติของ ทรานซิสเตอร์ เหมือนกับหัวข้อที่ 5.5.1 สำหรับผลการทดลองในหัวข้อนี้จะนำเสนอเฉพาะ ไดโอดที่ สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรอง $8.70 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ เท่านั้น (ส่วน ไดโอดที่สร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรอง $9.92 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ และ $4.96 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ให้ผลการทดลองในแนวโน้มนี้อีกด้วย) โดยมีผลการทดลองดังนี้ คือ

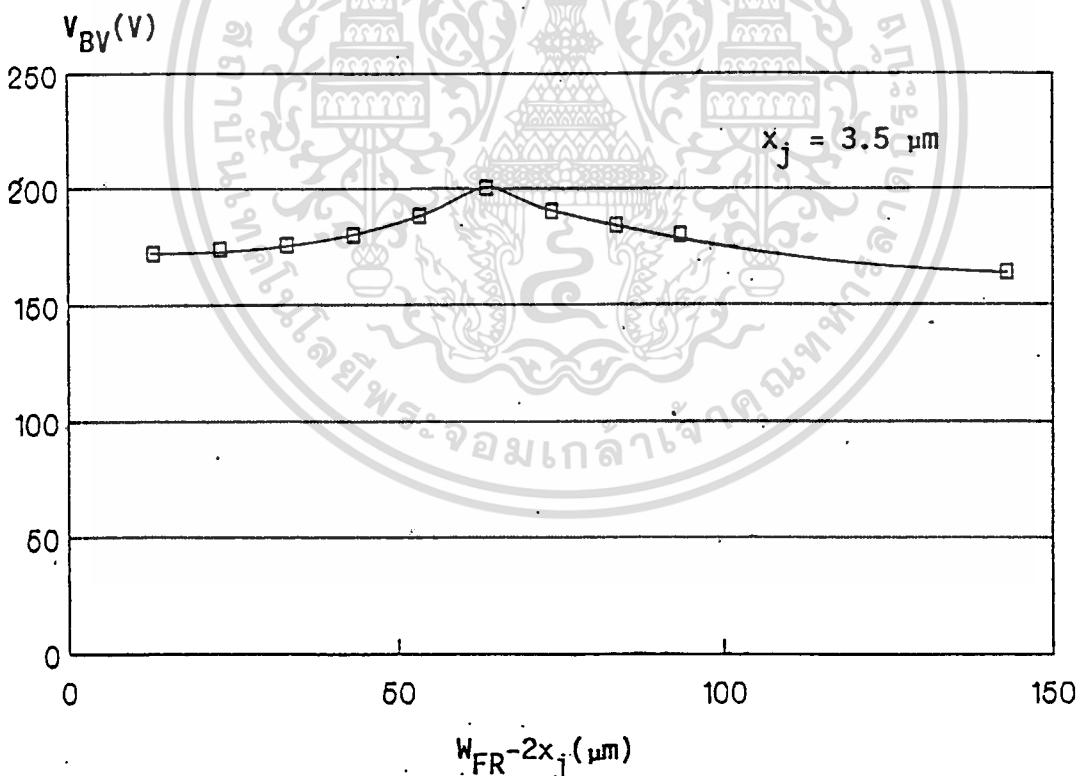
5.5.2.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะลวดลายของ ไดโอด

ตารางที่ 5.2 แสดงแรงดันพังทลายและเปอร์เซ็นต์ของแรงดันพังทลาย เปรียบเทียบกับทฤษฎีของ ไดโอด เมื่อมีลักษณะลวดลายแบบต่าง ๆ

ลวดลายของ ไดโอด	แรงดันพังทลาย	% แรงดันพังทลายเปรียบเทียบกับทฤษฎี
สี่เหลี่ยม	130	56.5
สี่เหลี่ยมมนขอบ	160	69.6
หกเหลี่ยม	130	56.5
วงกลม	172	74.8

ผลการทดลองในตารางที่ 5.2 แสดงว่า เมื่อออกแบบให้ได้โอดมีลักษณะเป็นมุม (สี่เหลี่ยมและหกเหลี่ยม) จะทำให้แรงดันพังทลายมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 130 V (56.5% ของทฤษฎี) แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณมุมของไดโอดจะมีค่าสูงมากกว่าบริเวณอื่น ๆ จึงทำให้เกิดแรงดันพังทลายขึ้น แต่เมื่อเราเปลี่ยนลวดลายของไดโอดเป็นสี่เหลี่ยมมนขอบ และวงกลมพบว่าแรงดันพังทลายที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นเป็น 160 V (69.6% ของทฤษฎี) และ 172 V (74.8% ของทฤษฎี) ตามลำดับ นั้นแสดงว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบที่ออกแบบให้มนและเป็นวงกลมจะมีค่าลดลง จึงทำให้แรงดันพังทลายมีค่าสูงขึ้น จากผลการทดลองนี้แสดงว่าการออกแบบลวดลายของไดโอดให้เป็นลักษณะวงกลมจะทำให้ได้แรงดันพังทลายมีค่าสูงที่สุด แต่ถ้านำเอาลวดลายลักษณะวงกลมไปออกแบบในโครงสร้างของดีมอส พบว่าจะสร้างช่องทางเดินกระแสได้น้อยกว่าลวดลายสี่เหลี่ยมเมื่อเทียบขนาดพื้นที่ที่เท่ากัน ดังนั้นโครงสร้างสี่เหลี่ยมมนขอบ จึงเป็นลวดลายที่เหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นดีมอสมากกว่า ซึ่งในการทดลองการสร้างนิวส์ริงค์และนิวส์เนลตจึงใช้ไดโอดที่มีลวดลายเป็นสี่เหลี่ยมมนขอบ

5.5.2.2 การสร้างนิวส์ริงค์

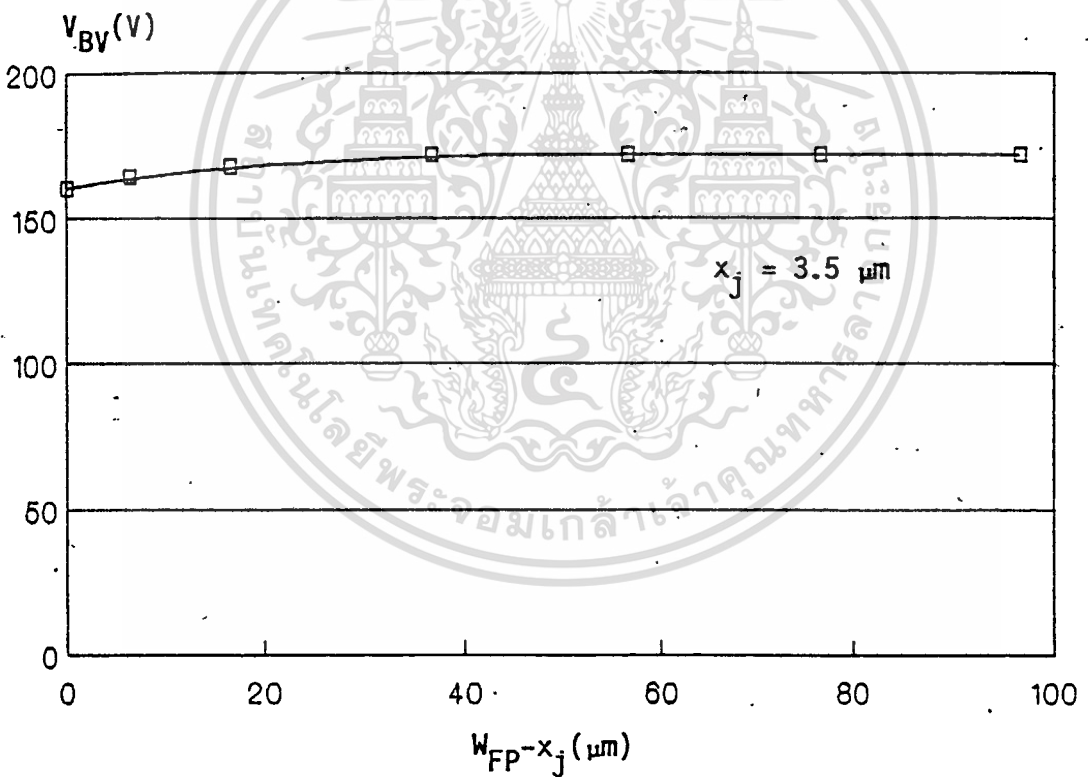


รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายกับระยะห่างของนิวส์ริงค์กับขอบไดโอดที่แท้จริง ($W_{FR} - 2x_j$) ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนฐานรอง $8.70 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 5.22 พบว่า แรงดันพังทลายจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อระยะห่างของพิวส์ริงค์มีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งระยะห่างของพิวส์ริงค์กับไดโอดที่แท้จริง (ระยะห่างของพิวส์ริงค์ที่ออกแบบโดยส่วนแพริซึมด้านข้างของส่วนหนึ่งของไดโอดและพิวส์ริงค์) ซึ่งประมาณว่าแต่ละข้างแพริซึมเท่ากับความลึกของรอยต่อ (x_j) ดังนั้นระยะห่างของพิวส์ริงค์กับไดโอดที่แท้จริง = $W_{FR} - 2x_j$ มีค่าเท่ากับ $63 \mu\text{m}$ แรงดันพังทลายจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 200 V (86.9 % ของทฤษฎี) แสดงให้เห็นว่าที่ระยะห่างของพิวส์ริงค์นี้ สนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของไดโอดจะมีค่าต่ำที่สุดจึงทำให้แรงดันพังทลายมีค่าสูงสุด แต่เมื่อระยะห่างของพิวส์ริงค์มีค่าสูงขึ้นอีกจะทำให้แรงดันพังทลายมีค่าลดลงจนเกือบเท่ากับแรงดันพังทลายของไดโอดในกรณีที่ไม่ได้สร้างพิวส์ริงค์ (ที่ระยะห่างของพิวส์ริงค์เท่ากับ $150 \mu\text{m}$ แรงดันพังทลายเป็น 164 V และเมื่อไม่มีพิวส์ริงค์แรงดันพังทลายจะเป็น 160 V)

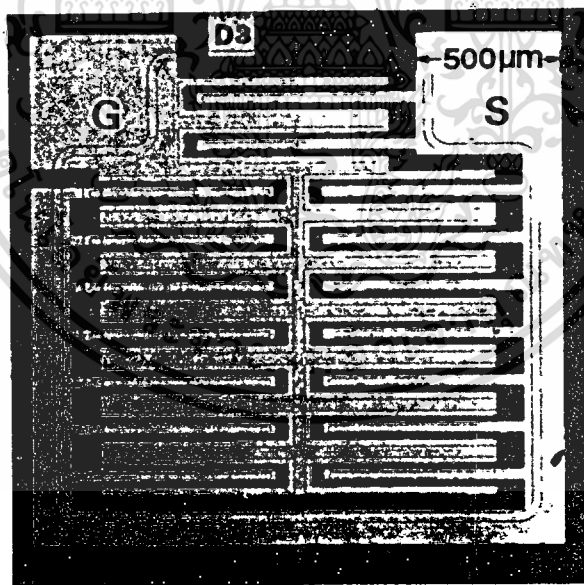
5.5.2.3 การสร้างพิวส์เปลต



รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายกับระยะห่างของพิวส์เปลต ($W_{FP} - x_j$) ที่สร้างขึ้นบนชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ ซึ่งขยายไปจากส่วนของไดโอดของแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนฐานรอง $8.70 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.23 พบว่า เมื่อระยะห่างของพิวส์เพลตเพิ่มขึ้นแรงดันนึ่งทลายจะมีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งระยะพิวส์เพลตที่แท้จริง ($W_{FP}-x_j$) มีค่ามากกว่า $36.5 \mu\text{m}$ แรงดันนึ่งทลายจะมีค่าคงที่เท่ากับ 172 V (74.8% ของทฤษฎี) แสดงว่าสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างของพิวส์เพลตเท่ากับ $36.5 \mu\text{m}$ จะมีค่าต่ำที่สุด ถึงแม้ว่าจะสร้างให้ระยะห่างของพิวส์เพลตมีค่ามากขึ้น แต่จะไม่สามารถลดผลของสนามไฟฟ้าลงได้อีก

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าสามารถกำหนดแรงดันนึ่งทลายได้จากการเลือกแผ่นผลึก เริ่มต้นให้มีค่าที่เหมาะสม นอกจากนี้การปรับปรุงโครงสร้างของ ไดโอดยังสามารถช่วยลดผลของสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของ ไดโอด ทำให้แรงดันนึ่งทลายมีค่าสูงขึ้น และเมื่อนำผลที่ได้ไปออกแบบกับ ดิมอส โดยเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นของสารเจือในส่วนฐานรอง หรือส่วน N-drift เท่ากับ $9.02 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ออกแบบให้ระยะห่างของพิวส์ริงค์จากส่วน P-base เท่ากับ $70 \mu\text{m}$ และระยะห่างของพิวส์เพลตอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ $40 \mu\text{m}$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.24 ได้แรงดันนึ่งทลายเท่ากับ 160 V ซึ่งได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับแรงดันนึ่งทลายของ ไดโอดที่มีพิวส์เพลต แสดงว่าแรงดันนึ่งทลายที่ได้จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อที่สร้างส่วนพิวส์เพลตไว้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านข้างของส่วนพิวส์เพลตในดิมอสมีค่าสูงกว่าในส่วนของพิวส์ริงค์ที่สร้างล้อมรอบตัวดิมอส



รูปที่ 5.24 ภาพถ่ายด้านบนของดิมอสที่ใช้ทดสอบแรงดันนึ่งทลาย ซึ่งสร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรอง $9.02 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และมีขนาดของ $L = 10 \mu\text{m}$ และ $W = 22,000 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การศึกษาการตอบสนองความถี่ของดีมอส

