

รายงานการวิจัย

ผลกระทบทางอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส

Effect of Temperature on Parameter of DMOS

คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช
2. นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ
3. นายสัญญา คุณขาว

สถานที่ทำการวิจัย ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทร. 3267980

ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

RCH

TK

7871.99

M44

ศ 2325

ปีงบประมาณ 2536

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 32255

วัน เดือน ปี 11 ส.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

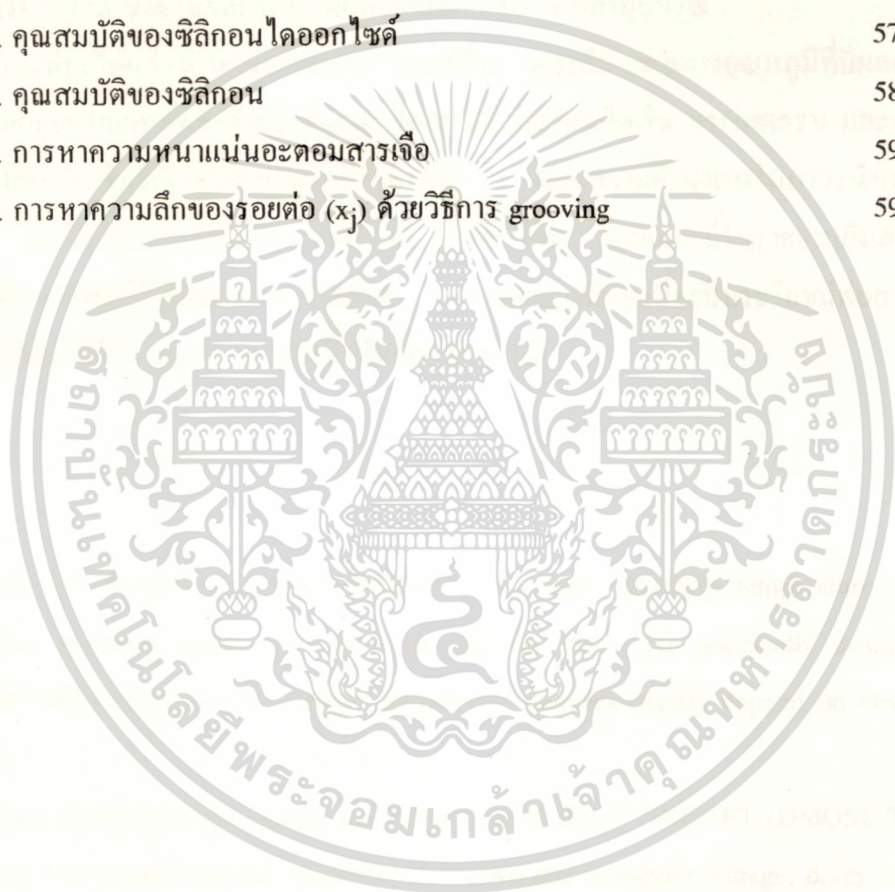
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	I
คำนำ	II
สารบัญตาราง	IV
สารบัญภาพ	V
สัญลักษณ์	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 ประเภทของมอสเฟตกำลัง	2
1.3 การเปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลัง ไซโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และไทรสเตอร์	5
1.4 แนวโน้มของมอสเฟตกำลังในตลาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	5
บทที่ 2 ทฤษฎีมอสเฟตกำลัง	7
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของมอสเฟตกำลัง	7
2.2 แรงดันขีดเริ่ม	9
2.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสของมอสเฟต	12
2.3.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส ในช่วงเชิงเส้น	12
2.3.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส ในช่วงอิ่มตัว	14
2.3.3 การวิเคราะห์กระแสเดรนแบบง่าย ๆ	14
2.4 อินครีเมนต์ลพารามิเตอร์	15
2.4.1 คอนดักแตนซ์	15
2.4.2 ทรานคอนดักแตนซ์	15
2.4.3 ความต้านทานในภาชนะนำกระแส	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและบทวิจารณ์	52
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
5.2 ปัญหาและอุปสรรคของงานวิจัย	53
5.3 ข้อเสนอแนะ	54
กิตติกรรมประกาศ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก ก 1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์	57
2. คุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์	57
3. คุณสมบัติของซิลิกอน	58
ภาคผนวก ข 1. การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ	59
2. การหาความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้วยวิธีการ grooving	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบทางอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส

Effect of Temperature on Parameter of DMOS

บทคัดย่อ

มอสเฟตกำลัง เป็นอุปกรณ์ที่แสดงคุณสมบัติในการทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดี ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิ ได้สูงถึง 200°C ความสามารถของมอสเฟตกำลังที่ทำงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะมีความสำคัญกับการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งจะมีผลกระทบต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์

ในรายงานนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบ การสร้าง และศึกษาผลทางอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส โดยพบว่า แรงดันขีดเริ่ม กระแสเดรน และทรานคอนดักแตนซ์จะมีค่าสัมพันธ์เชิงลบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนความต้านทานในภาว่นำกระแสและกระแสรั่วไหล จะมีค่าสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในรายงานยังเสนอผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองด้วย จากผลการศึกษานี้จะมีประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนา มอสเฟตกำลังให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป

Abstract

One attractive feature of power MOSFET is its high operating temperature capability. Device with peak function temperature rating as high as 200°C are practically available now. Variations in MOSFET characteristics due to temperature changes mainly depend on electron-hole pairs mechanism.

This report investigates the design and fabrication of power MOSFET (DMOS). The effect of temperature to device parameter are studied. It is shown that threshold voltage, drain current and transconductance decrease when temperature increase. Alternatively, on-resistance and leakage current increase when temperature arises. The experimental results are also compared to that obtained using computer simulation. The achievements are fruitfully useful for future development in higher efficiency power MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

คิมอส คือ มอสเฟดกำลังประเภทหนึ่ง ซึ่งอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปในเวลาใช้งานจะนำกระแสสูงมาก จึงทำให้คิมอสมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้งานคิมอสจึงต้องคำนึงถึงผลกระทบ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น เพราะว่าถ้าคิมอสมีอุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้คิมอสเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น เราจะพบว่าเมื่อนำคิมอสไปใช้งาน จะมีการออกแบบระบบระบายความร้อนให้แก่คิมอสด้วย เช่น ใช้แผ่นระบายความร้อนขนาดใหญ่ที่ทำจากโลหะ หรือ ใช้พัดลมระบายความร้อน เป็นต้น

ในกรณีที่คิมอสทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคิมอสหลายตัวมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นในรายงานการวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาถึงผลกระทบของคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหล่านี้ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจากอุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึง 150°C ดังจะได้กล่าวถึงลำดับความสำคัญของเนื้อหาไว้ ดังนี้ คือ

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาตั้งแต่เริ่มพบอุปกรณ์ประเภทมอสเฟด แล้วพัฒนาไปเป็นมอสเฟดกำลัง จากนั้นได้กล่าวถึงประเภทมอสเฟดกำลัง รวมถึงสิ่งที่ทำให้มอสเฟดกำลังเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจศึกษา โคนการเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างมอสเฟดกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และไทรสเตอร์ ในตอนท้ายของบทได้กล่าวถึงแนวโน้มการประยุกต์ใช้งานของมอสเฟดกำลังในตลาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีมอสเฟดกำลังทั่วไป สำหรับเนื้อหาประกอบด้วย โครงสร้างและหลักการ ทำงาน แรงดันขีดเริ่ม คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส และเรื่องสุดท้ายที่กล่าว คือ อินครีเมนต์ลพารามิเตอร์

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างคิมอส โดยมีเนื้อหาประกอบด้วย การออกแบบลวดลายระดับหน้าฉาก การสร้างกระจกต้นแบบ และกระบวนการสร้างคิมอสด้วยเทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน รวมถึงการเก็บบรรจุคิมอสที่สร้างเสร็จแล้ว ลงในตู้ถัง TO-3 และพร้อมที่จะทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง โดยได้ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ดังนี้ คือ การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐาน การวัดผลกระทบทางอุณหภูมิของแรงดันขีดเริ่ม กระแสเดรนทรานคอนดักแตนซ์ ความต้านทานในภาวะนำกระแส และกระแสรั่วไหล