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการตอบสนองความถี่ของดีมอส ซึ่งจะช่วยให้ดีมอสที่จะออกแบบและสร้างต่อ ๆ ไป สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงมากขึ้น สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง ดังเช่น ในวงจรอุปกรณ์สื่อสาร เป็นต้น ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาผลการตอบสนองความถี่กับความยาวของช่องทางเดินกระแสและความจุไฟฟ้าแฉงด้านอินพุทที่เปลี่ยนแปลงไป และยังวัดผลการตอบสนองความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมด้วย

การออกแบบและสร้าง

ในการศึกษาการตอบสนองความถี่ของดีมอส ได้ทำการออกแบบให้ดีมอสมีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสแตกต่างกัน 2 ชุด โดยชุดแรกให้มีความกว้างของช่องทางเดินกระแสคงที่ 800 μm ส่วนความยาวของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 60 μm ส่วนชุดที่สองมีความยาวของช่องทางเดินกระแสคงที่ 10 μm ส่วนความกว้างของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 400, 600, 800, 1600, 3200 และ 22,000 μm

ส่วนกระบวนการสร้างใช้กระบวนการสร้างดีมอสมาตรฐาน โดยสร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอนแบบอินเทกเซียล N/N^+ ความหนาของอินเทกเซียล 20 μm ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 5.5-5.7 $\Omega\text{-cm}$ แล้วแพร่สารเจือปนบนส่วน P-base มีค่า $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือปนฟอสฟอรัสในส่วน N^+ -source มีค่า $1.53 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นจึงสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกต และซอส สำหรับดีมอสที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 5.6

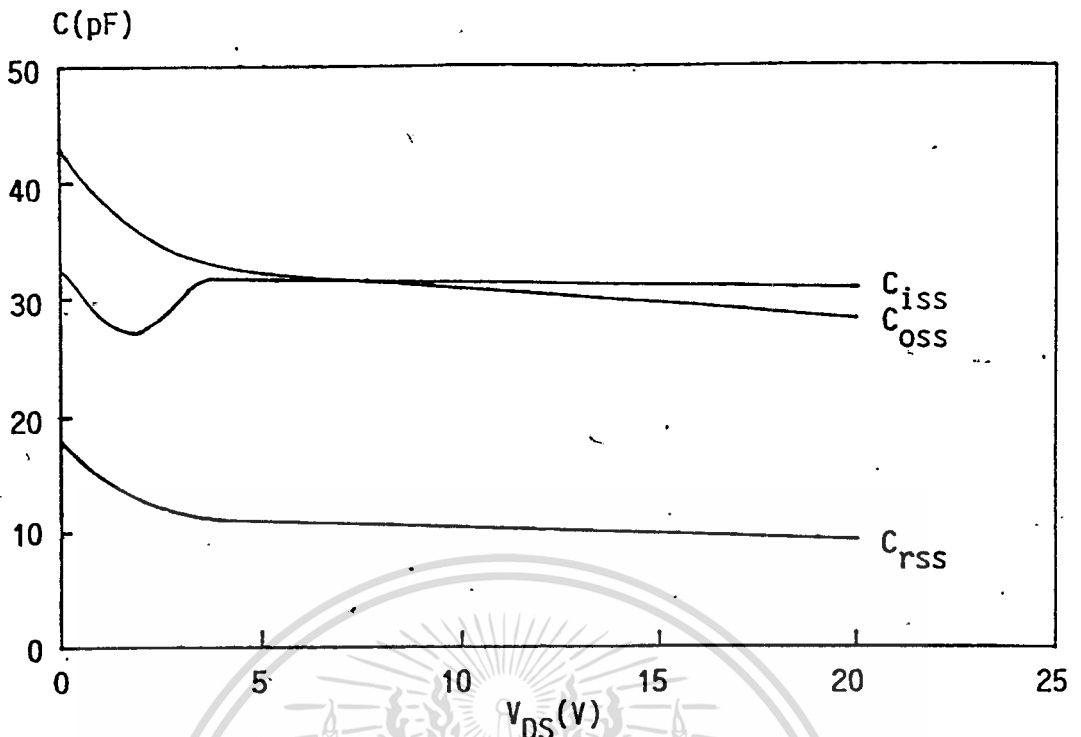
การทดลองและผลการทดลอง

นำดีมอสที่สร้างเสร็จแล้วทั้ง 2 ชุด มาทดลองวัดค่าต่าง ๆ ดังนี้ คือ

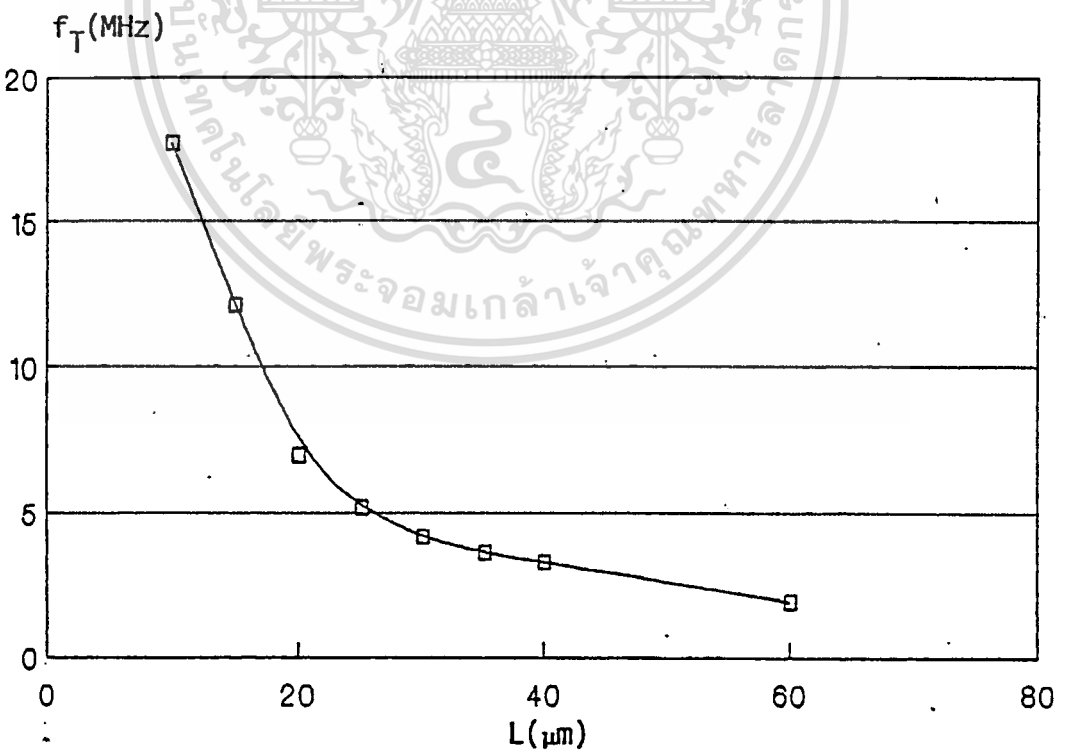
- นำไปวัดหาค่าทรานคอนดักแตนซ์ โดยใช้วงจรรูปที่ 5.7 (ก) และนำไปวัดค่าความจุไฟฟ้าแฉงจากเครื่องมือวัด 4061 Semiconductor/Component Test System เพื่อหาค่า C_{iss} , C_{oss} และ C_{rss} ซึ่งแสดงตัวอย่างความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในรูปที่ 5.25 จากนั้นนำไปหาความถี่คัท-ออฟ (f_T) จากสมการที่ (2.40) และนำผลการทดลองของดีมอสชุดที่หนึ่งไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัท-ออฟกับความยาวของช่องทางเดินกระแส ส่วนผลการทดลองของดีมอสชุดที่สองนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัท-ออฟกับความจุไฟฟ้าด้านอินพุท (C_{iss}) สำหรับผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.26, 5.27 และตารางที่ 5.3, 5.4

- สำหรับการทดลองการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม ใช้วงจรรูปที่ 5.28 (ก) ส่วนในรูปที่ 5.28 (ข) เป็นลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ เพื่อหาค่า t_r , t_f , $t_{d(on)}$ และ $t_{d(off)}$ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.3 และ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

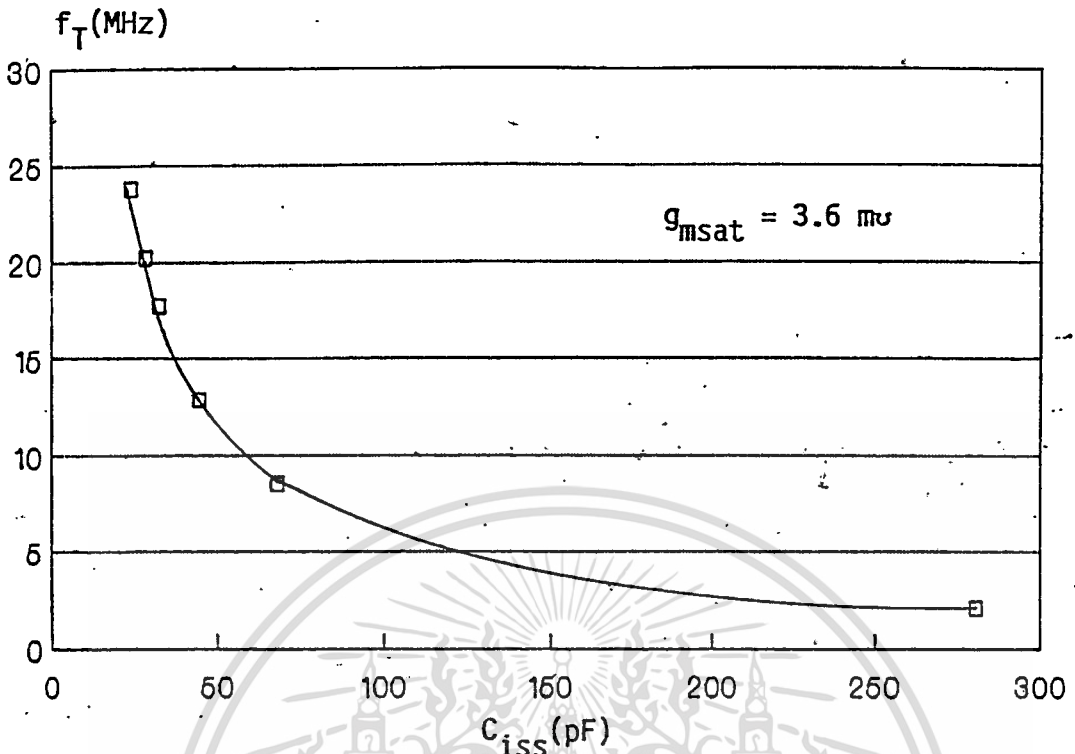


รูปที่ 5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันเดรน-ซอส แสดงค่าความจุไฟฟ้า C_{iss} , C_{oss} และ C_{rss} ของคิมอสที่มีขนาด $L = 10 \mu\text{m}$ และ $W = 800 \mu\text{m}$

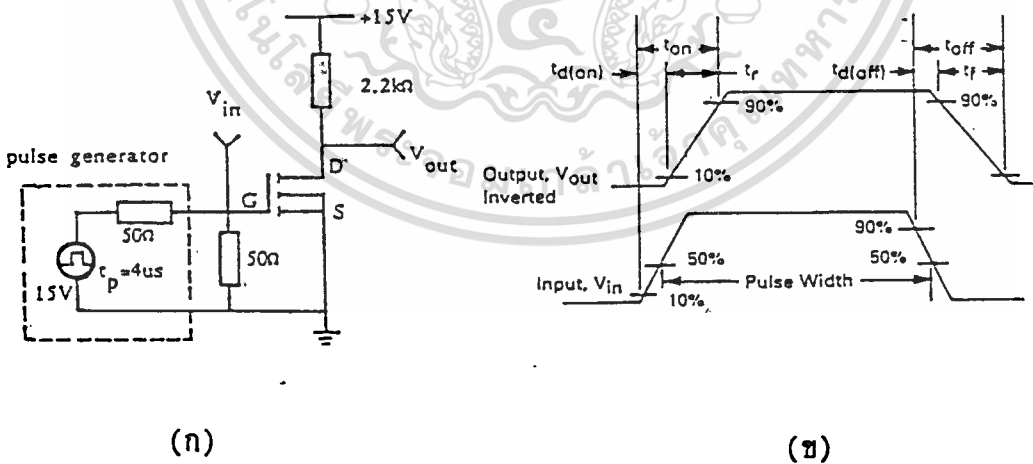


รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัท-ออฟกับความยาวของช่องทางเดินกระแส แสดงให้เห็นว่าความถี่คัท-ออฟจะแปรผกผันกับความยาวของช่องทางเดินกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัท-ออฟกับความจุไฟฟ้าด้านอินพุต แสดงให้เห็นว่าความถี่คัท-ออฟจะแปรผกผันกับความจุไฟฟ้าด้านอินพุต



รูปที่ 5.28 (ก) วงจรที่ใช้ในการวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม
 (ข) ลักษณะสัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้วัดหาค่า t_r , t_f , $t_{d(on)}$ และ $t_{d(off)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงผลของความจุไฟฟ้ากับความยาวของช่องทางเดินกระแสของดีมอสค่าต่าง ๆ

พารามิเตอร์	ดีมอส ($W = 800 \mu\text{m}$)								หน่วย
	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	
L	10	15	20	25	30	35	40	60	μm
g_{msat}^*	3.6	2.6	1.6	1.3	1.1	1.0	0.97	0.60	mS
C_{iss}^{**}	32.36	34.20	36.55	40.11	42.25	44.17	46.96	49.80	pF
C_{oss}^{**}	27.34	27.20	27.92	27.01	27.01	27.89	27.09	25.75	pF
C_{rss}^{**}	9.35	9.32	9.75	9.41	9.23	9.57	9.58	9.71	pF
f_T^{***}	17.71	12.10	6.97	5.16	4.14	3.60	3.29	1.92	MHz
t_r^{***}	0.10	0.12	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28	μs
t_f^{***}	0.51	0.52	0.54	0.53	0.52	0.54	0.55	0.57	μs
$t_{d(\text{on})}^{***}$	0.12	0.14	0.17	0.21	0.23	0.26	0.28	0.30	μs
$t_{d(\text{off})}^{***}$	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.62	μs