บทที่ 5 เป็นบทสรุป วิเคราะห์ผลการทดลอง ข้อเสนอแนะและปัญหาอุปสรรคที่เกิดขึ้น เพื่อจะได้นำข้อมูลเหล่านี้ไว้เป็นแนวทางในการวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของรายงานวิจัยนี้ ทำให้ผู้สนใจที่จะนำดีมอสไปใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น เนื่องจากความร้อน และควรหลีกเลี่ยงการใช้งานที่อุณหภูมิเกินขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ในหนังสือข้อมูลของดีมอส โดยใช้อุปกรณ์ระบายความร้อนช่วยจะทำให้ดีมอสมีอุณหภูมิการทำงานที่ต่ำลงมาก แต่ถ้าดีมอสทำงานที่อุณหภูมิสูงพอสมควร นักออกแบบควรจะคำนึงถึงผลกระทบนี้กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ กำลังและไทรสเตอร์	5
ตารางที่ 3.1 การกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟตกำลังที่จะสร้างขึ้น	18
ตารางที่ 3.2 สรุปลำดับขั้นตอนทั้งหมดที่ใช้สร้างมอสเฟตกำลัง	21
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของคิมอส	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การแบ่งชนิดของมอสเฟตกำลังตามลักษณะของการทำงาน	4
รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้าง กราฟคุณสมบัติกระแสแรงดันและสัญญาณลักษณะของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสและแบบวีมอส	4
รูปที่ 1.3 การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง	6
รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานเมนต์โหมด	8
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบโครงสร้างและการทำงานของ (ก) มอสเฟตกำลังแบบดีมอส 1 ยูนิทเซลล์ (ข) มอสเฟต	9
รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างของมอสคาปาซิเตอร์ (ข) โครงสร้างของแถบพลังงานที่เฟลตแบนด์ (ค) การกระจายของประจุไฟฟ้าและโครงสร้างของแถบพลังงานที่ สตรองอินเวอร์ชัน	10
รูปที่ 2.4 การทำงานในช่วงต่าง ๆ ของกราฟคุณสมบัติกระแสเดรนและแรงดัน เดรน-ซอสสำหรับมอสเฟตชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานเมนต์โหมด	12
รูปที่ 3.1 การออกแบบลวดลายต้นแบบบนกระดาษกราฟ	19
รูปที่ 3.2 การตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่นโฟลตีเอสเตอร์ด้วยเครื่องไมโครคัทเตอร์	20
รูปที่ 3.3 แผ่นโฟลตีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดเสร็จแล้ว และชุดกระจกต้นแบบที่ถ่ายย่อ ลง 50 เท่า จากต้นแบบ	20
รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางแผ่นผลึกเริ่มต้นที่ใช้สร้างดีมอส	23
รูปที่ 3.5 การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอน	24
รูปที่ 3.6 (ก) การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (ข) ภาพตัดขวางแผ่นผลึกซิลิกอนหลังจากสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์แล้ว	26
รูปที่ 3.7 โพลีซาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	27
รูปที่ 3.8 (ก) การถ่ายภาพจากกระจกต้นแบบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน (ข) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 1 (ค) ภาพตัดขวางชิ้นงาน จากรูป (ข)	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่แพร่สารเจือโบรอนและ ขั้วลึกรอยต่อส่วน P-base (ข) ภาพตัดขวางชิ้นงาน จากรูป (ก)	31
รูปที่ 3.10 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2 (ข) ภาพตัดขวางชิ้นงาน จากรูป (ก)	32
รูปที่ 3.11 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่แพร่สารเจือฟอสฟอรัสและ ขั้วลึกรอยต่อส่วน N ⁺ -source (ข) ภาพตัดขวางชิ้นงาน จากรูป (ก)	32
รูปที่ 3.12 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 (ข) ภาพตัดขวางชิ้นงาน จากรูป (ก)	33
รูปที่ 3.13 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่สร้างเกตออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม (ข) ภาพตัดขวางชิ้นงาน จากรูป (ก)	33
รูปที่ 3.14 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4 (ข) ภาพตัดขวางชิ้นงาน จากรูป (ก)	34
รูปที่ 3.15 การเคลื่อนอะตอมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Vacuum evaporator	35
รูปที่ 3.16 (ก) ภาพถ่ายคิมอสที่ได้สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วบนแผ่นผลึกซิลิกอน (ข) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว (ค) ภาพตัดขวางชิ้นงาน จากรูป (ข)	36
รูปที่ 3.17 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกของอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน	37
รูปที่ 3.18 ตัวถังกระป๋องโลหะที่ใช้เก็บบรรจุชิพของมอสเฟตกำลัง (ก) ตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 (ข) ตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3	39
รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายของชิพและชิพที่ติดบนตัวถังเรียบร้อยแล้ว	40
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านบนของคิมอสที่ใช้ทดลองขนาด 4 ตารางมิลลิเมตร และมีขนาดของ L = 10 ไมครอน และ W = 36,620 ไมครอน	41
รูปที่ 4.2 วงจรวัดความสัมพันธ์ระหว่าง I _{DS} กับ V _{GS} เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} และหาค่าแรงดันขีดเริ่มของดีมอสเท่ากับ 2.7 โวลต์	42
รูปที่ 4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส	43
รูปที่ 4.5	การหาแรงดันขีดเริ่มจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} ในช่วงอุณหภูมิ 25- 150 °C	45
รูปที่ 4.6	แรงดันขีดเริ่มที่ขึ้นกับผลของอุณหภูมิจากการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณ	46
รูปที่ 4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับอุณหภูมิ วัดที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 15$ โวลต์	47
รูปที่ 4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนกับอุณหภูมิ วัดที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 15$ โวลต์	48
รูปที่ 4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างทรานคอนดักแตนซ์กับอุณหภูมิ วัดที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 15$ โวลต์	49
รูปที่ 4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในภavnนำกระแสกับอุณหภูมิ วัดที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 1$ โวลต์	50
รูปที่ 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับอุณหภูมิ วัดที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 50$ โวลต์	51
รูปที่ ข1	ลักษณะโครงสร้างของรอยต่อทั้งสอง เมื่อ - x_{jp} คือ ความลึกของรอยต่อของชั้น P-base - x_{jn} คือ ความลึกของรอยต่อของชั้น N^+ -source	60
รูปที่ ข2	รอยขีดของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ได้จากเครื่อง grooving machine	60

สัญลักษณ์ (List of Symbol)

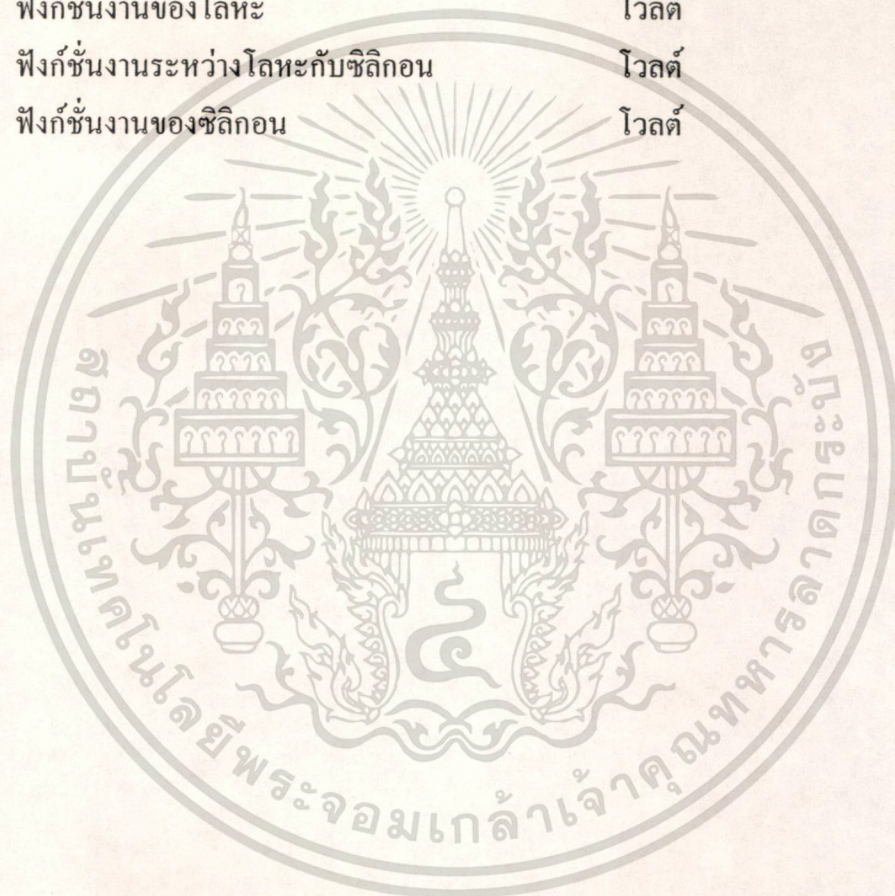
สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
C_{ox}	ความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์	ฟารัด
D	สัมประสิทธิ์การแพร่	เซนติเมตร ² /วินาที
E	สนามไฟฟ้า	โวลต์/เซนติเมตร
E_C	พลังงานแถบความนำ	อิเล็กตรอน โวลต์
E_F	พลังงานระดับเฟอร์มิ	อิเล็กตรอน โวลต์
E_G	พลังงานแถบต้องห้าม	อิเล็กตรอน โวลต์
E_i	พลังงานระดับอินทรินซิก	อิเล็กตรอน โวลต์
E_V	พลังงานแถบวาเลนซ์	อิเล็กตรอน โวลต์
g_{ds}	คอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้น	มิลลิโมห์
g_m	ทรานคอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้น	มิลลิโมห์
g_{msat}	ทรานคอนดักแตนซ์ ในช่วงอิ่มตัว	มิลลิโมห์
I_{DS}	กระแสเดรน	แอมป์
I_{DSS}	กระแสรั่วไหลเดรน-ซอส	มิลลิแอมป์
I_{DSSat}	กระแสเดรน ในช่วงอิ่มตัว	แอมป์
I_{GSS}	กระแสรั่วไหลเกต-ซอส	ไมโครแอมป์
k	ค่าคงที่โบสมันต์	จูล/เคลวิน
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส	ไมครอน
L_{eff}	ความยาวของช่องทางเดินกระแสที่แท้จริง	ไมครอน
N_A	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ	เซนติเมตร ⁻³
n_i	ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	เซนติเมตร ⁻³
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	คูลอมบ์
Q_B, Q'_B	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะที่ผิว ขณะได้รับแรงดันถึงจุดที่ทำให้เกิดชั้นกลับพอดิ	คูลอมบ์/เซนติเมตร ²
Q_G	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เกต	คูลอมบ์/เซนติเมตร ²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Q_n	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าของชั้นกลับที่บริเวณช่องทางเดินกระแส	คูลอมบ์/เซนติเมตร ²
Q_{ss}	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO ₂ กับ Si	คูลอมบ์/เซนติเมตร ²
R_{on}	ความต้านทานในภาวนำกระแส	โอห์ม
T	อุณหภูมิสมบูรณ์	เคลวิน
t_{ox}	ความหนาของเกตออกไซด์	อังสตรอม
t	เวลา	วินาที
V	ศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไบอัส	โวลต์
V_{BG}	แรงดันย้อนกลับที่ฐานรอง	โวลต์
V_{BV}	แรงดันพังทลาย	โวลต์
V_{DD}	แรงดันไบอัสภายนอก	โวลต์
V_{DS}	แรงดันเดรน-ซอส	โวลต์
V_{DSsat}	แรงดันเดรน-ซอส ในช่วงอิ่มตัว	โวลต์
V_{FB}	แรงดันแฟลตแบนด์	โวลต์
V_{GS}	แรงดันเกต-ซอส	โวลต์
V_T	แรงดันขีดเริ่ม	โวลต์
W	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	ไมครอน
x_{dmax}	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่กว้างที่สุด	ไมครอน
x_i	ความลึกของชั้นกลับในส่วนช่องทางเดินกระแส	ไมครอน
x_j	ความลึกของรอยต่อ	ไมครอน
x_{jn}	ความลึกของรอยต่อส่วน N ⁺ -source	ไมครอน
x_{jp}	ความลึกของรอยต่อส่วน P-base	ไมครอน
ϵ_o	ค่าเพอร์มิตติวิตีของสูญญากาศ	ฟารัด/เซนติเมตร
ϵ_{ox}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์	-
ϵ_s	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	-
ρ	พิกัดความต้านทาน	โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ρ_s	ความต้านทานแผ่น	โอห์ม/□
μ	ความคล่องตัวของพาหะ	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
μ_n	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
$\mu_n(\text{eff})$	ความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอน	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
μ_p	ความคล่องตัวของโฮล	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
ϕ_F	ศักย์ไฟฟ้าเฟอร์มิ	โวลต์
ϕ_m	ฟังก์ชันงานของโลหะ	โวลต์
ϕ_{MS}	ฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับซิลิกอน	โวลต์
ϕ_s	ฟังก์ชันงานของซิลิกอน	โวลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET : Power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) เป็นอุปกรณ์กำลังประเภทหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจมากขึ้น ไม่เฉพาะเพียงแต่ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น แต่ทางด้านเชิงพาณิชย์ก็ได้มีการพัฒนากันอย่างกว้างขวาง และก้าวหน้าไปมาก สำหรับในห้องปฏิบัติการได้มีการวิจัยมอสเฟตกำลังที่สามารถทนกำลังสูงถึง 7.5 กิโลวัตต์[1] และมีการตอบสนองความถี่สูงถึง 1.4 จิกะเฮิรท์[2] ซึ่งเหมาะสำหรับใช้งานทางด้าน การสื่อสาร นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาโครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบใหม่ที่มีโครงสร้างผสมผสานระหว่างมอสเฟตกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าด้วยกัน เรียกว่า ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน (IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor) ทำให้อุปกรณ์กำลังชนิดนี้มีการทนกำลังได้สูงขึ้นอีก ส่วนทางด้านเชิงพาณิชย์ได้มีการปรับปรุงการออกแบบโครงสร้าง หลากหลายรูปแบบ และกระบวนการผลิตให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อให้มอสเฟตกำลังมีประสิทธิภาพ สูงสุด และมีราคาลดลงทำให้เข้าไปแข่งขันกับอุปกรณ์กำลังประเภทอื่น ๆ ได้

1.1 ความเป็นมา[3],[4]

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

มอสเฟตมีหลักการทํางาน ซึ่งควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าเป็นหัวใจสำคัญได้นำเสนอแนวความคิดขึ้นเป็นครั้งแรกในต้นปี ค.ศ. 1930 โดย Lilienfeld และ Heil จากมหาวิทยาลัย Leipzig จากนั้น Shockley และ Parson ได้เริ่มต้นทำการศึกษาดูมา โดยทำการสร้างเฟต (FET) ซึ่งใช้การระเหยของชั้นเยอรมันเนียมบนไดอิเล็กตริก ในปี ค.ศ. 1948 ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 Kahng และ Atalla ได้ทำการสร้างมอสเฟตขึ้นเป็นครั้งแรก โดยใช้เทคโนโลยีของซิลิกอน ซึ่งถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูง ส่วนคุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ได้ทำศึกษาในเวลาต่อมาโดย Ihantola, Moll, Sah, Hofstein และ Heiman

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

และ Tszner ได้ทำการวิจัยเรื่องมัลติเพดกับกริดสเตอร์ 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 เนื่องจากมอสเฟตสามารถสร้างได้ทั้งดีพลีชันโหนดและเอ็นฮานเมนต์โหนดในขณะที่เฟตสร้างเป็นดีพลีชันโหนดได้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่สำหรับการประยุกต์ใช้งานโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว จะใช้เอ็นฮานเมนต์โหนดเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นมอสเฟตจึงเป็นโครงสร้างที่ได้เปรียบกว่าเฟตที่จะพัฒนาเป็นอุปกรณ์กำลังต่อไป

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

1.2 ประเภทของมอสเฟตกำลัง

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต และมอสเฟตกำลัง เป็นการไหลของประจุพาหะส่วนมากเพียงอย่างเดียว (ดังเช่น การไหลของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนมากในมอสเฟตกำลังชนิดเอ็นแชนแนล) การแบ่งประเภทของมอสเฟตกำลังจึงสามารถแบ่งได้หลาย ๆ แบบ และการแบ่งตามลักษณะการทำงานก็เป็นการแบ่งประเภทหนึ่งที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งแบ่งเป็น เอ็น-แชนแนล และพี-แชนแนล แล้วยังแบ่งย่อยออกเป็นดีพลีชันโหนด และเอ็นฮานเมนต์โหนด ได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. มอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานเมนต์โหนด (N-channel enhancement mode power MOSFET) คือ มอสเฟตกำลังที่มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสครีพ ดังนั้นมอสเฟตกำลังชนิดนี้จึงมีส่วนเดรน และส่วนซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสแรงดันที่เกต สารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสจะเป็นชนิดพี ดังนั้นในขณะที่ใช้งานจึงต้องเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำให้สารกึ่งตัวนำชนิดพีที่บริเวณช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อน โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกตเป็นบวก เมื่อเทียบกับส่วน P-base

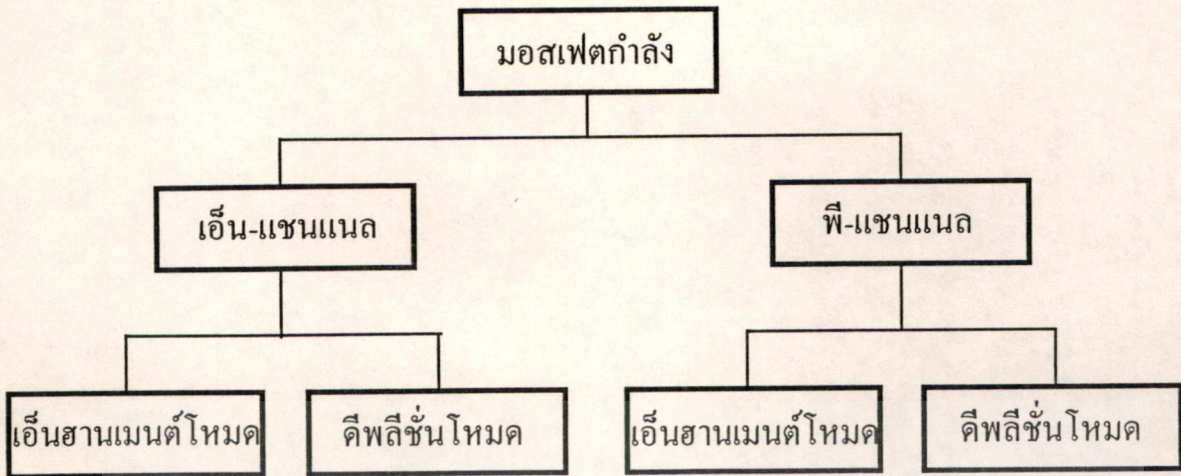
2. มอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล ดีพลีชันโหมด (N-channel depletion mode power MOSFET) คือ มอสเฟตกำลังที่มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสครีฟต์ ดังนั้นมอสเฟตกำลังชนิดนี้จึงมีส่วนแคโรน และส่วนซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสแรงดันที่เกต สารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสจะเป็นชนิดเอ็น ทำให้เกิดการเชื่อมต่อเนื้อสารกึ่งตัวนำระหว่างส่วนซอสกับส่วนแคโรน อันเป็นผลให้เกิดกระแสครีฟต์ขึ้นทันทีที่ให้แรงดันไบอัสแก่แคโรน-ซอส ในการควบคุมปริมาณกระแสครีฟต์นี้ สามารถทำได้ทั้งในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสครีฟต์เพิ่มขึ้น โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับ P-base และในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสครีฟต์ลดลง โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกตเป็นลบเมื่อเทียบกับ P-base

3. มอสเฟตกำลังชนิดพี-แชนแนล เอ็นฮานซ์โหมด (P-channel enhancement mode power MOSFET) คือ มอสเฟตกำลังที่มีโฮลเป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสครีฟต์ ดังนั้นมอสเฟตกำลังชนิดนี้จึงมีส่วนแคโรนและส่วนซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสแรงดันที่เกต สารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสจะเป็นชนิดเอ็น ดังนั้นในขณะที่ใช้งานจึงต้องเหนี่ยวนำให้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่บริเวณช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อน โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกตเป็นลบ เมื่อเทียบกับส่วน P-base

4. มอสเฟตกำลังชนิดพี-แชนแนล ดีพลีชันโหมด (P-channel depletion mode power MOSFET) คือ มอสเฟตกำลังที่มีโฮลเป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสครีฟต์ ดังนั้นมอสเฟตกำลังชนิดนี้จึงมีส่วนแคโรน และส่วนซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสแรงดันที่เกต สารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสจะเป็นชนิดพี ทำให้เกิดการเชื่อมต่อเนื้อสารกึ่งตัวนำระหว่างส่วนซอสกับส่วนแคโรน อันเป็นผลให้เกิดกระแสครีฟต์ขึ้นทันทีที่ให้แรงดันไบอัสแก่แคโรน-ซอส ในการควบคุมปริมาณกระแสครีฟต์นี้ สามารถทำได้ทั้งในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสครีฟต์เพิ่มขึ้น โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกตเป็นลบเมื่อเทียบกับ P-base และในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสครีฟต์ลดลง โดยการให้ไบอัสแรงดันที่เกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับ P-base

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ จะศึกษามอสเฟตกำลังแบบดีมอส เฉพาะชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์โหมดเท่านั้น เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้มีความเร็วสูงกว่า และใช้งานได้ง่ายกว่า เพราะที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าบวก ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานทั่ว ๆ ไป และยังต่อร่วมกับอุปกรณ์ชนิดอื่นได้ง่ายด้วย สำหรับโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลังทั้ง 4 แบบของดีมอสและวีมอสที่แสดงในรูปที่ 1.2 จะเห็นว่าสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลังที่ใช้จะเหมือนกับมอสเฟตธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การเปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และไตรสเตอร์

เพื่อให้เห็นว่ามอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังที่น่าสนใจมาก ดังนั้นจึงได้เปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอสเฟตกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังและไตรสเตอร์ ซึ่งแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของมอสเฟตกำลัง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และ ไตรสเตอร์