ตารางที่ 5.4 แสดงผลของความจุไฟฟ้ากับความกว้างของช่องทางเดินกระแสของดีมอสค่าต่าง ๆ

พารามิเตอร์	ดีมอส ($L = 10 \mu\text{m}$)						หน่วย
	DM9	DM10	DM11	DM12	DM13	DM14	
W	400	600	800	1,600	3,200	22,000	μm
g_{msat}	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	mS
C_{iss}^{**}	24.13	28.35	32.36	44.47	67.67	280.00	pF
C_{oss}^{**}	25.19	25.60	27.34	29.19	32.06	96.71	pF
C_{rss}^{**}	6.44	6.55	9.02	9.35	13.26	25.24	pF
f_T^{***}	23.74	20.21	17.71	12.84	8.47	2.05	MHz
t_r^{***}	0.10	0.10	0.10	0.08	0.04	0.04	μs
t_f^{***}	0.50	0.50	0.51	0.52	0.53	0.65	μs
$t_{d(\text{on})}^{***}$	0.12	0.10	0.12	0.06	0.06	0.08	μs
$t_{d(\text{off})}^{***}$	0.54	0.58	0.60	0.60	0.61	0.65	μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเหตุ * วัดที่ $V_{GS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{DS} = 15 \text{ V}$
 ** วัดที่ $V_{DS} = 20 \text{ V}$
 *** วัดที่สัญญาณอินพุต duty cycle 2 %, ความกว้างของพัลส์ (pulse width) $4 \mu\text{s}$ และ $V_{in} = 15 \text{ V}$

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.25 แสดงความจุไฟฟ้าที่แฝงอยู่ในโครงสร้างของดีมอส ซึ่งหาออกมาในเทอมของความจุไฟฟ้าด้านอินพุต (C_{in}) ความจุไฟฟ้าด้านเอาต์พุต (C_{out}) และความจุไฟฟ้าวอร์สทรานส์เฟอร์ส (C_{rss}) ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6 พบว่า ความจุไฟฟ้าทั้ง 3 ค่านี้ จะมีค่าลดลงเมื่อให้แรงดันไบอัสมีค่าสูงขึ้น แสดงว่าแรงดันไบอัสที่ป้อนให้ดีมอสสูงขึ้นจะทำให้บริเวณปลดพาหะมีขนาดกว้างขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 5.26 และ 5.27 แสดงให้เห็นว่า ความถี่คัท-ออฟหรือการตอบสนองความถี่สูงสุดทางด้านอินพุตจะแปรผกผันกับความยาวของช่องทางเดินกระแส และความจุไฟฟ้าด้านอินพุต โดยในรูปที่ 5.26 ออกแบบให้ช่องทางเดินกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $10 - 60 \mu\text{m}$ (ความกว้างของช่องทางเดินกระแสคงที่ที่ $800 \mu\text{m}$) จะได้ความถี่คัท-ออฟมีค่าลดลงจาก $17.71 - 1.92 \text{ MHz}$ เพราะว่าความยาวช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ จะใช้เวลาในการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าช่วงทำงาน และกำจัดประจุไฟฟ้าช่วงหยุดทำงานในบริเวณช่องทางเดินกระแสได้เร็วกว่าความยาวของช่องทางเดินกระแสที่ยาวกว่า และเมื่อออกแบบให้ความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $400 - 22,000 \mu\text{m}$ (ความยาวของช่องทางเดินกระแสคงที่ที่ $10 \mu\text{m}$) พบว่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีค่ามากขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในรูปที่ 5.27 จึงเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัท-ออฟกับความจุไฟฟ้าด้านอินพุตแทนขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแส สำหรับความจุไฟฟ้าด้านอินพุตที่มีค่าสูงขึ้นจาก $24.13 - 280.00 \text{ pF}$ จะได้ความถี่คัท-ออฟลดลงจาก $23.74 - 2.05 \text{ MHz}$ เพราะว่าเมื่อความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ประจุไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในบริเวณช่องทางเดินจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งต้องใช้เวลามากขึ้นในการกำจัดประจุไฟฟ้าเหล่านี้ให้หมดไป

ส่วนผลการตอบสนองสัญญาณไฟฟารูปคลื่นสี่เหลี่ยม ได้ผลการทดลองในทำนองเดียวกันกับผลการทดลองที่กล่าวข้างต้น คือ เมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสลดลง จะทำให้ t_{on} [$t_{on} = t_r + t_{d(on)}$] และ t_{off} [$t_{off} = t_f + t_{d(off)}$] ลดลงด้วย ทำให้ดีมอสตอบสนองความถี่ได้สูง และเมื่อความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น จะทำให้ t_{on} และ t_{off} มากขึ้น ทำให้ดีมอสมีการตอบสนองความถี่ได้ลดลง

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า ดีมอสจะมีการตอบสนองความถี่ได้สูงจะต้องสร้างให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสและความจุไฟฟ้าแฝงลดลง สำหรับความจุไฟฟ้าแฝงทำให้ลดลงได้จากการออกแบบลวดลายอะลูมิเนียมให้เป็นระเบียบและมีขนาดเล็กเท่าที่จะทำได้ ซึ่งขึ้นกับเทคโนโลยีที่ใช้สร้างดีมอส

5.7 การศึกษาพารามิเตอร์แฝงที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส

พารามิเตอร์ที่แฝงอยู่ในโครงสร้างของดีมอสมีด้วยกันหลายตัว ดังนี้คือ

1. โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์
2. โครงสร้างแฝงของเจเฟต
3. ความจุไฟฟ้าแฝง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง ผลของโครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และโครงสร้างแฝงของเจเฟต สำหรับผลของความจุไฟฟ้าแฝงได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 5.6 เรื่องการตอบสนองความถี่

5.7.1 โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

โครงสร้างแฝงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่สารเจือ 2 ครั้ง เหมือนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ได้ช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ เป็นผลให้มอสเฟตกำลังนำกระแสได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามโครงสร้างนี้จะมีผลกระทบโดยตรงต่อกระแสรั่วไหล ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

การออกแบบและสร้าง

ในการศึกษาโครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จึงได้ทำการออกแบบให้ดีมอสมีความยาวของช่องทางเดินกระแส 20 μm และความกว้างของช่องทางเดินกระแส 400 μm โดยแยกส่วน N^+ -source และส่วน P-base ออกจากกัน ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับรูปที่ 5.1 (ข)

กระบวนการสร้างได้สร้างดีมอสขึ้นตามกระบวนการสร้างมาตรฐาน โดยเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น แบบอีพิตอกซ์เซียล N/N^+ ความหนาของอีพิตอกซ์เซียล 20 μm ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 5.5-5.7 $\Omega\text{-cm}$ แพร่สารเจือในส่วน P-base มีค่า $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และสารเจือส่วน N^+ -source มีค่า $1.10 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นจึงนำไปสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกท และซอร์ส

การทดลองและผลการทดลอง

นำดีมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยต่อเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ เพื่อวัดผลของกระแสรั่วไหล

จากผลการทดลอง พบว่า กรณีไม่เชื่อมต่ออะลูมิเนียมระหว่างส่วน N^+ -source และ P-base เข้าด้วยกัน จะเกิดโครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีศักย์ไฟฟ้าค่าน้อย ๆ ตกคร่อมความต้านทานในส่วน P-base เป็นผลให้โครงสร้าง N^+ -P-N ทำงานได้ ซึ่งจะถือว่าเป็นกระแสรั่วไหลส่วนหนึ่งของดีมอส จากผลการทดลอง พบว่ากระแสรั่วไหลรวมจะสูงขึ้นเป็น 0.22 μA (วัดที่ $V_{DS} = 55 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 0 \text{ V}$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสรั่วไหลของดีมอสเมื่อไม่เกิดโครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยการเชื่อมต่อส่วน N^+ -source เข้ากับ

P-base ซึ่งมีกระแสรั่วไหล $0:19 \mu\text{A}$ ในกรณีการเกิดโครงสร้างแฝงช่องไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จะมีกระแสรั่วไหลมากกว่า $0.03 \mu\text{A}$ ดังนั้นการหลีกเลี่ยงให้เกิดผลกระทบจากโครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์น้อยที่สุด จะทำให้ดีมอสที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการทำจัดตั้งขั้วไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นระหว่างส่วน N^+ -source กับส่วน P-base ด้วยการเชื่อมต่อลวดลายอะลูมิเนียมทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน

5.7.2 โครงสร้างแฝงของเจเฟต

โครงสร้างแฝงของเจเฟตเกิดขึ้น เนื่องจากการสร้างระยะห่างระหว่างเซลล์ (a) ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.29 (ก) มีขนาดเล็ก เมื่อดีมอสได้รับการไบอัสแรงดันระหว่างเดรน-ซอสสูงขึ้น จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อ P-base กับ N-drift กว้างมากขึ้นจนขยายออกมาชนกัน สำหรับในการทดลองนี้จะหาว่าระยะห่างระหว่างเซลล์ที่น้อยที่สุด (minimum spacing : a_0) มีค่าเท่าไร จึงไม่มีผลกระทบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า

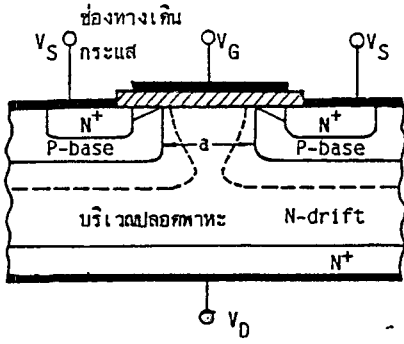
การออกแบบและสร้าง

ในการศึกษาโครงสร้างแฝงของเจเฟตได้ทำการออกแบบให้ดีมอสมีความยาวของช่องทางเดินกระแส $10 \mu\text{m}$ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส $800 \mu\text{m}$ และระยะห่างระหว่างเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 10, 20, 30, 40, 50 และ $60 \mu\text{m}$

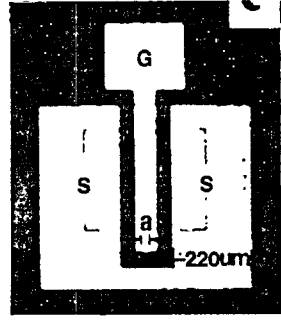
กระบวนการสร้างได้สร้างดีมอสขึ้นตามกระบวนการสร้างมาตรฐาน โดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นแบบอินทิเทกเซียล N/N^+ ความหนาของอินทิเทกเซียล $20 \mu\text{m}$ ระบาย (100) จักัดความต้านทาน $5.5-5.7 \Omega\text{-cm}$ โดยแพร่สารเจือในส่วน P-base มีค่า $1.20 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือส่วน N^+ -source มีค่า $1.10 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ แล้วจึงนำไปสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกตและซอส ในรูปที่ 5.29 (ข) เป็นภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่สร้างเสร็จแล้ว

การทดลองและผลการทดลอง[20]

นำดีมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยต่อเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.30 จากนั้นนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทรานคอนดักแตนซ์กับระยะห่างระหว่างเซลล์และความต้านทานในภาวณำกระแสกับระยะห่างระหว่างเซลล์ ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.31 และ 5.32

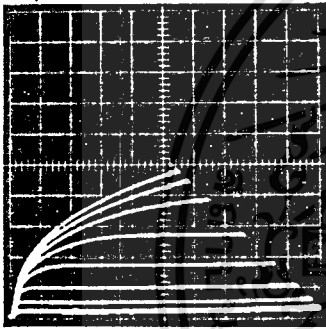


(ก)

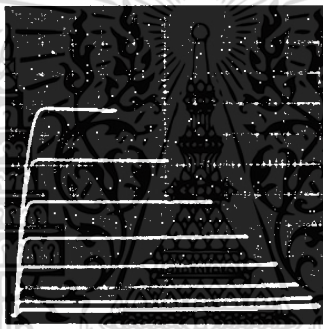


(ข)

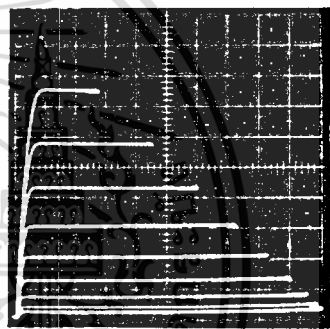
รูปที่ 5.29 (ก) แสดงระยะห่างระหว่างเซลล์ (a) และบริเวณปลดพาหะที่เกิดขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างแฝงของเจเฟต เมื่อบริเวณปลดพาหะทั้ง 2 ข้างขยายมาชนกัน
 (ข) ตัวอย่างภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่สร้างเสร็จแล้ว ซึ่งมีขนาด $L = 10 \mu\text{m}$, $W = 800 \mu\text{m}$ และ $a = 20 \mu\text{m}$