พารามิเตอร์	มอสเฟตกำลัง	ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง	ไตรสเตอร์
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 แต่ถ้าเทคโนโลยีของมอสเฟตกำลังพัฒนาดีขึ้น ซึ่งจะทำให้ราคาของมอสเฟตกำลังลดต่ำลงได้ มอสเฟตกำลังก็จะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานมากขึ้น

1.4 แนวโน้มของมอสเฟตกำลังในตลาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง[5],[6]

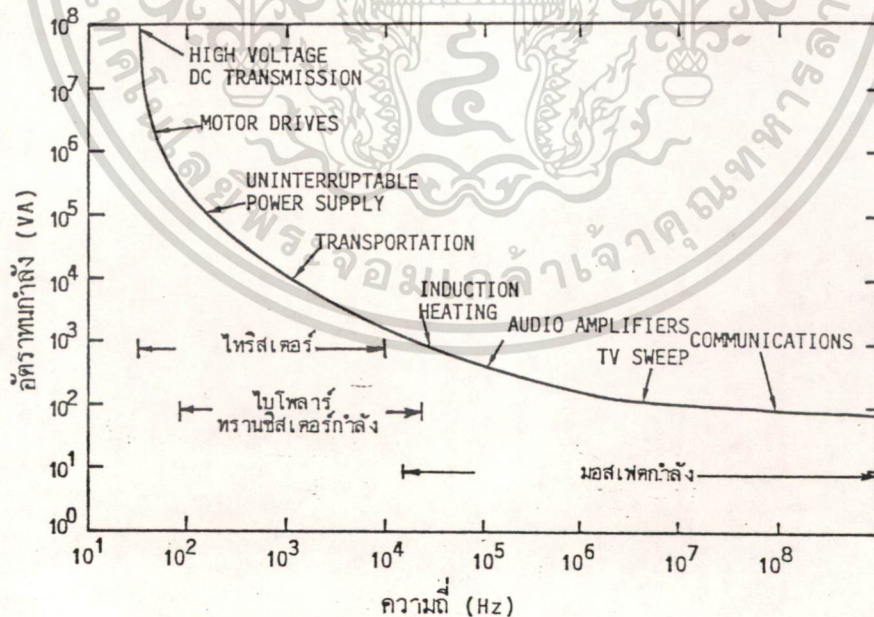
มอสเฟตกำลังได้มีการผลิตออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ในระหว่าง 10 ปี ที่ผ่านมามีการยอมรับมอสเฟตกำลังกันมากขึ้น อย่างไรก็ตาม, การเข้าไปแทนที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังด้วยมอสเฟตกำลังยังคงเป็นไปได้น้อย เนื่องจากราคาของอุปกรณ์ที่ยังแพงที่อัตราทนกำลังเดียวกัน แต่เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีของมอสเฟตกำลังได้พัฒนาให้ดีขึ้น ความแตกต่างในเรื่องของราคาจะน้อยลงทำให้มอสเฟตกำลังเป็นที่น่าสนใจมากขึ้น และในปี ค.ศ.1985พบว่ามอสเฟตกำลังมีตลาดเพียง 10 % ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

ในปี ค.ศ. 1980 ได้มีการค้นพบอุปกรณ์ชนิดใหม่ขึ้น การทำงานของอุปกรณ์นี้มีพื้นฐานมาจากการรวมตัวของโครงสร้างมอสเฟต และการนำกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ อุปกรณ์นี้เรียกกันว่าทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน (IGBT) หรือ Insulated Gate Bipolar Transistor ซึ่งมีคุณสมบัติที่เด่นคือ มีความต้านทานด้านอินพุตสูง และมีความสามารถในการทนกำลังสูง อุปกรณ์นี้ได้นำไปสร้างเป็นวงจรรวมของระบบกำลัง ทำให้ราคาตกลงประมาณ 10 เท่าของระบบเดิม ซึ่งเป็นที่คาดหมายกันว่าจะมีการเติบโตอย่างรวดเร็วในตลาดอุปกรณ์กำลัง

การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์กำลังจะถูกพิจารณาในเรื่องของการทนกำลังและความถี่เป็นสิ่งสำคัญ การประยุกต์ใช้งานที่แสดงในรูปที่ 1.3 เป็นการแสดงถึงการใช้งานของอุปกรณ์กำลัง ดังเช่น ถ้าต้องการใช้อุปกรณ์กำลังในระบบกระแสตรงแรงดันสูง (HVDC) ซึ่งต้องการกำลังสูงมากๆ และความถี่ต่ำกว่า 10 kHz ก็จะใช้ทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุด ในกรณีของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังจะใช้ในช่วงความถี่ถึง 50 kHz และทนกำลัง 500 kVA ส่วนมอสเฟตกำลังจะใช้งานในย่านความถี่ที่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป แต่การทนกำลังที่ได้จะต่ำกว่า



รูปที่ 1.3 การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

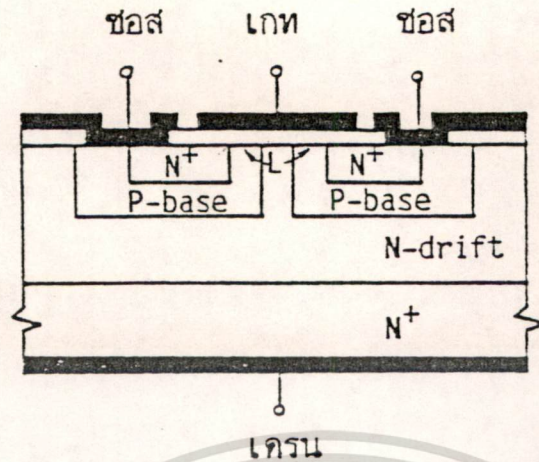
ทฤษฎีมอสเฟตกำลัง

โครงสร้างของมอสเฟตกำลังมีส่วนประกอบ 4 ชั้น (ในกรณีของเอ็น-เซนแนลจะประกอบด้วยชั้น N^+ -source ชั้น P-base ชั้น N-drift และชั้น N^+ -drain) และ 3 ขั้ว (ขั้วเกต ขั้วเดรนและขั้วซอส) จากส่วนประกอบนี้ทำให้มอสเฟตกำลัง มีความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น ๆ เนื่องจากเทคนิคการแพร่สารเจือ 2 ครั้ง ทำให้ได้โครงสร้างทางเรขาคณิตผสมระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กับมอสเฟตทั่วไป (conventional MOSFET) ซึ่งจะเรียกสั้น ๆ ว่า มอสเฟต และจากโครงสร้างนี้ทำให้มอสเฟตกำลังนำกระแสเดรนได้มากกว่าโครงสร้างมอสเฟต อย่างไรก็ตามการทำงานของมอสเฟตกำลังยังคงเหมือนกับมอสเฟต ดังนั้นทฤษฎีที่ใช้กับมอสเฟต จึงสามารถใช้อธิบายกับมอสเฟตกำลังได้

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของมอสเฟตกำลัง

หลักการทำงานของมอสเฟตกำลังอาศัยลักษณะการสร้างชั้นนำ (conduction layer) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ โดยการสะสมของประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเกิดขึ้นจากการให้แรงดันไบอัสที่แผ่นโลหะที่มีชั้นฉนวนอยู่ระหว่างกลาง มอสเฟตสร้างขึ้นครั้งแรกกับซิลิกอน และสร้างซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวนด้วยกระบวนการทางความร้อน ดังนั้นมอสเฟตจึงอาจเรียกอีกชื่อหนึ่ง คือ อิกเฟต (IGFET: Insulated Gate Field Effect Transistor) และได้นำไปใช้ในการสร้างวงจรรวม ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนการพัฒนาของมอสเฟตตัวเดียว ๆ เพื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ประเภทกำลังในช่วงต้น ๆ ได้พัฒนาขึ้นมาด้วยหลักการเดียวกันที่เรียกว่า โครงสร้างทางด้านข้าง (lateral structure) อุปกรณ์ที่ได้จะมีส่วนเดรน เกต และซอส อยู่บนด้านเดียวกันของแผ่นผลึกซิลิกอน ถึงแม้ว่าโครงสร้างนี้จะเหมาะสมกับการสร้างวงจรรวม แต่ไม่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นอุปกรณ์ที่ให้กำลังสูง เนื่องจากจะทำให้อุปกรณ์มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างต่อมาเป็นโครงสร้างในแนวตั้ง (vertical structure) ซึ่งอุปกรณ์ที่ได้จะมีส่วนเดรนอยู่ที่ด้านใต้ของแผ่นผลึก ทำให้เหมาะสมที่จะเป็นอุปกรณ์กำลังมากกว่า เพราะสามารถออกแบบให้ส่วนซอสมีพื้นที่มากขึ้น

ในรูปที่ 2.1 เป็นโครงสร้างของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส ซึ่งจะเรียกสั้น ๆ ว่า ดีมอส สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือในแนวระนาบ ดีมอสจะมีการแพร่สารเจือ 2 ครั้งเหมือนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เป็นส่วน P-base และส่วน N^+ -source ซึ่งจะแพร่สารเจือลงบนช่องที่ได้ออกแบบไว้ ส่วน P-base จะทำการขั้วลึกลงกว่าส่วน N^+ -source และผลต่างระหว่างส่วน P-base กับส่วน N^+ -source ทางด้านข้างจะถูกกำหนดให้เป็นส่วนของช่องทางเดินกระแสที่ผิว



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวาง โครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตกำลังชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นซานเมนต์โหมด

รอยต่อพี-เอ็นระหว่างส่วน P-base กับ N-drift เป็นส่วนที่กำหนดความสามารถในการทนแรงดัน ถ้าให้ขั้วเกตลัดวงจรเข้ากับขั้วซอส ศิวของส่วน P-base จะไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุ และป้อนแรงดันบวกไบอัสแก่เครน-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