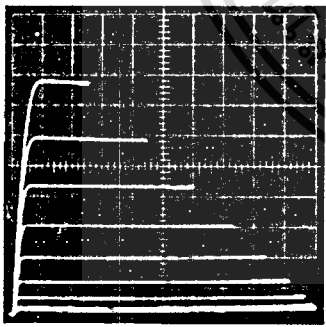
$a = 10 \mu\text{m}$



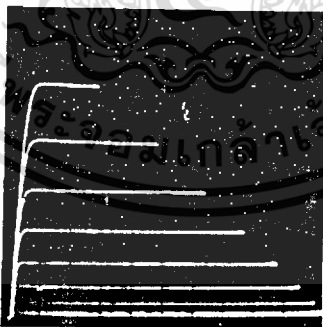
$a = 20 \mu\text{m}$



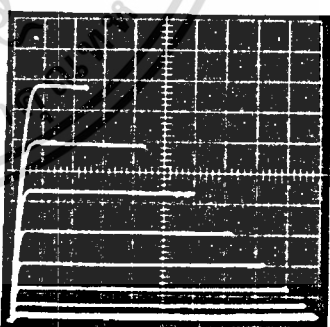
$a = 30 \mu\text{m}$



$a = 40 \mu\text{m}$



$a = 50 \mu\text{m}$

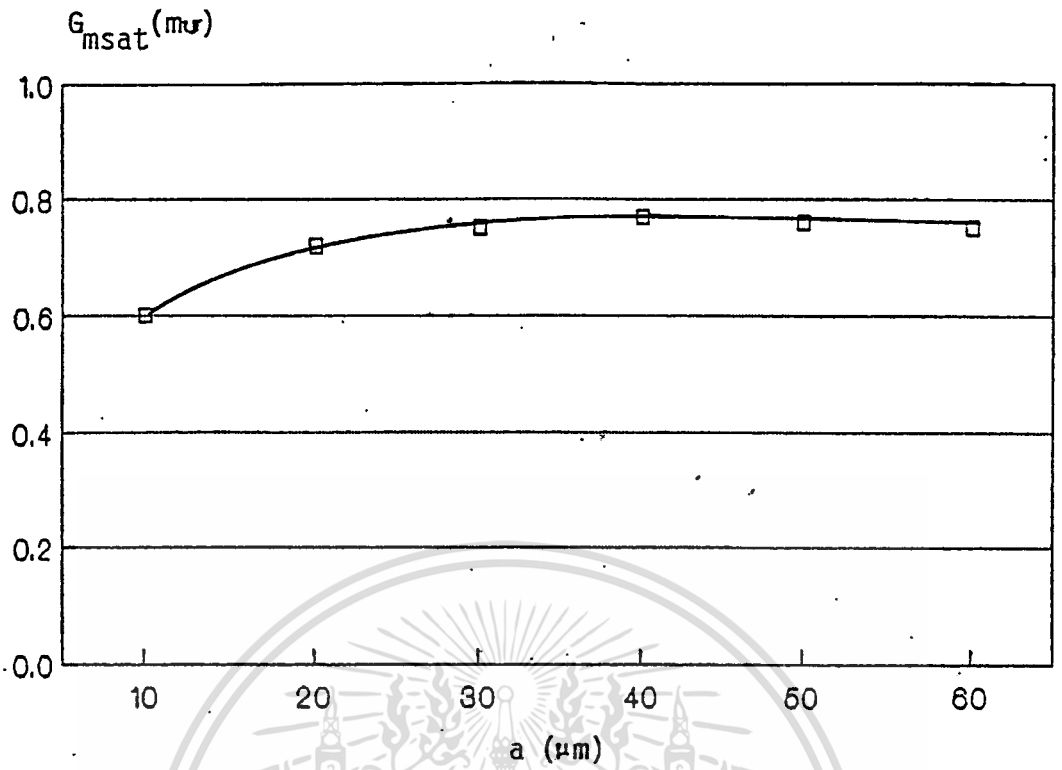


$a = 60 \mu\text{m}$

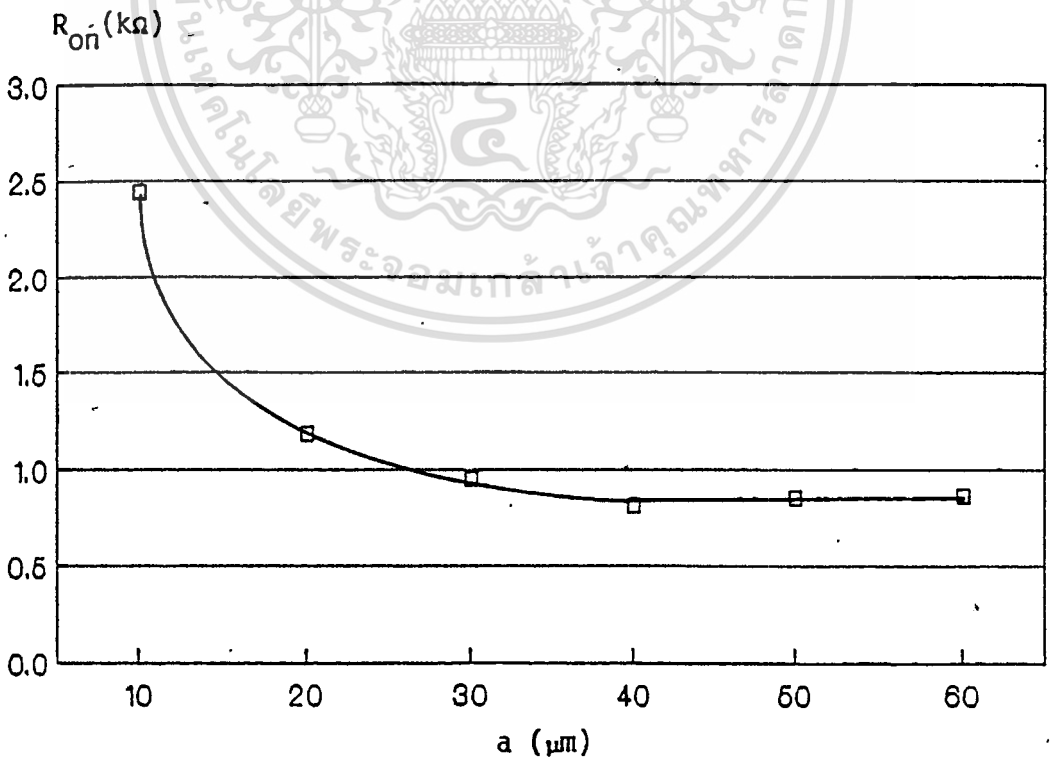
Ver. : 2 mA/div. , Hor. : 10 V/div. , Step : 2 V , No. of step : 8

รูปที่ 5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ของดีมอสที่มี $L = 10 \mu\text{m}$ และ $W = 800 \mu\text{m}$ เพื่อพิจารณาผลกระทบระหว่างกระแสเดรนกับระยะห่างระหว่างเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{msat} กับระยะ a ของดีมอสที่มีขนาด $L = 10 \mu\text{m}$ และ $W = 800 \mu\text{m}$ วัดที่ $V_{DS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 10 \text{ V}$



รูปที่ 5.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{on} กับระยะ a ของดีมอสที่มีขนาด $L = 10 \mu\text{m}$ และ $W = 800 \mu\text{m}$ วัดที่ $V_{DS} = 15 \text{ V}$ และ $V_{GS} = 10 \text{ V}$

จากผลการทดลอง พบว่าพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างเซลล์ที่น้อยกว่าระยะ a_0 คือ กระแสเดรน ทรานคอนดักแตนซ์ และความต้านทานในภาชนะนำกระแส โดยกระแสเดรนที่ได้จะมีค่าลดลง เนื่องจากผลของการไบอัสย้อนกลับระหว่างส่วน P-base กับส่วน N-drift ทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น นั่นคือ ช่องทางการไหลของกระแสเดรนจะมีขนาดลดลง กระแสเดรนจึงไหลได้ไม่สะดวกทำให้ปริมาณการไหลลดลง จากผลของกระแสเดรนที่ลดลงนี้จะทำให้ทรานคอนดักแตนซ์ที่ได้มีค่าลดลงด้วย เนื่องจากทรานคอนดักแตนซ์เป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนกับแรงดันเกต-ซอส ในรูปที่ 5.31 แสดงให้เห็นว่า ทรานคอนดักแตนซ์มีค่าคงที่จนกระทั่งระยะห่างระหว่างเซลล์ลดลงต่ำกว่า $40 \mu\text{m}$ ทรานคอนดักแตนซ์จึงเริ่มมีค่าลดลง ส่วนความต้านทานในภาชนะนำกระแสจะมีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากกระแสเดรนที่ลดลงด้วย ซึ่งในรูปที่ 5.32 จะพบว่าความต้านทานในภาชนะนำกระแสมีค่าคงที่จนกระทั่งระยะห่างระหว่างเซลล์ต่ำกว่า $40 \mu\text{m}$ ความต้านทานภายในภาชนะนำกระแสจึงเริ่มมีค่าสูงขึ้น

ส่วนพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างเซลล์ คือ แรงดันนึ่งทลาย = 150 V กระแสรั่วไหล = 0.3 mA แรงดันขีดเริ่ม = 4.2–4.8 V และการตอบสนองความถี่จะได้ $t_r = 0.26 \mu\text{s}$, $t_f = 1.20 \mu\text{s}$ $t_{d(\text{on})} = 0.10 \mu\text{s}$ และ $t_{d(\text{off})} = 0.70 \mu\text{s}$

จากการทดลองจะสรุปได้ว่า การศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างเซลล์ที่ได้ออกแบบให้มีขนาดจาก 10 - 60 μm พบว่าระยะห่างระหว่างเซลล์มีขนาดลดลงต่ำกว่าระยะ minimum spacing ($a_0 = 40 \mu\text{m}$) ลงไปจะเริ่มมีผลต่อการไหลของกระแสเดรน ทรานคอนดักแตนซ์ และความต้านทานในภาชนะนำกระแส ดังนั้นในการออกแบบดีมอสควรวอกแบบให้ระยะห่างระหว่างเซลล์อย่างน้อยที่สุด คือ 40 μm จึงจะหลีกเลี่ยงการเกิดผลกระทบของโครงสร้างแฝงของเจเฟตได้

5.8 การทดสอบโครงสร้างพื้นฐานทางเรขาคณิตและการทำงานของมอสเฟตกำลังแบบวีมอส

จากการศึกษาในหัวข้อที่ 5.2 พบว่าการนำกระแสของดีมอสจะแปรผกผันกับความยาวของช่องทางเดินกระแส กล่าวคือถ้าต้องการให้ดีมอสนำกระแสไฟฟ้าได้สูง ๆ จะต้องออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าสั้น ๆ แต่เนื่องจากดีมอสเป็นอุปกรณ์ที่มีช่องทางเดินกระแสอยู่ทางด้านบนของแผ่นผลึก ซึ่งการสร้างช่องทางเดินกระแสของดีมอสจะถูกกำหนดด้วยกระบวนการโฟโวลิติกกราฟฟี ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 5.2 ดีมอสจะมีความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้นเท่ากับ 10 μm ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างของมอสเฟตกำลังแบบใหม่ เพื่อลดขนาดของช่องทางเดินกระแส นั่นคือ โครงสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส

สำหรับการทดสอบโครงสร้างพื้นฐาน และการทำงานของวีมอสจะทำการทดสอบเหมือนกับการทดสอบดีมอสในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว โดยทำการทดสอบดังนี้ คือ

- (ก) การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นของวีมอส
- (ข) การทดสอบการทำงานของวีมอสในลักษณะของทรานซิสเตอร์
- (ค) การวัดการตอบสนองความถี่

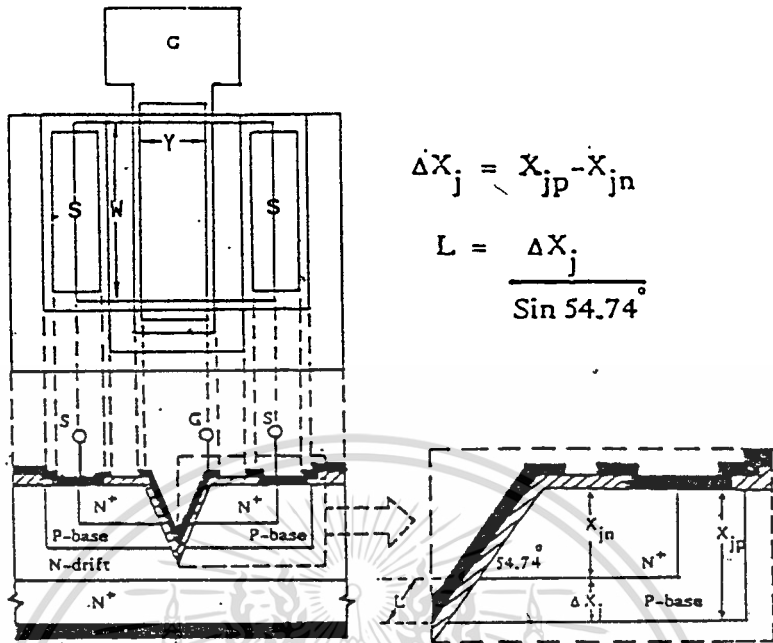
การออกแบบและสร้าง

ในการทดสอบโครงสร้างพื้นฐาน และการทำงานของวีมอส ได้ทำการออกแบบวีมอสให้มีความยาวของช่องกักเป็นร่องตัววี (Y) เท่ากับ $10\ \mu\text{m}$ และความกว้างของช่องทางเดินกระแส เท่ากับ $800\ \mu\text{m}$ สำหรับในรูปที่ 5.33 เป็นการออกแบบลวดลายต้นแบบด้านบน และภาพตัดขวางของวีมอส ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความยาวของช่องกักเป็นร่องตัววี ความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส มุมของร่องตัววีที่ทำมุมกับผิวหน้าแผ่นผลึก 54.74° และแสดงการหาความยาวของช่องทางเดินกระแส