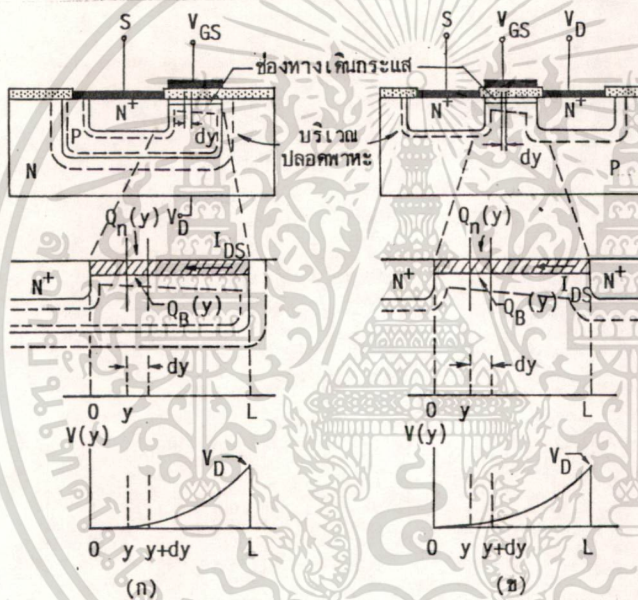
กระแสไฟฟ้าจะไหลจากเครนไปยังซอสในมอสเฟตกำลังได้ เมื่อมีการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสเกิดขึ้นระหว่างส่วน N^+ -source และส่วน N-drift ซึ่งเกิดจากการให้ไบอัสแรงดันบวกที่ขั้วเกต แล้วทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนขึ้นมาที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ สนามไฟฟ้านี้จะมีค่าเพียงพอ (สำหรับเกตออกไซด์ที่หนา 1000 อังสตรอม และแรงดันที่เกต 10 โวลต์. สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าประมาณ 10^6 โวลต์/เซนติเมตร) ที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่บริเวณผิวของส่วน P-base เรียงตัวกันเป็นช่องทางเดินกระแสระหว่างส่วน N^+ -source และ N-drift เมื่อให้แรงดันไบอัสที่ขั้วเครนเป็นบวกจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างเครนกับซอส ซึ่งผ่านส่วน N-drift และช่องทางเดินกระแส จะสังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนี้เกิดจากพาหะส่วนมากเท่านั้น (ในกรณีของเอ็น-แชนแนลพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน) จะไม่มีพาหะส่วนน้อยไหลในระหว่างที่มอสเฟตกำลังอยู่ในช่วงการนำกระแส (on state)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.2 แรงดันขีดเริ่ม

เนื่องจากมอสเฟตกำลังมีหลักการการทำงานที่เหมือนกับมอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นมอสเฟตกำลังจึงสามารถใช้สมการของมอสเฟตทั้งหมดอธิบายได้



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบ โครงสร้าง และการทำงานของ

(ก) มอสเฟตกำลังแบบคีมอส 1 ยูนิตเซลล์ (ข) มอสเฟต

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

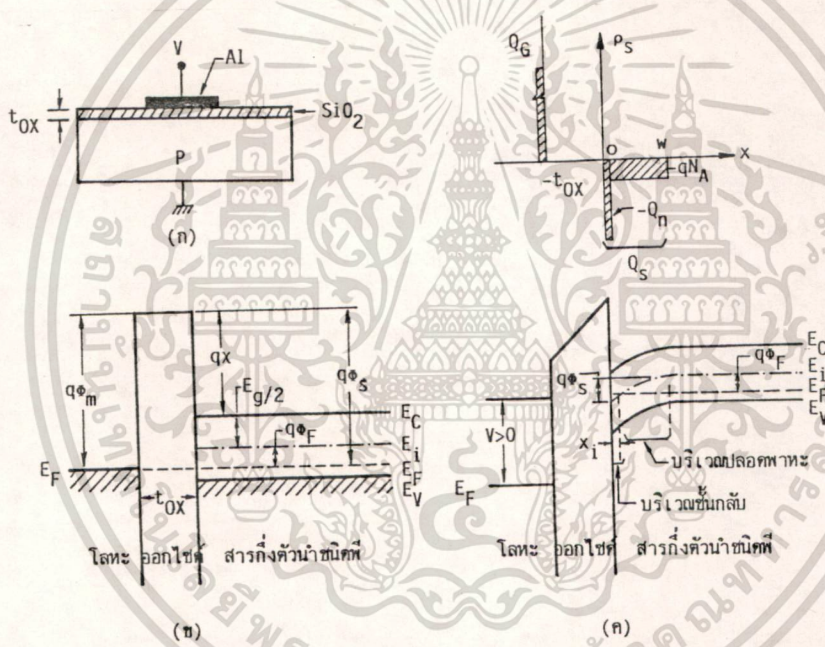
สำหรับมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสนขนาดใหญ่ (large channel MOSFET) และให้แรงดันไบอัสเดรน-ซอสค่าน้อย ๆ เพื่อให้ช่องทางเดินกระแสสม่ำเสมอตลอดทั้งช่วงจากส่วนซอสไปยังเดรน เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนของเกตออกไซด์ของมอสเฟตจะเหมือนกับการพิจารณาจากมอสคาปาซิเตอร์ (MOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

capacitor) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) และจากหลักการคงตัวของประจุ (Conservation of charge) จะได้ว่า [7]

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

- เมื่อ Q_G คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เกต (คูลอมบ์/(เซนติเมตร)²)
- Q_{SS} คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO₂ กับ Si (คูลอมบ์/(เซนติเมตร)²)
- Q_n คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าของชั้นกลับ (inversion layer) ที่บริเวณช่องทางเดินกระแส (คูลอมบ์/(เซนติเมตร)²)
- Q_B คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณปอดพาหะที่ผิวขณะได้รับแรงดันถึงจุดที่ทำให้เกิดชั้นกลับพอดี (คูลอมบ์/(เซนติเมตร)²)



รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างของมอสคาปาซิเตอร์ (ข) โครงสร้างของแถบพลังงานที่เฟลตแบนด์ (ค) การกระจายของประจุไฟฟ้า และโครงสร้างของแถบพลังงานที่สตรองอินเวอร์ชัน

รูปที่ 2.3 (ข) เป็นโครงสร้างของแถบพลังงานทางอุดมคติ เมื่อไม่มีการให้แรงดันไบอัสที่เกต จะไม่มีการโค้งงอของแถบพลังงาน ซึ่งเรียกเงื่อนไขนี้ว่า เฟลตแบนด์ (flat band) แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ปรากฏว่าแถบพลังงานที่ได้จะมีการโค้งงอเกิดขึ้น เนื่องจากฟังก์ชันงาน (work function) ระหว่างโลหะ กับซิลิกอน (Φ_{MS}) และความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอน (Q_{SS}) ดังนั้นจะต้องให้แรงดันไบอัสแก่เกตเพื่อปรับเข้าสู่เฟลตแบนด์ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แฟลตแบนด์ (V_{FB}) มีค่าเป็น

$$V_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} \quad \text{..... (2.2)}$$

เมื่อ C_{OX} คือ ความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์ (ฟารัด/(เซนติเมตร)²) = $\epsilon_0 \epsilon_{OX} / t_{OX}$

ในรูปที่ 2.3 (ก) เป็นโครงสร้างของแถบพลังงานที่แรงดันขั้วเริ่มซึ่งเกิดขึ้นที่เงื่อนไขของสตรองอินเวอร์ชัน (Strong inversion) สมการของแรงดันขั้วเริ่มที่ได้จะเป็น

$$V_T = V_{FB} + 2\Phi_F + \frac{Q_B}{C_{OX}} \quad \text{..... (2.3)}$$

เมื่อ Φ_F คือ ศักย์ไฟฟ้าเฟอร์มิ (Fermi potential) (โวลต์) = $(kT/q) \ln(N_A/n_i)$

n_i คือ ความหนาแน่นพาหะของซิลิกอนบริสุทธิ์ ((เซนติเมตร)⁻³)

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสม่ำเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ (Q_B) จะมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (คูลอมบ์)

N_A คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ ((เซนติเมตร)⁻³)

x_{dmax} คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่กว้างที่สุดที่สตรองอินเวอร์ชัน (เซนติเมตร)

และบริเวณปลอดพาหะที่กว้างที่สุดมีค่าเท่ากับ

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\epsilon_S(2\Phi_F)}{qN_A}} \quad \text{..... (2.5)}$$

เมื่อ ϵ_S คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน

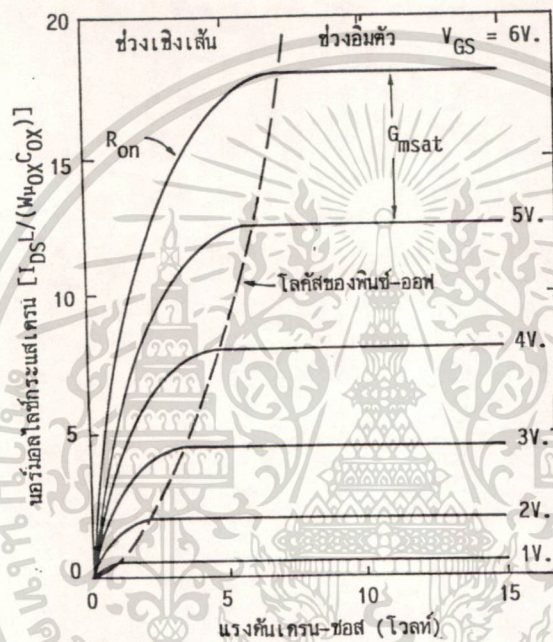
แทนค่า สมการที่ (2.4) และ (2.5) ลงในสมการที่ (2.3) ดังนั้นแรงดันขั้วเริ่มจะได้เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสของมอสเฟต

โดยทั่วไปแล้วกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS}) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 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 กระแสเดรนที่ได้จะมีค่าสูงสุด ในช่วงนี้จะเรียกว่า ช่วงอิ่มตัว (Saturation region)



รูปที่ 2.4 การทำงานในช่วงต่าง ๆ ของกราฟคุณสมบัติกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอส สำหรับมอสเฟตชนิดเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