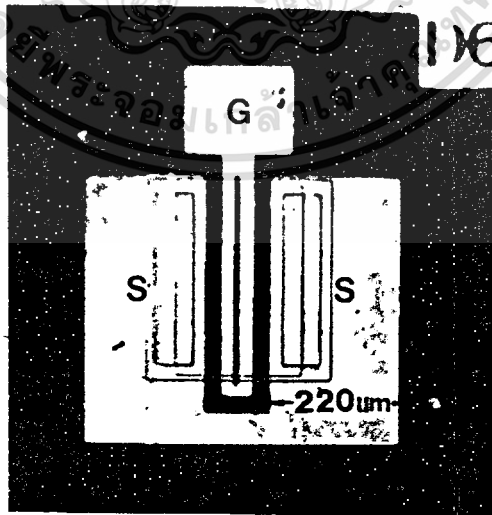
สำหรับกระบวนการสร้างวีมอสได้สร้างขึ้นตามกระบวนการสร้างที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยใช้แผ่นผลึกเริ่มต้นแบบอินทิเทกเซียล N/N^+ ความหนาของอินทิเทกเซียล $20\ \mu\text{m}$ ระบาย (100) นิกัดความต้านทาน $5.5\text{--}5.7\ \Omega\text{-cm}$ โดยแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P-base มีค่า $5.0 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N^+ -source มีค่า $1.10 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ จากนั้นนำแผ่นผลึกซิลิกอนไปกัดเป็นร่องตัววี แบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) ในสารละลาย PED ซึ่งเป็นส่วนผสมของ pyrocatechol ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$), ethylenediamine ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$) และน้ำบริสุทธิ์ (DI) เป็นเวลา 5 นาที (อัตราการกัด $1.55\ \mu\text{m}/\text{นาที}$) ได้ความลึกในแนวตั้งจากด้านบนผิวผลึกถึงปลายร่องตัววีเท่ากับ $7.75\ \mu\text{m}$ แล้วจึงนำไปสร้างเกตออกไซด์ และชั้นสัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกต และซอส ในรูปที่ 5.34 เป็นภาพถ่ายด้านบนของวีมอสที่สร้างขึ้นที่จะใช้ทดสอบการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ และการตอบสนองความถี่ ส่วนวีมอสที่ใช้ทดสอบรอยต่อพี-เอ็นจะมีขนาดเดียวกันกับรูปที่ 5.34 เพียงแต่แยกอะลูมิเนียมของส่วน N^+ -source และส่วน P-base ออกจากกัน

การทดลองและผลการทดลอง[21]

นำเอาวีมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น และการทดสอบการทำงานของทรานซิสเตอร์ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.35 ส่วนการวัดการตอบสนองความถี่จะหาในลักษณะเดียวกับหัวข้อที่ 5.6 สำหรับตารางที่ 5.5 เป็นตารางแสดงพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการสร้าง



รูปที่ 5.33 การออกแบบหลอดลายต้นแบบด้านบน ภาพตัดขวาง และแสดงการหาความยาวของช่องทางเดินกระแสของวีมอส



รูปที่ 5.34 ภาพถ่ายด้านบนของวีมอสที่สร้างเสร็จแล้ว ขนาด L = 2.9 μm และ

W = 800 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

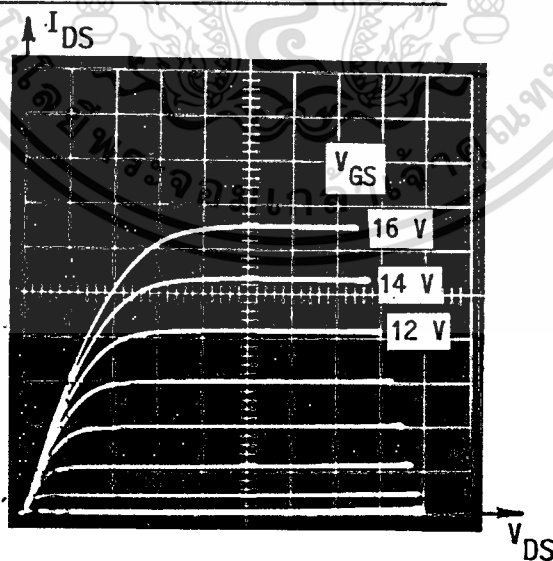
ตารางที่ 5.5 แสดงพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการสร้างวีโมส

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย
ความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน N ⁺ -source	1.10×10^{18}	cm^{-3}
ความหนาแน่นอะตอมสารเจือส่วน P-base	5.0×10^{16}	cm^{-3}
ความลึกของรอยต่อ P-base	3.85	μm
ความลึกรอยต่อ N ⁺ -source	1.50	μm
ความยาวของช่องทางเดินกระแส	2.90	μm
ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	800	μm
ความหนาของเกตออกไซด์	1500	\AA
แรงดันขีดเริ่ม	3.00	V

(ก) การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า รอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N⁺-source กับ P-base และ P-base กับ N-drift ที่สร้างขึ้นมีความสมบูรณ์ดีพอที่จะสร้างเป็นวีโมส แรงดันบังทลายของรอยต่อระหว่าง N⁺-source กับ P-base มีค่าเท่ากับ 12 V และแรงดันบังทลายของรอยต่อระหว่าง P-base กับ N-drift มีค่าเท่ากับ 120 V

(ข) การทดสอบการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์



Ver. : 5 mA/div. , Hor. : 5 V/cm , Step : 2 V , No. of step : 8

รูปที่ 5.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} เพื่อทดสอบการทำงาน
ในลักษณะของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปแบบที่ 5.35 แสดงว่า ดัชนีการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ ได้เป็นอย่างดี โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนี้คือ กระแสเดรนเท่ากับ 33 mA^* ทรานคอนดักแตนซ์เท่ากับ 3 mS^* ความต้านทานในภาวนำกระแสเท่ากับ 300Ω กระแสรั่วไหลเท่ากับ $0.5 \mu\text{A}^{**}$ และแรงดันพังทลายเท่ากับ 120 V^{***}

(ค) การวัดการตอบสนองความถี่

ผลของการตอบสนองความถี่ จากสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่วัดได้ คือ

$$\begin{aligned} t_r &= 0.11 \mu\text{s}, & t_f &= 0.97 \mu\text{s} \\ t_{\text{don}} &= 0.02 \mu\text{s}, & t_{\text{doff}} &= 0.075 \mu\text{s} \end{aligned}$$

ส่วนความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจากเครื่อง HP4271B 1MHz digital LCR meter เพื่อหาค่าการตอบสนองความถี่สูงสุดทางด้านอินพุต ซึ่งจะความจุไฟฟ้าส่วนต่าง ๆ มีค่าดังนี้ คือ

$$C_{\text{iss}} = 27.61 \text{ pF}, \quad C_{\text{oss}} = 57.64 \text{ pF} \quad \text{และ} \quad C_{\text{res}} = 15.14 \text{ pF}$$

เมื่อนำ C_{iss} ไปแทนลงในสมการที่ (2.40) เพื่อหาค่าความถี่คัท-ออฟ จะได้ความถี่คัท-ออฟ = 11.87 MHz

จากผลการทดลองจะสรุปได้ว่า การออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีโมส เพื่อทดสอบโครงสร้างและการทำงานจากโครงสร้างวีโมสที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ วีโมสที่สร้างขึ้นสามารถทำงานเป็นทรานซิสเตอร์ได้ โดยมีความยาวของช่องทางเดินกระแสของวีโมสเพียง $2.9 \mu\text{m}$ เนื่องจากโครงสร้างของวีโมสเป็นโครงสร้างที่ไม่อยู่ในแนวระนาบ (nonplanar) ประกอบกับอาศัยเทคนิคการกัดซิลิกอน แบบแอนไอโซทรอปิก และเทคนิคการแพร่สารเจือด้วยความร้อน จึงทำให้วีโมสไม่ขึ้นกับขีดจำกัดจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเหมือนกับกรณีของดิมอสจากการเปรียบเทียบการนำกระแสเดรนระหว่างวีโมสกับดิมอสจะพบว่า วีโมสนำกระแสเดรนได้สูงกว่าดิมอสถึง 2.75 เท่า

หมายเหตุ * วัดที่ $V_{\text{GS}} = 16 \text{ V}$, $V_{\text{DS}} = 20 \text{ V}$

** วัดที่ $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$, $V_{\text{DS}} = 90 \text{ V}$

*** วัดที่ $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$

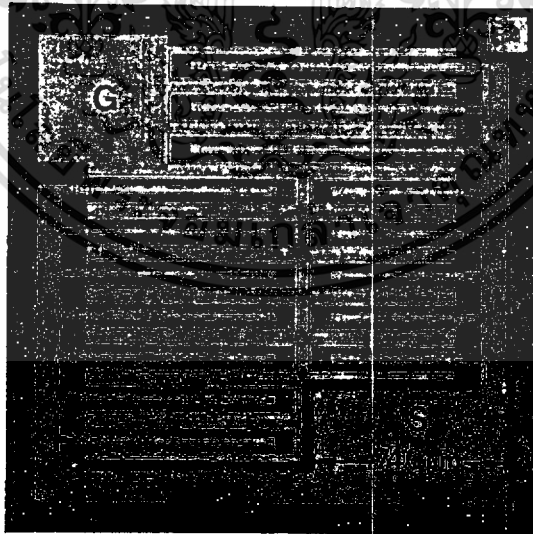
5.9 การทดสอบมอสเฟตกำลังแบบดีมอส โครงสร้างขนาดใหญ่

หลังจากได้ทำการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟตกำลัง โครงสร้างขนาดเล็กจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจแล้ว จึงได้นำข้อมูลจากการทดลองเหล่านี้มาทำการออกแบบ และสร้างเป็นมอสเฟตกำลัง โครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งในที่นี่จะนำเสนอเฉพาะ โครงสร้างของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสเท่านั้น

การออกแบบและสร้าง

ในการทดสอบมอสเฟตกำลังแบบดีมอส โครงสร้างขนาดใหญ่ จึงทำการออกแบบให้ดีมอส มีความยาวของช่องทางเดินกระแส $10 \mu\text{m}$ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส $36,620 \mu\text{m}$

กระบวนการสร้าง ได้สร้างดีมอสขึ้นตามกระบวนการสร้างมาตรฐาน โดยใช้แผ่นซิลิกอนกรีนเริ่มต้นแบบอินทิเทกเซียล N/N^+ ความหนาของอินทิเทกเซียล $20 \mu\text{m}$ ระบาย (100) นิกัดความต้านทาน $5.5-5.7 \Omega\text{-cm}$ โดยแพร่สารเจือในส่วน P-base มีค่า $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือส่วน N^+ -source มีค่า $1.10 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ แล้วจึงนำไปสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะเป็นส่วนเดรน เกตและซอส ในรูปที่ 5.36 เป็นภาพถ่ายด้านบนของดีมอสที่สร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 5.36 ภาพถ่ายด้านบนของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส โครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่ง

มีขนาดของชิพ $2 \times 2 \text{ mm}^2$, $L = 10 \mu\text{m}$ และ $W = 36,620 \mu\text{m}$

การทดลองและผลการทดลอง

นำดีมอสโคร่งสร้างขนาดใหญ่ที่สร้างเสร็จแล้วมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ในทำนองเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมาแล้ว ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอสโคร่งสร้างขนาดใหญ่

พารามิเตอร์	ดีมอส	หน่วย
L	10	μm
W	36,620	μm
MAXIMUM RATINGS		
I_{DS} ($V_{GS} = 16 \text{ V}, T_c = 25^\circ\text{C}$)	2.1	A
V_{BV} ($V_{GS} = 0 \text{ V}$)	160	V
OFF CHARACTERISTICS		
I_{DSS} ($V_{GS} = 0 \text{ V}, V_{DS} = 90 \text{ V}$)	5.2	mA
ON CHARACTERISTICS		
V_{TH}	2.80	V
R_{on} ($V_{GS} = 16 \text{ V}, I_{DS} = 2.0 \text{ A}$)	3.33	Ω
g_{msat} ($V_{GS} = 16 \text{ V}, V_{DS} = 15 \text{ V}$)	160	mS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ดีมอส	หน่วย
DYNAMIC CHARACTERISTICS		
C_{iss}	490.50	pF
C_{oss} ($V_{DS} = 20 \text{ V}, V_{GS} = 0 \text{ V}$)	87.90	pF
C_{rss}	62.40	pF
SWITCHING CHARACTERISTICS		
f_T	51.92	MHz
t_r	0.04	μs
t_f ($V_{GS} = 15 \text{ V}, V_{DD} = 15 \text{ V}$)	0.70	μs
$t_{d(on)}$	0.08	μs
$t_{d(off)}$	0.85	μs

จากผลการทดลองแสดงว่าดีมอส โครงสร้างขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้นสามารถที่จะใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังปานกลาง ซึ่งสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 2.1 A (ที่แรงดันเกต 16 V) ถ้าต้องการให้นำกระแสไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าได้สูงกว่านี้ จะต้องออกแบบให้ดีมอสมีความกว้างของช่องทางเดินกระแสมากกว่านี้ นั่นหมายความว่าดีมอสจะต้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีปัญหาทั้งในกระบวนการสร้าง ผลผลิต และความเชื่อถือ จึงจำเป็นที่จะต้องหาทางแก้ไขปรับปรุง โดยการลดพื้นที่ส่วนที่ไม่จำเป็นลง การลดความยาวของช่องทางเดินกระแส โดยอาศัยเทคนิคต่างๆ เข้าช่วย ตลอดจนเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอสเฟตกำลัง จึงจะทำให้มอสเฟตกำลังที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดียิ่งขึ้น ส่วนพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ให้ผลการทดลองที่เป็นไปในแนวโน้มนี้อย่างเดียวกับการทดลองที่ได้จากดีมอสโครงสร้างขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่ได้นำเสนอทั้งหมดนี้จะเห็นว่า ดีมอสที่สร้างขึ้นยังไม่ได้ทำการทดสอบผลทางอุณหภูมิ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดอีกตัวหนึ่ง เนื่องมาจากจะต้องสร้างและทดสอบอุปกรณ์จนมีความมั่นใจในเรื่องของผลผลิต และความเชื่อถือที่สูงพอสมควร แล้วจึงจะทำการทดสอบผลทางอุณหภูมิในโอกาสต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและบทวิจารณ์

การสร้างมอสเฟตกำลังด้วยเทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อนในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สามารถสร้างขึ้นได้และให้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง ถึงแม้ว่าจะมีปัญหาบางประการที่จะต้องทำการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเหล่านั้นต่อไป เพื่อให้ได้มอสเฟตกำลังที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการออกแบบ แต่จากการศึกษาและการทดลองนานถึง 4 ปีได้ผลการทดลองพอที่จะนำไปหาข้อสรุปเป็นแนวทางในการออกแบบ และกระบวนการสร้างที่เป็นมาตรฐานของมอสเฟตกำลังได้ ซึ่งเริ่มต้นทำการศึกษาวารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญจากมอสเฟตกำลังแบบดีมอสและวีมอสโครงสร้างขนาดเล็ก และนำผลการทดลองที่ได้ไปปรับปรุงให้เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างเป็นมอสเฟตกำลังโครงสร้างขนาดใหญ่ (เฉพาะมอสเฟตกำลังแบบดีมอสเท่านั้น) จากการสร้างดีมอสโครงสร้างขนาดใหญ่ในหัวข้อที่ 5.9 พบว่าดีมอสที่สร้างขึ้น (พื้นที่ของขั้วขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$, $L = 10 \text{ }\mu\text{m}$ และ $W = 36,620 \text{ }\mu\text{m}$) มีการนำกระแสเดรน 2.1 A อย่างไรก็ดี มอสเฟตกำลังที่มีขายกันในท้องตลาดสามารถนำกระแสเดรนได้สูงกว่า เนื่องจากกระบวนการสร้างที่แตกต่างกัน สำหรับการสร้างมอสเฟตกำลังในเชิงพาณิชย์จะใช้เทคโนโลยีไอออนอิมพลานเตชัน (Ion Implantation Technology) ซึ่งสามารถสร้างความยาวของช่องทางเดินกระแสได้สั้นมากประมาณ 1-2 μm ในขณะที่กระบวนการสร้างดีมอสในห้องปฏิบัติการของเราสร้างความยาวของช่องทางเดินกระแสได้ 10 μm เนื่องจากขีดจำกัดของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ที่จริงแล้วนอกจากการลดขนาดของความยาวของช่องทางเดินกระแส การเพิ่มขนาดของความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีผลทำให้กระแสเดรนมีค่าสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อเราเพิ่มขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแสจะทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทําให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าบางตัวทำงานด้อยลงและยังส่งผลให้ผลผลิต (yeild) หรือความเชื่อถือ (reliability) ของอุปกรณ์มีค่าลดลงอย่างมาก มีสาเหตุจากหลายประการ เช่น ความสะอาดในการสร้าง การแตกตัวหรือการบิดเบือนของอะตอมหรือจุดชำรุดของผลึกจากการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูง ๆ รวมถึงความแม่นยำในการถ่ายต้นแบบกระจกจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เป็นต้น ดังนั้นขีดจำกัดในเรื่องการออกแบบให้ดีมอสมีขนาดใหญ่ ๆ เพื่อให้ได้กระแสเดรนสูง ๆ จึงเป็นปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่ง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าขนาดของตัวอุปกรณ์จะเป็นขีดจำกัดในการสร้างดีมอส ด้วยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน แต่เราสามารถหลีกเลี่ยงกรณีนี้ได้โดยการออกแบบและสร้างเป็นวีมอสแทน ซึ่งสามารถลดขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสให้สั้นได้ถึง 2.9 μm [21]

ผลการทดลองของการศึกษา ออกแบบ สร้าง และการพัฒนา มอสเฟตกำลังสรุปได้ดังนี้ คือ จากการทดสอบโครงสร้างพื้นฐานทาง เรขาคณิต โดยการทดสอบคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าของรอยต่อ พี-เอ็นและทดสอบการทำงาน ในลักษณะของทรานซิสเตอร์ - ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้นสมบูรณ์ดีพอที่จะสร้างเป็นดีมอส และในการทดสอบการทำงานเป็นทรานซิสเตอร์ได้กราฟคุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสที่ดี แต่กระแสเดรนมีค่าต่ำ เนื่องจากดีมอสนี้สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (111) ซึ่งมีความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอน $\mu_{n(๑๑๑)}$ ที่ผิวต่ำกว่าแผ่นผลึกระนาบ (100) ประมาณ 3 เท่า [$\mu_{n(๑๑๑)}$ ที่ผิวระนาบ (100) = 201 $\text{cm}^2/\text{V-s}$ และ $\mu_{n(๑๑๑)}$ ที่ผิวระนาบ (111) = 64 $\text{cm}^2/\text{V-s}$] ดังนั้นถ้าเราสร้างดีมอสบนแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) จะได้กระแสเดรนสูงกว่าสร้างบนระนาบ (111) ถึง 3 เท่า และเมื่อนิจารณาจากโครงสร้างดีมอส พบว่าความลึกของส่วน P-base จะถูกสร้างให้ลึกกว่าส่วน N^+ -source เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วน N^+ -source แพร่ซิมลงไปจนถึงส่วน N-drift ทำให้ดีมอสไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่สารเจือของฟอสฟอรัสมีค่าสูงกว่าของโบรอน หรือถ้าส่วนของ N^+ -source แพร่ซิมลงไปที่ใกล้กับส่วน P-base มาก ๆ จะทำให้แรงดันพังทลายของอุปกรณ์มีค่าต่ำลง เพราะว่าเกิดเป็นแรงดันพังทลายแบบกั้นรั้วระหว่างรอยต่อ N^+ -source กับส่วน P-base แทนที่จะเกิดแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ระหว่างรอยต่อ P-base กับ N-drift. ดังนั้นในกระบวนการสร้างดีมอสจึงให้ระยะห่างระหว่าง N^+ -source กับ P-base กว้าง ๆ โดยในกระบวนการสร้างมาตรฐานจึงกำหนดเวลาที่ใช้ในการซัปลึกส่วน P-base นานถึง 14 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1100°C ได้ความลึกของรอยต่อ (x_{jP}) $\approx 3.5-3.8 \mu\text{m}$ ในขณะที่ส่วน N^+ -source ใช้เวลาซัปลึกเพียง 40 นาที ที่อุณหภูมิ 1100°C เช่นกัน ได้ความลึกของรอยต่อ (x_{jN}) $\approx 1.5-2.0 \mu\text{m}$ แต่ผลจากการซัปลึกด้วยเวลาที่นานเช่นนี้จะทำให้แผ่นผลึกซิลิกอนเกิดจุดชำรุดมากขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วไหล (I_{DSS}) ของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าสูงขึ้นด้วย

การเปลี่ยนแปลงความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสจะทำให้กระแสเดรนมีค่าสูงขึ้นมากกว่าผลที่ได้จากการสร้างดีมอสบนแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) จากผลการทดลองพบว่าการลดขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสและเพิ่มความกว้างของช่องทางเดินกระแสจะทำให้กระแสเดรนและทรานคอนดักแตนซ์สูงขึ้น ในขณะที่ความต้านทานในภาชนะนำกระแสลดลง อย่างไรก็ตามการลดขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสให้สั้นมาก ๆ และการเพิ่มความกว้างของช่องทางเดินกระแสให้มากขึ้นจะเกิดขัดจำกัดกับกระบวนการสร้าง ผลผลิตและความเชื่อถือของอุปกรณ์ ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว ดังนั้นในการสร้างดีมอสโครงสร้างขนาดใหญ่ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแส = 10 μm และความกว้างของช่องทางเดินกระแส = 36,620 μm

ในการควบคุมแรงดันขีดเริ่ม เพื่อไม่ให้แรงดันขีดเริ่มสูงหรือต่ำเกินไปนั้น วิธีการควบคุมความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดกับมอสเฟตกำลังที่ได้สร้างขึ้น โดยต้องการให้แรงดันขีดเริ่มอยู่ในช่วง 2-4 V ดังนั้นในกระบวนการสร้างมาตรฐานจึงได้กำหนดให้ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ผิวของส่วน P-base เท่ากับ $5.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ (ได้จากการแพร่สารเจือโบรอนไนไตรด์ (BN) ที่อุณหภูมิ 820°C เป็นเวลา 20 นาทีและทำการซัปลึกที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1100°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง) จะได้แรงดันขีดเริ่มประมาณ 3 V นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องทางเดินกระแสจะทำให้แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนแปลงไปด้วย นั่นคือถ้าลดความยาวของช่องทางเดินกระแสให้ต่ำกว่า 10 μm จะทำให้แรงดันขีดเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นผลกระทบนี้จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่มีส่วนในการออกแบบให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น 10 μm

แรงดันพังทลายเป็นพารามิเตอร์หลักที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่งของดีมอส เพราะว่าในอุปกรณ์กำลังต้องการให้แรงดันพังทลายมีค่าสูง ๆ ซึ่งแรงดันพังทลายจะมีค่าสูงสุดจะต้องเกิดเป็นแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ และไม่มีผลกระทบเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบด้านข้างของรอยต่อ ในโครงสร้างของดีมอสแรงดันพังทลายจะเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างส่วน P-base กับ N-drift ความกว้างระหว่างส่วน N^+ -source กับส่วน P-base และส่วน P-base กับส่วน N-drift มีความสัมพันธ์กับการเกิดแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ จากการคำนวณจะต้องสร้างให้ระยะห่างระหว่างส่วน N^+ -source กับส่วน P-base และส่วน P-base กับส่วน N-drift มีความกว้างอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 2.2 μm และ 16 μm ตามลำดับ (ในกรณีที่ดีมอสสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนแบบอินเทกเซียล N/ N^+ ชั้นอินทิเทกเซียลหนา 20 μm และมีพิกัดความต้านทาน 5.5 $\Omega\text{-cm}$) จึงจะทำให้เกิดแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์เท่ากับ 200 V แต่ถ้าระยะห่างทั้งสองมีค่าน้อยกว่านี้จะทำให้เกิดแรงดันแบบพันธ์ทรู เป็นผลให้แรงดันพังทลายมีค่าลดลง จากผลการทดลองการเกิดแรงดันพังทลายจากโครงสร้างของไดโอด ซึ่งง่ายในการสร้าง ง่ายในการทำความเข้าใจในการเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ และยังสามารถควบคุมไม่ให้เกิดแรงดันพังทลายแบบพันธ์ทรูด้วย ผลการทดลองพบว่าเมื่อสร้างไดโอดที่มีระยะห่างของพีวีสริงค์ 63 μm และพีวีสเปลตกว้าง 36.5 μm จะได้แรงดันพังทลายถึง 200 V และเมื่อนำผลการทดลองนี้ไปออกแบบร่วมกับดีมอส แรงดันพังทลายของดีมอสจะมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันพังทลายที่ได้ศึกษาจากกรณีของ ไดโอดที่มีพีวีสเปลต ซึ่งแสดงว่าเราสามารถปรับปรุงแรงดันพังทลายของดีมอสให้สูงขึ้นกว่าเดิม แต่จากการสร้างดีมอสที่ผ่านมา พบว่าระยะห่างระหว่าง N^+ -source กับส่วน P-base และส่วน P-base กับส่วน N-drift มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณ (ดีมอสที่สร้างขึ้นมีความลึกของรอยต่อส่วน P-base = 3.8 μm และความลึกของรอยต่อ N^+ -source = 1.5 μm ดังนั้นระยะห่างระหว่างส่วน N^+ -source กับส่วน P-base = 2.3 μm และระยะห่างระหว่าง P-base กับส่วน N-drift = 16.2 μm) ดังนั้นถ้ารอยต่อทั้งสองที่สร้างขึ้นเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย จะทำให้เกิดแรงดันพังทลายแบบพันธ์ทรู แทนที่จะเกิดเป็นแบบอะวาลานซ์ได้ วิธีแก้ไขสามารถทำได้โดยการขยับลึกให้ส่วน P-base ลงไปลึกกว่าเดิมบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาของชั้นอินทิเทกเซียลมากกว่า 20 μm แต่ผลที่จะตามมา นั่นคือ มีกระแสรั่วไหลมากขึ้นและความต้านทานในภาวการณ์กระแสจะสูงขึ้นด้วย

ในการตอบสนองความถี่ของดีมอสจะขึ้นกับความยาวของช่องทางเดินกระแสและความจุไฟฟ้าแฝงในโครงสร้างของดีมอส คือ C_{gs} , C_{gd} และ C_{ds} ซึ่งวัดในเทอมของ C_{iss} , C_{oss} และ C_{rss} ผลจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเราลดความยาวของช่องทางเดินกระแสและความจุไฟฟ้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าด้านอินพุทของดีมอสจะมีการตอบสนองความถี่สูงขึ้น ดังเช่น เมื่อสร้างให้ดีมอสมีความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ $10 \mu\text{m}$ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส $800 \mu\text{m}$ ความจุไฟฟ้าด้านอินพุท 32.36 pF จะได้ความถี่คัท-ออฟ 17.34 MHz แต่เมื่อให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่าเดิม $10 \mu\text{m}$ ในขณะที่ความกว้างของช่องทางเดินสูงขึ้นเป็น $22,000 \mu\text{m}$ ความจุไฟฟ้าสูงขึ้นเป็น 280 pF จะทำให้ความถี่คัท-ออฟลดลงเป็น 2.05 MHz และเมื่อต้องการให้กระแสเดรนไหลสูงขึ้นอีก จึงต้องออกแบบให้ความกว้างของช่องทางเดินกระแสมากขึ้น ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิม การตอบสนองความถี่จะลดลงไปอีก อย่างไรก็ตามก็ยังยังสามารถที่จะลดความจุไฟฟ้าแฝงได้บ้างจากการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วนเกทให้หนา ๆ เนื่องจากความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ ลดส่วนซ้อนทับ (overlap) ระหว่างส่วน N^+ -source และส่วน N-drift ให้เล็กที่สุด และออกแบบลวดลายอะลูมิเนียมให้เป็นระเบียบและมีขนาดเล็กที่สุด นอกจากคุณสมบัติหลัก ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ในโครงสร้างของดีมอสยังมีโครงสร้างแฝงหลายตัวที่ทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง คือ โครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะมีผลกระทบทำให้กระแสรั่วไหลมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องกำจัดโครงสร้างแฝงนี้โดยการเชื่อมต่อส่วน N^+ -source เข้ากับส่วน P-base ด้วยลวดลายโลหะอะลูมิเนียม สำหรับโครงสร้างแฝงอีกชนิดที่จะกล่าวถึง คือ โครงสร้างแฝงของเจแปต ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับการไหลของกระแสเดรน ซึ่งทำให้กระแสเดรนมีค่าลดลง จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างเซลล์ที่น้อยที่สุด (a_0) เท่ากับ $40 \mu\text{m}$ จึงจะไม่ทำให้เกิดผลกระทบชนิดนี้ขึ้น

จากผลการทดลองของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสทั้งหมด ได้นำมาใช้ในการออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอสที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ที่มีความยาวของช่องทางเดินกระแส $10 \mu\text{m}$ และความกว้างของช่องทางเดินกระแส $36,620 \mu\text{m}$ ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าหลัก ๆ เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ดังนี้ คือ กระแสเดรน 2.1 A ทนแรงดันได้ 160 V และความถี่คัท-ออฟ 51.92 MHz

นอกจากการนำเสนอมอสเฟตกำลังแบบดีมอสแล้ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้นำเสนอมอสเฟตกำลังแบบวีมอสด้วย เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงให้มอสเฟตกำลังสามารถนำกระแสได้สูงขึ้น โดยการลดขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส ซึ่งในกรณีของวีมอสการสร้าง ความยาวของช่องทางเดินกระแสจะไม่ขึ้นกับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแต่จะขึ้นกับเทคนิคการแพร่สาร เจือด้วยความร้อน ซึ่งในการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้าง ความยาวของช่องทางเดินกระแสได้สั้นถึง $2.9 \mu\text{m}$ แต่กระบวนการสร้างวีมอสจะมีความยุ่งยากมากกว่า เนื่องจากเพิ่มขึ้นขั้นตอนการกัดซิลิกอนเป็นร่องตัววี

ดังนั้นจากการศึกษา ออกแบบ สร้าง และปรับปรุงมอสเฟตกำลังด้วยเทคนิค โอลิการแพร่สาร เจือด้วยความร้อน จึงนับได้ว่าเป็นก้าวหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวประเภทกำลังสูงขึ้นภายในประเทศและข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองเหล่านี้จะนำไปพัฒนาให้มอสเฟตกำลังมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในโอกาสต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การที่ผู้วิจัยสามารถทำการวิจัยและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเป็นรูปเล่มสมบูรณ์นี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช ผู้ให้คำปรึกษา วางแนวทาง ตลอดจนชี้แนะให้งานวิจัยนี้บรรลุเป้าหมาย ขอขอบคุณ อาจารย์สมชัย วงษ์เมตตา ผู้เริ่มงานวิจัยนี้ และให้คำปรึกษาแนะนำในการปฏิบัติงาน ตลอดจนแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ ขอขอบคุณ ผศ. วิสุมย์ จิตรุ่งเรือง ผู้ให้คำปรึกษาแนะนำทฤษฎีมอสเฟตและตรวจทานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ อาจารย์สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ผู้ให้คำปรึกษาเทคนิคการกัดแผ่นผลึกซิลิกอนในการสร้างวีมอส ขอขอบคุณ คุณวัชรชัย วรชิวาน จากบริษัทกิกเนติก จำกัด และคุณพรวิฑูร์ โนชิเวชกุล จากบริษัทงานทวิ จำกัด ผู้ให้ความช่วยเหลือในการตัดชิ้น และเก็บบรรจุลงตัวถัง TO-3 และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้ให้การสนับสนุนทางด้านการเรียนมาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

1. Krishna Shinai, Charles S. Korman, B.J. Baliga and P.A. Piacente, "A 50-V, 0.7-m², Vertical-Power DMOSFET", IEEE Electron Device Letters, Vol.10, No.3, March 1989, p. 101-103
2. Edison Fong, Dorman C. Pitzer and Richard J. Zeman, "Power DMOS for High-Frequency and Switching Applications", IEEE Transactions on Electron Devices, VOL. ED-27, No.2, February 1980, p. 322-330
3. S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & son Ltd., 1969, p. 505-506
4. Edwin S. Oxner, Power FETs and Their Applications, Prentice-Hall, Inc., 1982
5. B. Jayant Baliga, Modern Power Devices, John Wiley & Sons Ltd., 1987
6. Paul D. Taylor, Thyristor Design and Realization, John Wiley & Sons Ltd., 1987
7. J.V. Mccanny and J.C. White, VLSI Technology and Design, Academic Press, 1987, p. 32-36
8. L.A. Akers and J.J. Sanchez, "Threshold Voltage Models of Short, Narrow and Small Geometry MOSFET's:A Review", Solid-state Electronics, Vol.25, No.7, July 1982, p. 621-641
9. Adolph Blicher, Field-Effect and Bipolar Power Transistor Physics, Academic Press, 1981
10. Richard S. Muller and Theodore I. Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley & Sons Ltd., 1986, p. 424-435
11. Helmut F. Wolf, Semiconductors, John Wiley & Sons, Inc., 1971, p.176
12. S.M. Sze, Semiconductor Devices Physics and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 1985, p.207
13. Peter E. Gise and Richard Blanchard, Semiconductor and Integrated circuit Fabrication Techniques, Reston Publishing Company, Inc., 1979, p. 69-100
14. Motorola, Power MOSFET Transistor Data, Motorola, Inc., 1986

15. Michael s. Adler , Victor A. K. Temple , Armand P. Ferro and R. C. Rustay, " Theory and Breakdown Voltage for Planar Devices with a Single Field Limiting Ring ", IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. ED-24, February, 1977, p. 107-112
16. David J. Elliott, Integrated Circuit Fabrication Technology, McGraw-Hill, Publishing Company, 1989
17. สมเกียรติ ศุภเดช, ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ, สำนักพิมพ์วารสารอิเล็กทรอนิกส์เวิลด์, 2525
18. สมชัย วงษ์เมตตา, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และสมเกียรติ ศุภเดช, "ผลของความกว้างและความหนาแน่นของเซลล์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส", วารสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา, ครั้งที่ 11, พ.ศ. 2531, หน้า 5-21-1 ถึง 5-21-12
19. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, วิสุมิ จิตรุ่งเรือง และสมเกียรติ ศุภเดช, "การควบคุมและการเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส", วารสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา, ครั้งที่ 13, พ.ศ. 2533, หน้า 239 ถึง 250
20. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สมชัย วงษ์เมตตา และสมเกียรติ ศุภเดช, "ผลของระยะห่างระหว่างเซลล์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส", วารสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา, ครั้งที่ 12, พ.ศ. 2532 , หน้า 655 ถึง 664
21. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, พอล รุจนพิบูลย์, วิสุมิ จิตรุ่งเรือง และสมเกียรติ ศุภเดช, "การออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส", วารสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา, ครั้งที่ 14, พ.ศ. 2534, หน้า 2-46 ถึง 2-50
22. ชัญญะ คักดีโสภินธุ์, สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล และสมเกียรติ ศุภเดช, "การพัฒนาทรานซิสต์เซลล์ความดันเบสโซรียส์สกีป เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์", วารสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา, ครั้งที่ 12, พ.ศ. 2532, หน้า 573 ถึง 582

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.60×10^{-19}	C
ค่าคงที่ของ โบสมัน	k	1.38×10^{23}	J/K
ค่าคงที่ของพลังค์	h	6.63×10^{-34}	J-s
ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ	ϵ_0	8.85×10^{-14}	F/cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	ϵ_s	11.7	F/cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์	ϵ_{ox}	3.97	F/cm
ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัส ระหว่าง SiO ₂ กับ -ระนาบ (100)	Q _{SS}	1.4×10^{-8}	C/cm ²
-ระนาบ (111)	Q _{SS}	8.0×10^{-8}	C/cm ²
แรงดันเนื่องจากความร้อน (ที่อุณหภูมิห้อง, 300K)	kT/q	0.0259	mV

2. คุณสมบัติของซิลิกอน ไดออกไซด์

น้ำหนักอะตอม	60.08	
ความหนาแน่นอะตอม	2.3×10^{22}	cm ⁻³
ความต้านทาน (ที่ 300K)	$> 10^{16}$	Ω -cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_{ox})	3.9	
จุดหลอมเหลว	≈ 1700	°C
ความร้อนจำเพาะ	1.0	J/g°C
การนำความร้อน	0.014	W/cm°C
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	0.5×10^{-6}	(°C) ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คุณสมบัติของซิลิกอน

เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	
ความหนาแน่นอะตอม	2.96×10^{22}	cm^{-3}
ความหนาแน่น	2.328	g/cm^3
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	eV
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิจากพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3×10^{-4}	$\text{eV}/^{\circ}\text{C}$
จุดหลอมเหลว	1417	$^{\circ}\text{C}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว -ระนาบ(100)	580	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
-ระนาบ(111)	190	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร -ระนาบ(100)	1260	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
-ระนาบ(111)	1350	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิว -ระนาบ(100)	230	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
-ระนาบ(111)	-	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสาร -ระนาบ(100)	400	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
-ระนาบ(111)	480	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ดัชนีหักเห	3,420	
การนำความร้อน	1.57	$\text{W/cm}\cdot^{\circ}\text{C}$
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	$(^{\circ}\text{C})^{-1}$
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	$^{\circ}\text{A}$
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	cm^2/dyn
ฟังก์ชันงานของไฟโตมิตรอน	5.05	eV
ความแข็ง	7.0	MOHscale
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิกอนบริสุทธิ์	1.45×10^{10}	cm^{-3}
ความดันไอ	2.8×10^{-4}	mm Hg
โครงสร้างผลึก	f_{cc} , diamond	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดกระบวนการสร้างมอสเฟดกำลัง

1. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าแผ่นผลึกด้วยกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิว
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

หมายเหตุ การทำความสะอาดแผ่นผลึกในกระบวนการถัดมาจะเริ่มต้นจากการต้มในไตรโคลโรเอททีลีน

2. กระบวนการออกซิเดชันครั้งแรก (First oxidation)

เพื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ให้มีขนาดความหนาไม่น้อยกว่า 4000 \AA จึงต้องทำกระบวนการออกซิเดชัน โดยนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทั้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100°C แล้วทำการ

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 120 นาที โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที



รูปที่ ข1 การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอน



รูปที่ ข2 การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออกซิเดชั่นแบบขึ้น เป็นเวลานาน 60 นาที โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชั่นแบบแห้ง เป็นเวลา 60 นาที โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที

3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิกอน เพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ออก ผลึกซิลิกอน เพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ออก สำหรับการแพร่สารเจือ เปิดช่องเพื่อทำขั้ว โลหะ และสร้างลวดลายโลหะด้านบนแผ่นผลึก โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วนำไปอบให้แห้ง จึงนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกต้นแบบ สำหรับรายละเอียดของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีนี้ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

3.1 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้ น้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) มีลำดับขั้นตอนดังนี้ คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้ อุปกรณ์ spinner ความเร็ว 5000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบครั้งแรก (prebake) ให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยอุปกรณ์ mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลตออกมา แหล่งจ่ายแสง คือ หลอดเมอร์คิวรี ($\lambda = 5000 \text{ \AA}$) เป็นเวลา 10 วินาที
- การล้างภาพ จุ่มในน้ำยาล้างภาพ (xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1 นาที
จุ่มในน้ำยาทำความสะอาด (isoprophyl) 3 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (postbake) ให้นำแผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ทาด้านหลังแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสง (waycoat) แล้วนำไปอบแห้งอีกครั้ง เป็นเวลา 20 นาที
- นำไปกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ด้วยสารละลายเคมี ซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดซิลิกอน ไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลาย buffer มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ประมาณ 1000 °A/นาที
- นำไปลอกชั้นสารไวแสงชนิดลบที่ยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอนออก โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- แล้วนำไปทำความสะอาดผิวผลึก จึงจะสิ้นสุดกระบวนการนี้

3.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้หน้ายาไวแสงชนิดบวก (AZ-1350) ซึ่งใช้ในการสร้างลวดลายอะลูมิเนียมบนแผ่นผลึกจากกระจกต้นแบบแผ่นสุดท้าย มีลำดับขั้นตอนดังนี้ คือ

- อบแห้งแผ่นผลึกที่เคลือบอะลูมิเนียมเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบหน้ายาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ spinner ความเร็ว 5,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบครั้งแรก (prebake) ให้หน้ายาแห้งที่อุณหภูมิ $85\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยอุปกรณ์ mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- การล้างภาพ จุ่มในหน้ายา AZ-developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ ๓3 การถ่ายภาพจากกระจกต้นแบบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบครั้งที่สอง (postbake) ให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- นำแผ่นผลึก ไปกัดชั้นอะลูมิเนียมด้วยสารละลาย ซึ่งมีส่วนผสมของกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลายนี้ ซึ่งมีอุณหภูมิราว 50 °C เป็นเวลา 1-2 นาที
- นำไปลอกชั้นหน้ายาไวแสงชนิดบวกที่ยังคงค้างบนแผ่นผลึกออก โดย
 - จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4. กระบวนการแพร่สารเจือส่วน P-base (P-base deposition)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือโบรอน ด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ BN(A) ที่อุณหภูมิ 820 °C ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

- ทำการ activation แหล่งจ่ายสารเจือโบรอนเป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที
- แล้วทำการ stabilize 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที
- จากนั้นทำการ predeposition โดยนำแผ่นผลึกที่ได้เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์เรียบร้อยแล้วเข้าไปพร้อมกับแหล่งจ่ายสารเจือ เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.8 ลิตร/นาที
- หลังจากทำการ predeposition เสร็จแล้ว จึงนำไปลอกชั้น borosilicate glass (BSG) โดย
 - จุ่มแผ่นผลึกลงใน กรดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. กระบวนการขับเคลื่อนส่วน P-base /สร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ใหม่ (P-base drive-in/Re-oxidation)