2.3.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสในช่วงเชิงเส้น

การวิเคราะห์สมการกระแสเดรนของมอสเฟต โดยปกติแล้วจะใช้วิธี gradual channel approximation[8] โดยสมมติให้สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในแนวช่องทางเดินกระแส ทิศทาง y ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 แปรค่าอย่างช้า ๆ และมีค่าน้อยกว่าสนามไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉาก (ทิศทาง x) กับผิวซิลิกอนมาก ๆ ส่วนช่องทางเดินกระแสที่เกิดขึ้นจะแปรอย่างช้า ๆ เป็นฟังก์ชันกับตำแหน่ง จากผลของการประมาณค่านี้ สามารถใช้วิเคราะห์มอสเฟตใน 1 มิติได้ โดยมีระยะทางในการวิเคราะห์เท่ากับช่องทางเดินกระแสจากส่วนซอสไปยังส่วนเดรน นอกจากนี้ความถูกต้องในการวิเคราะห์ยังขึ้นกับบริเวณปลดพาหะที่เกิดขึ้นที่บริเวณปลายช่องทางเดินกระแสกับส่วนเดรนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$dV = I_{DS}dS = \frac{-I_{DS}dy}{W\mu_n Q_n(y)} \dots\dots\dots (2.7)$$

เมื่อ $Q_n(y)$ คือ ประจุไฟฟ้าที่ช่องทางเดินกระแสต่อหน่วยพื้นที่ (กลุอมบ์/ตารางเซนติเมตร)

W คือ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส (เซนติเมตร)

μ_n คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (ตารางเซนติเมตร/โวลต์.วินาที)

และ $Q_n(y)$ จะมีค่าเท่ากับ

$$Q_n(y) = -C_{OX} [V_{GS} - V_{FB} - V(y) - 2\Phi_F] + [2\epsilon_s q N_A (2\Phi_F + V(y))]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.8)$$

แทนค่า $Q_n(y)$ ลงในสมการ (2.7) แล้ว อินทิเกรตด้วยเงื่อนไขขอบเขต สำหรับ V มีค่าจาก 0 ถึง V_{DS} และสำหรับ y มีค่าจาก 0 ถึง L ดังนั้นสมการของกระแสเกรนจะได้เป็น

$$I_{DS} = \left(\frac{W}{L}\right)\mu_n C_{OX} \left\{ (V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F - \frac{V_{DS}}{2})V_{DS} - \frac{2}{3} \left[\frac{(2\epsilon_s q N_A)^{\frac{1}{2}}}{C_{OX}^2} \right]^2 \left[(V_{DS} + 2\Phi_F)^{\frac{3}{2}} - (2\Phi_F)^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแส (เซนติเมตร)

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

$$I_{DS} = \left(\frac{W}{L}\right)\mu_n C_{OX} \left\{ (V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F - \frac{V_{DS}}{2})V_{DS} - \frac{2}{3} \left[\frac{(2\epsilon_s q N_A)^{\frac{1}{2}}}{C_{OX}^2} \right]^2 \left[(V_{DS} + 2\Phi_F + V_{BG})^{\frac{3}{2}} - (2\Phi_F + V_{BG})^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \dots\dots\dots (2.10)$$

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของมอสเฟตกำลัง ส่วน P-base ซึ่งเทียบเท่ากับส่วนฐานรองของมอสเฟต จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับส่วนซอสเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างแฝงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นสมการที่ (2.9) จึงเป็นสมการสมบูรณ์ของมอสเฟตกำลัง

2.3.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสในช่วงอิ่มตัว

เมื่อเพิ่มแรงดันเดรน-ซอสมีค่าสูงมากขึ้น จนกระทั่งกระแสเดรนที่ได้รับมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันเดรน-ซอสที่สูงขึ้น จนกว่าจะเกิดปรากฏการณ์พังทลายของอุปกรณ์ การทำงานนี้จะอยู่ในช่วงอิ่มตัวซึ่งเป็นผลให้ คอนดักแตนซ์ ($q_{ds} = \frac{\partial I_{DSsat}}{\partial V_{DS}} \Big|_{V_{GS}=const.}$) มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

เมื่อคิฟเฟอร์เรดิเอต สมการที่ (2.9) เทียบกับ V_{DS} และแก้สมการโดยให้ $V_{DS} = V_{DSsat}$ จะได้

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F + \frac{\epsilon_s q N_A}{C_{OX}^2} \left[1 - \left(1 + \frac{2C_{OX}^2 (V_{GS} - V_{FB})^2}{\epsilon_s q N_A} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \dots\dots\dots (2.11)$$

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

$$I_{DSsat} = \left(\frac{W}{L}\right) \mu_n C_{OX} \left\{ (V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F - \frac{V_{DSsat}}{2}) V_{DSsat} - \frac{2}{3} \left[\frac{(2\epsilon_s q N_A)^{\frac{1}{2}}}{C_{OX}^2} \right]^2 \left[(V_{DSsat} + 2\Phi_F)^{\frac{3}{2}} - (2\Phi_F)^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \dots\dots\dots (2.12)$$

ดังนั้นสมการสมบูรณ์ของกระแสเดรนของมอสเฟตในช่วงอิ่มตัว หาได้โดยการแทนค่า V_{DSsat} จากสมการที่ (2.11) ลงในสมการที่ (2.9)

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 (2.7) เมื่ออินทิเกรตแล้ว จะได้สมการกระแสในช่วงเชิงเส้น เป็น

$$I_{DS} = \left(\frac{W}{L}\right) \mu_n C_{OX} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \dots\dots\dots (2.13)$$

และเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส ในช่วงอิ่มตัวจะ ได้ว่า $V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$ และเมื่อแทนค่า $V_{DS} = V_{DSsat}$ ลงในสมการที่ (2.13) จะได้สมการของกระแสเดรนในช่วงอิ่มตัวเป็น

$$I_{DSsat} = \left(\frac{W}{2L}\right)\mu_n C_{OX} (V_{GS} - V_T)^2 \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

สำหรับการวิเคราะห์หามอสเฟตกำลังในรายงานวิจัยนี้ จะใช้สมการที่ (2.13) และ (2.14) เป็นสมการหลักในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอส ตลอดจนพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันด้วย

2.4 อินคริเมนตัลพารามิเตอร์

อินคริเมนตัลพารามิเตอร์ (incremental parameters) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าน้อย ๆ ของมอสเฟต ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากของมอสเฟตที่มีสัญญาณขนาดเล็ก (small signal MOSFET) สำหรับในกรณีของมอสเฟตกำลัง ถึงแม้ว่าจะไม่ค่อยได้ใช้กับงานในระดับสัญญาณขนาดเล็กแต่พารามิเตอร์เหล่านี้ก็สามารถใช้ในการบ่งบอกคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟตกำลังได้เป็นอย่างดี พารามิเตอร์เหล่านี้ คือ

2.4.1 คอนดักแตนซ์ (conductance : g_{ds})

คอนดักแตนซ์ คือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสเดรนต่อแรงดันเดรน-ซอส นั่นคือ

$$g_{ds} = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=const.} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.13) คอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้นจะได้เป็น

$$g_{ds} = \frac{W}{L} \mu_n C_{OX} (V_{GS} - V_T - V_{DS}) \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

2.4.2 ทรานคอนดักแตนซ์ (transconductance : g_m)

ทรานคอนดักแตนซ์ คือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสเดรนต่อแรงดันเกต-ซอส นั่นคือ

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=const.} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จากสมการที่ (2.13) ทรานคอนดักแตนซ์ ในช่วงเชิงเส้น (g_m) จะได้เป็น

$$g_m = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} V_{DS} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

และ จากสมการที่ (2.14) ทรานคอนดักแตนซ์ ในช่วงอิ่มตัว (g_{msat}) จะได้เป็น

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

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

ความต้านทานในภาว่นำกระแส คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันครั้น-ชอสต่อกระแสครั้น นั่นคือ

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

ดังนั้น จากสมการที่ (2.13) ความต้านทานในภาว่นำกระแส ในช่วงเชิงเส้นจะได้เป็น

$$R_{on} = \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right) \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T - V_{DS})} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างดีมอส

3.1 การออกแบบดีมอส

จากโครงสร้างและหลักการทำงานที่อธิบายในบทที่แล้ว เมื่อนำมาสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ จะต้องแปรความหมายจากทฤษฎี เพื่อเปลี่ยนให้เป็นลวดลายวงจรที่เหมาะสมที่จะสร้างต่อไป โดยยึดหลักว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพสูงตรงตามที่วัตถุประสงค์หรือเงื่อนไขที่นักออกแบบวงจรได้กำหนดไว้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เราพบว่าตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดคุณสมบัติของดีมอส คือ เทคโนโลยีของห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบลวดลายระดับหน้าฉาก กระบวนการสร้างอุปกรณ์ รวมถึงความสะอาดของห้องปฏิบัติการ (clean room)

สำหรับกรณีการออกแบบลวดลายในระดับหน้าฉาก ในปัจจุบันนี้ คอมพิวเตอร์มีบทบาทช่วยให้การออกแบบเป็นไปอย่างสะดวก และรวดเร็ว สามารถสร้างอุปกรณ์ได้ซับซ้อนมากขึ้น ดังเช่น การออกแบบอุปกรณ์ประเภท LSI หรือ VLSI เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้ยังอาศัยการออกแบบด้วยมือ (by hand) อยู่ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ตัวเดี่ยว ๆ ลวดลายวงจรยังไม่ซับซ้อนมากนัก ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

ส่วนกระบวนการสร้างภายในห้องปฏิบัติการนี้ เป็นการสร้างอุปกรณ์ด้วยการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (thermal diffusion) และอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นดีมอสแบบเกตโลหะ (metal gate DMOS) ทำให้เกิดขีดจำกัดขึ้นหลายด้าน เช่น ลวดลายวงจรมีขนาดใหญ่ ผลกระทบเกี่ยวกับความจุไฟฟ้าแฝงสูง และยังคงคำนึงถึงผลการแพร่ด้านข้างด้วย (lateral diffusion) เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ โดยการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีเป็นแบบแพร่สารเจือด้วยไอออนอิฟฟานเดชั่น เกตแบบโพลี (poly gate DMOS) และเทคนิค self alignment อย่างไรก็ตามด้วยอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการทำให้เราทำการวิจัยการออกแบบ สร้าง และศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของดีมอสประสบความสำเร็จในระดับที่น่าพอใจ โดยเฉพาะเรื่องผลทางอุณหภูมิของดีมอสที่กำลังทำการวิจัย