ทำการขับเคลื่อนสารเจือโบรอน พร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนของกระบวนการดังนี้ คือ

- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออกซิเดชันแบบชื้น เป็นเวลา 20 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 100 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที

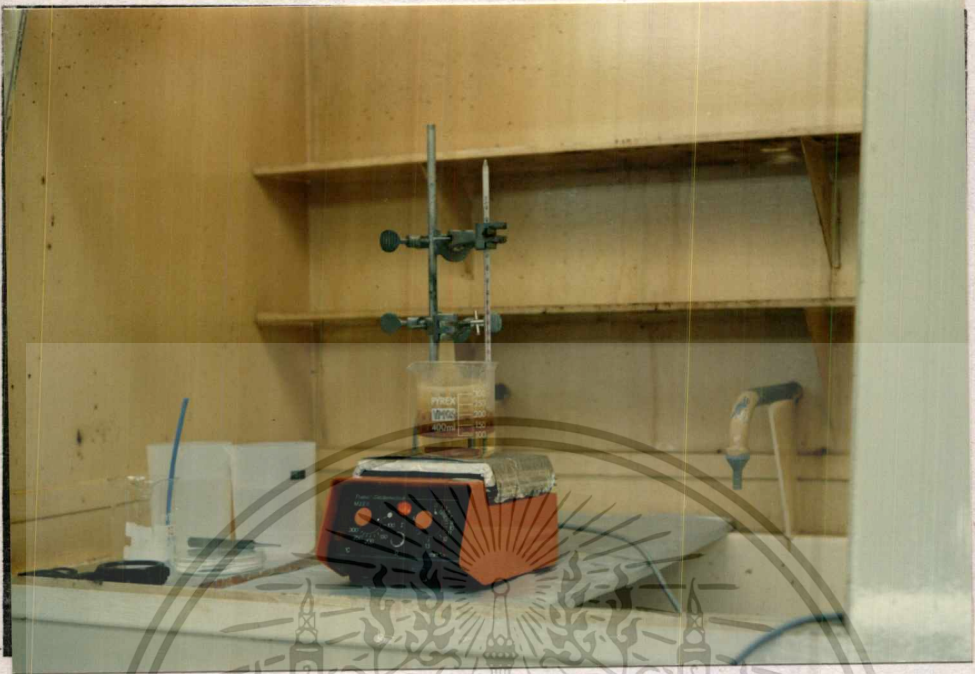
6. กระบวนการแพร่สารเจือส่วน N^+ -source (N^+ -source deposition)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ด้วยแหล่งสารเจือ SiP_2O_7 (PH1000) ที่อุณหภูมิ $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที แล้วทำการลอกชั้น phosphosilicate glass (PSG) โดย

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ ๓4 การแพร่สารเจือ



รูปที่ ๗5 การกัดซิลิกอนเป็นร่องตัววี

7. การกัดร่องตัววี (V-groove etching)

เพื่อสร้างร่องตัววีของส่วนเกตออกไซด์ เฉพาะในวีมอสเท่านั้น จึงนำเอาแผ่นผลึกซิลิกอนที่เปิดช่องซิลิกอน ไดออกไซด์ที่ผิวหน้าแผ่นผลึก แล้วนำไปกัดในสารละลาย PED ซึ่งเป็นส่วนผสมของ ethylenediamine ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$), pyrocatechol ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$) และน้ำบริสุทธิ์ (DI) ด้วยอัตราส่วน $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2 : \text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2 : \text{DI} = 25:2:4$ ที่อุณหภูมิ $95-100^\circ\text{C}$ มีอัตราการกัด 1.55 ไมครอน/นาที [22] ซึ่งการกัดนี้จะกัดแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ด้วยอัตราที่เร็วกว่าระนาบ (111) เป็นผลให้ผนังด้านข้างเกิดเป็นมุมลาดเอียง 54.7° จากแนวระดับ

8. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับส่วนเกต (Dry oxidation for gate oxide)

ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ บริเวณส่วนเกตโดยใช้การออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ 1100°C ใช้เวลา 30 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที ซึ่งในกรณีของดีมอสได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) จะหนาประมาณ 1000\AA สำหรับกรณีของวีมอสส่วนเกตออกไซด์จะเกิดบนร่องตัววีที่กัดลึกลงไปบนแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งจะเป็นระนาบ (111) ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นในระนาบ (111) สร้างได้เร็วกว่าระนาบ (100) ประมาณ 50 % ดังนั้นชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จะหนาประมาณ 1500\AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Aluminium evaporation)

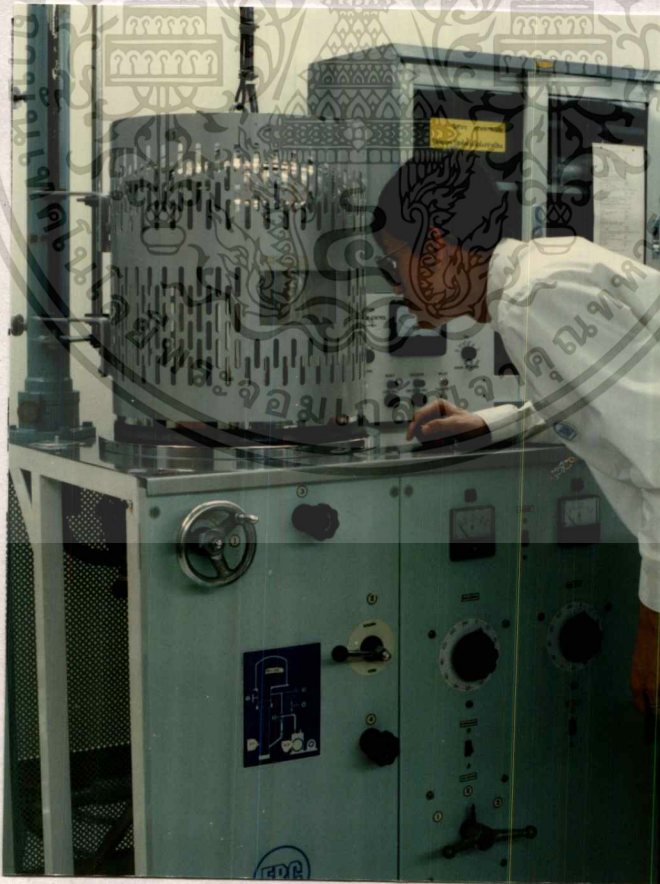
โดยการใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporator ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นของอะลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm

10. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิกอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 °c

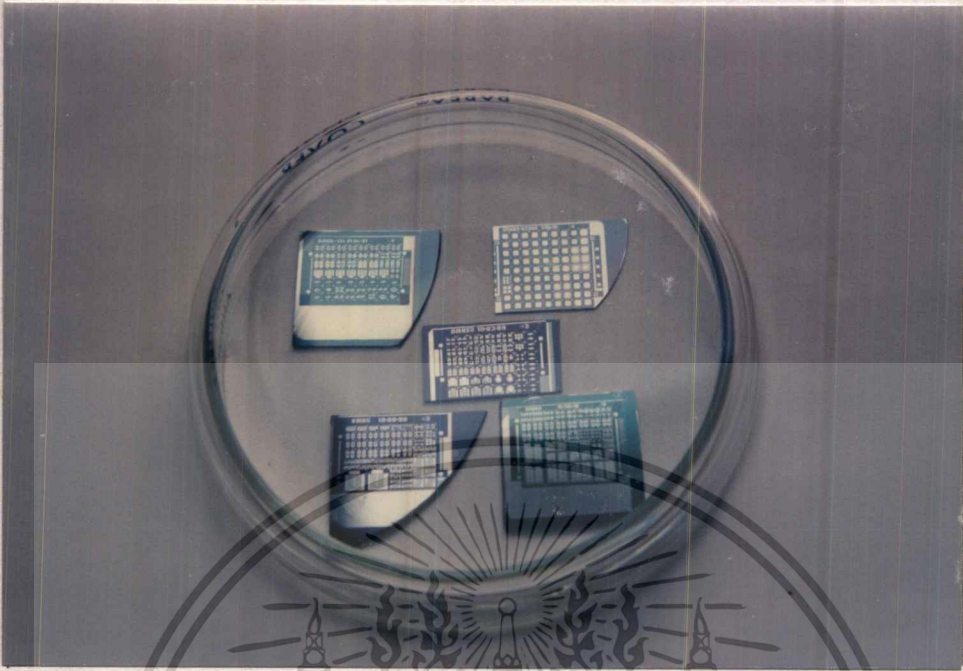
11. การทดสอบอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน (On wafer test)

ก่อนที่จะนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่สร้างเสร็จแล้วไปตัดแบ่งออกเป็นชิป จะมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าก่อน โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Probe station ซึ่งใช้เข็มจิ้มลงไปจุดต่อสาย (bonding pad) ที่ 2 ขั้วคือ ขั้วเกต และขั้วซอส ส่วนฐานรองของแผ่นผลึกซิลิกอนจะเป็นส่วนเดรน แล้วต่อสายโลหะเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) เพื่อดูว่ามีชิปใดทำงานได้ หรือไม่ได้ ส่วนชิปที่เสียก็จะถูกทำเครื่องหมายไว้และจะไม่นำไปเก็บบรรจุ



รูปที่ ข6 การเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Vacuum evaporator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗7 ภาพถ่ายของดามอสที่ไดสร่างเสร็จเรียบร้อยแล้วบนผลึกซิลิกอน



รูปที่ ๗8 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกของอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

1. การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

เมื่อต้องการหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ได้จากกระบวนการสร้าง (ในกรณีของมอสเฟตกำลังจะมีการแพร่สารเจือ 2 ครั้ง นั่นคือ การแพร่สารเจือชนิดพีในส่วน P-base และแพร่สารเจือชนิดเอ็นในส่วน N^+ -source) ซึ่งเราจะต้องทราบค่าความลึกของรอยต่อเสียก่อน จากนั้นจะนำไปหาค่าพิกัดความต้าน (ρ) ได้จากสมการ

$$\rho = \rho_s \cdot x_j \quad \dots\dots\dots(i)$$

เมื่อ ρ_s คือ ความต้านทานแผ่น (sheet resistivity) ซึ่งได้จากการวัดด้วยเครื่อง four point probe ในระหว่างการสร้างมอสเฟตกำลัง (Ω/\square)

x_j คือ ความลึกของรอยต่อ (cm)

หลังจากนั้นจะนำค่าพิกัดความต้านทานที่ได้ ไปหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือได้จากสมการ

$$N = 1/q \mu \rho \quad \dots\dots\dots(ii)$$

เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน (C)

μ คือ ความคล่องตัวของพาหะ ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)

2. การหาความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้วยวิธีการ grooving

สำหรับวิธีการ grooving เป็นวิธีการหาความลึกของรอยต่อ โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า grooving machine เป็นวิธีการใช้วงล้อ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) = 4 cm. ชุดลงไปบนผิวหน้าของแผ่นผลึกประมาณ 75-100 รอบ จะทำให้เกิดหลุมวงรี และเมื่อล้างให้สะอาดแล้วนำไปย้อมสี (strain etching) ในสารละลายของกรดกัดแก้ว (HF) กับกรดไนตริก (HNO_3) (ด้วยอัตราส่วน $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 500:1$) ส่วนที่เป็นชั้นพีเมื่อย้อมสีแล้วจะมีสีเข้มขึ้น ส่วนที่เป็นเอ็นจะมีสีจางกว่า แสดงในรูปที่ ค2 เมื่อวัดระยะ X และ Y ได้แล้ว จึงนำมาคำนวณหาความลึกของรอยต่อได้จากสมการ

$$x_j = XY/D \quad \dots\dots\dots(iii)$$

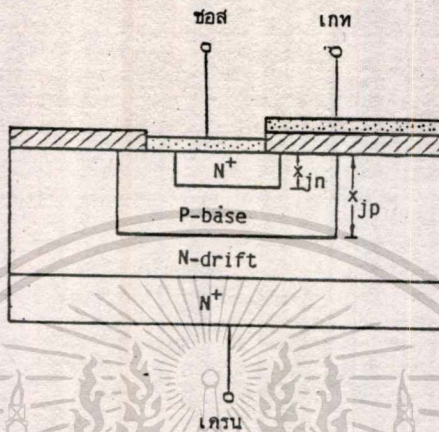
ตัวอย่างการคำนวณหาความลึกของรอยต่อ จากในรูปที่ ค2 จะได้

1. ความลึกของรอยต่อของชั้น P-base

$$X_{jp} = (X_1 \times Y_1) / D = 75 \times 1740 / 4 \times 10^4 = 3.26 \text{ } \mu\text{m}$$

2. ความลึกของรอยต่อของชั้น N⁺-source

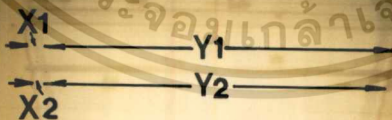
$$X_{jn} = (X_2 \times Y_2) / D = 30 \times 1740 / 4 \times 10^4 = 1.305 \text{ } \mu\text{m}$$



รูปที่ ค1 ลักษณะ โครงสร้างของรอยต่อทั้งสอง เมื่อ

- X_{jp} คือ ความลึกของรอยต่อของชั้น P-base

- X_{jn} คือ ความลึกของรอยต่อของชั้น N⁺-source



รูปที่ ค2 รอยขีดของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ได้จากเครื่อง grooving machine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 10 เมษายน พ.ศ. 2506 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2528 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2531 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับนอกเหนือจากวิทยานิพนธ์ จำนวน 4 เรื่อง ได้แก่ 1. ผลของความกว้างและความยาวเส้นแฉกที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส 2. ผลของระยะห่างระหว่างเซลล์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส 3. การควบคุมและการเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส 4. การออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย ระดับ 4 ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ฯ