3.1.1 กฎการออกแบบลวดลายระดับหน้าฉาก

สำหรับกฎการออกแบบลวดลายระดับหน้าฉาก (design rule of geometry layout patterns) ของดีมอสที่สร้างขึ้นนี้ จะอ้างอิงถึงเครื่องมือที่ใช้สร้างต้นแบบ ซึ่งเป็นแบบพิมพ์โดยตรง (direct contact print) และเทคโนโลยีการสร้างที่มีอยู่ ในขณะเดียวกันทำการศึกษาถึงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ ในที่นี้จะศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบลวดลาย โดยออกแบบให้ลวดลายมีขนาดเล็กที่สุด (minimum size : λ) เท่ากับ 10 ไมครอน (ในส่วนของความยาวของช่องทางเดินกระแส) สำหรับอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยรวม สรุปได้ดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟตกำลังที่จะสร้างขึ้น

พารามิเตอร์	การออกแบบ	หน่วย
ขนาดพื้นที่ตัวอุปกรณ์	4	(มิลลิเมตร) ²
ความยาวช่องทางเดินกระแส	10	ไมครอน
ความกว้างช่องทางเดินกระแส	36,620	ไมครอน
ความหนาแน่นอะตอมส่วน P-base*	5.0×10^{16}	(เซนติเมตร) ⁻³
ความลึกรอยต่อส่วน P-base	4.0	ไมครอน
ความหนาแน่นอะตอมส่วน N ⁺ -source**	$> 1 \times 10^{18}$	(เซนติเมตร) ⁻³
ความลึกรอยต่อส่วน N ⁺ -source	2.0	ไมครอน
ความหนาของเกตออกไซด์	1000	อังสตรอม

หมายเหตุ * ได้จากการคำนวณ เพื่อให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าประมาณ 2.5 โวลต์

** ออกแบบให้มีค่าความหนาแน่นอะตอมสูง ๆ เพื่อลดค่าความต้านทานในส่วน N⁺-source

3.1.2 การสร้างกระจกต้นแบบ

หลังจากออกแบบลวดลายในระดับหน้ากอกแล้ว จากนั้นจึงนำไปสร้างเป็นลวดลายต้นแบบ เพื่อใช้ในกระบวนการสร้าง โดยสร้างลงบนแผ่นกระจกฟิล์ม ขนาด 3"X3" ซึ่งมีขั้นตอนต่อไปนี้ คือ

1. นำเอาลวดลายที่ออกแบบไว้ เขียนลงบนกระดาษกราฟ แสดงในรูปที่ 3.1
2. นำเอาแผ่นโพลีเอสเตอร์วางซ้อนทับกระดาษกราฟบนเครื่องไมโครคัทเตอร์ แล้วตัดแผ่นโพลีเอสเตอร์ให้เป็นลวดลายตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ แสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำแผ่นโพลิเอสเตอร์ที่ตัดเสร็จแล้ว ไปถ่ายย่อส่วน 50 เท่าลงบนแผ่นกระจกฟิล์ม ด้วยกล้องย่อส่วน (reduction camera) หลังจากขึ้นลวดลายด้วยน้ำยาเคมี (developer and fixer) จะได้แผ่นกระจกต้นแบบ แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งพร้อมที่จะนำไปใช้ในกระบวนการสร้างต่อไป

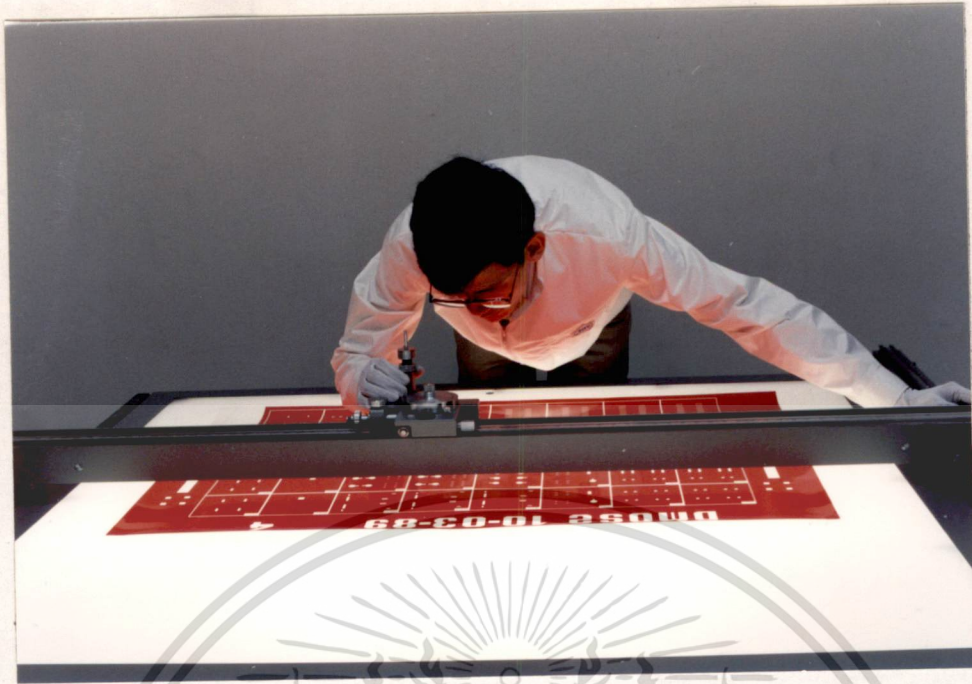
ชุดแผ่นกระจกต้นแบบที่ใช้ในการสร้างมอสเฟตกำลังนี้ มีทั้งหมด 5 แผ่น ดังนี้ :

กระจกแผ่นที่ 1	สร้างส่วน P-base
กระจกแผ่นที่ 2	สร้างส่วน N-source
กระจกแผ่นที่ 3	สร้างส่วนเกตออกไซด์
กระจกแผ่นที่ 4	สร้างชั้นสัมผัสอะลูมิเนียม
กระจกแผ่นที่ 5	สร้างลวดลายอะลูมิเนียม

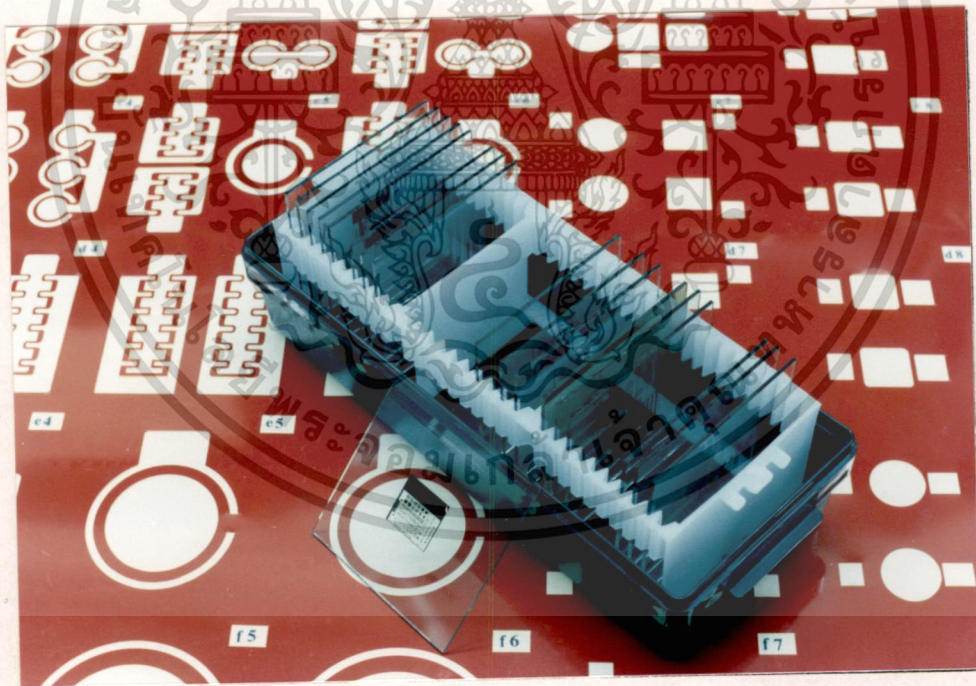


รูปที่ 3.1 การออกแบบลวดลายต้นแบบบนกระจกกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่นโพลีเอสเตอร์ด้วยเครื่องไมโครคัทเตอร์



รูปที่ 3.3 แผ่นโพลีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดเสร็จแล้วและชุดกระจกต้นแบบที่ถ่ายย่อลง 50 เท่าจากแผ่นต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสร้างดีมอส

3.2.1 การกำหนดขั้นตอนการสร้างดีมอส

ดีมอสที่สร้างขึ้นนี้ เป็นดีมอสแบบเกตโลหะ (metal gate) และใช้กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (thermal diffusion) ซ้อนกัน 2 ครั้ง (double diffusion) ดังนั้นเพื่อให้การสร้างดีมอสที่สร้างขึ้นเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ และสามารถตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ในระหว่างการสร้างได้ทุกขั้นตอน จึงได้กำหนดลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปลำดับขั้นตอนทั้งหมดที่ใช้สร้างมอสเฟตกำลัง

ขั้นตอนที่	ชื่อกระบวนการ
1	การเลือกคุณสมบัติของแผ่นผลึกเริ่มต้น
2	การทำความสะอาด
3	การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 5000 อังสตรอม
4	โฟโวลติโทกราฟี I ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วน P-base <ul style="list-style-type: none"> - การกัดซิลิกอนไดออกไซด์ - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
5	การแพร่สารเจือโบรอนส่วน P-base
6	การขัปลึกรอยต่อส่วน P-base และสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่ <ul style="list-style-type: none"> โฟโวลติโทกราฟี II ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วน N⁺-source - การกัดซิลิกอนไดออกไซด์ - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
7	การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสส่วน N ⁺ -source <ul style="list-style-type: none"> การขัปลึกรอยต่อส่วน N⁺-source และสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

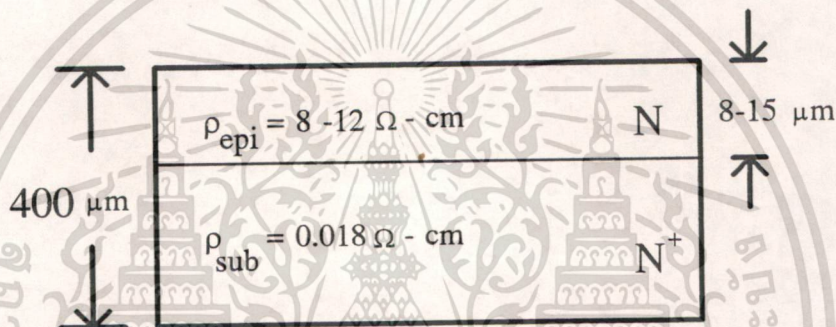
ขั้นตอนที่	ชื่อกระบวนการ
8	โฟโตลิโทกราฟี III ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วนเกท <ul style="list-style-type: none"> - การกัดซิลิกอนไดออกไซด์ - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
9	การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับส่วนเกท หนาประมาณ 1000 อังสตรอม
10	โฟโตลิโทกราฟี IV ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วนสัมผัสอะลูมิเนียม <ul style="list-style-type: none"> - การกัดซิลิกอนไดออกไซด์ - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
11	การเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้านหน้าแผ่นผลึก
12	โฟโตลิโทกราฟี V ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก เพื่อสร้างลวดลายอะลูมิเนียมส่วนเกท และส่วนขอส <ul style="list-style-type: none"> - การกัดอะลูมิเนียม - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
13	การเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้านหลังแผ่นผลึก เพื่อสร้างเป็นส่วนเดรน
14	การขึ้นเตอรัง
15	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรก
16	การเก็บบรรจุดีมอส <ul style="list-style-type: none"> - การตัดแยกชิพ - การติดชิพบนตัวถัง - การต่อสาย - การฉนีกฝา
17	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างมอสเฟตกำลัง

1. เลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น

- ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยว (single crystal) แบบอีพิแทกเซียล (epitaxial) ที่มีผิวหน้าขั้วฉนวนเป็นกระจกเงา
- ชนิด N/N⁺ ระนาบ (100) หนา 400 ไมครอน
- ความหนาของชั้นอีพิ 8 - 15 ไมครอน
- สภาพความต้านทานของชั้นอีพิ (ρ_{epi}) 8 - 12 โอห์ม-เซนติเมตร
- สภาพความต้านทานของชั้นฐานรอง (ρ_{sub}) 0.018 โอห์ม-เซนติเมตร



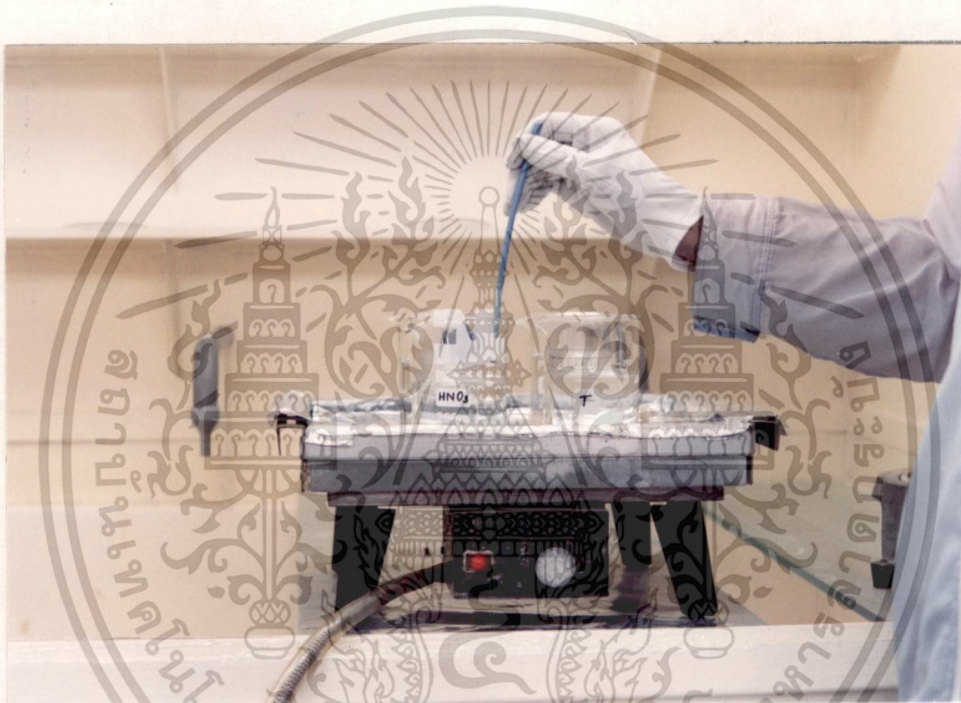
รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางแผ่นผลึกเริ่มต้นที่ใช้สร้างมอส

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าแผ่นผลึกด้วยกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิว
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.5 การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอน

3. การออกซิเดชันครั้งแรก (First oxidation)

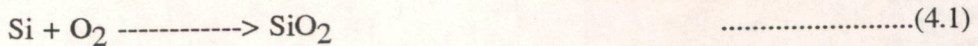
การออกซิเดชัน เป็นกระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide : SiO_2) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง และใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นจะใช้ทำหน้าที่ใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิกอน เพื่อป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกทำปฏิกิริยากับผิวของผลึกซิลิกอน (passivation layer) ใช้เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือ ใช้สร้างส่วนเกตออกไซด์ เพื่อเป็นส่วนเหนียวนำไปเกิดช่องทางเดินกระแสในอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทอสเฟต และประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิกอนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรของ ลวดลายอะลูมิเนียมกับผิวซิลิกอนส่วนอื่น ๆ และการคล่อมกันของลวดลายอะลูมิเนียมที่สร้าง 2 ชั้น

ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สร้างที่สร้างจากกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ซึ่งแสดงใน รูปที่ 3.6 (ก) โดยนำแผ่นผลึกซิลิกอนมาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูง 1000-1200 °C เป็นไปตามปฏิกิริยาทางเคมี ดังนี้ คือ

1. การออกซิเดชัน แบบแห้ง (dry oxidation)



2. การออกซิเดชัน แบบชื้น (wet oxidation)



โดยปกติแล้วเมื่อต้องการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนา ๆ จะใช้กระบวนการทั้งสองนี้ควบคู่กันไป

ในขั้นตอนนี้จะสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ให้มีขนาดความหนาประมาณ 5000 อังสตรอม) เพื่อเป็นหน้ากปกป้องกันการแพร่สารเจือโบรอน โดยนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้ว วางไว้ใน บรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 °C แล้วทำการ

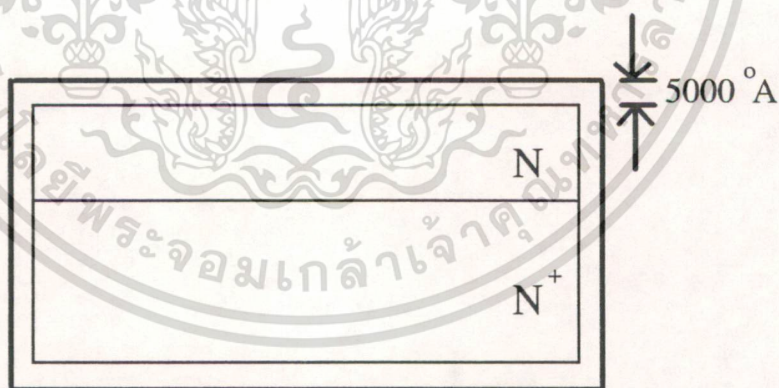
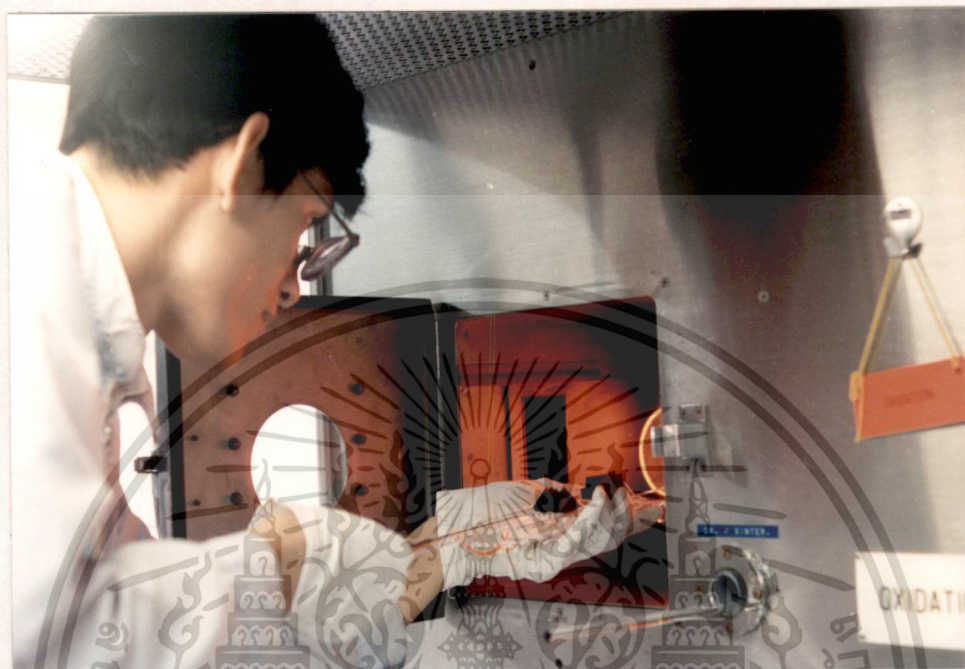
- ออกซิเดชัน แบบแห้ง เป็นเวลา 120 นาที โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชัน แบบชื้น เป็นเวลา 60 นาที โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชัน แบบแห้ง เป็นเวลา 60 นาที โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที

จะได้ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ 5000 อังสตรอม แสดงในรูปที่ 3.6 (ข)

4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) I

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิกอน เพื่อเปิดช่องของชั้น ซิลิกอนไดออกไซด์ออก สำหรับการแพร่สารเจือหรือเปิดช่องเพื่อทำขั้วโลหะ โดยใช้เทคนิคการถ่ายรูป (photo-graphic technique) เข้าช่วย ขนาดของช่องเปิดซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก ๆ ได้ และความถูกต้องแม่นยำที่ได้รับจะขึ้นกับการปรับ (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ สำหรับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการทำฟิล์ม (ส่วนที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยม) และส่วนที่ สองเป็นการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

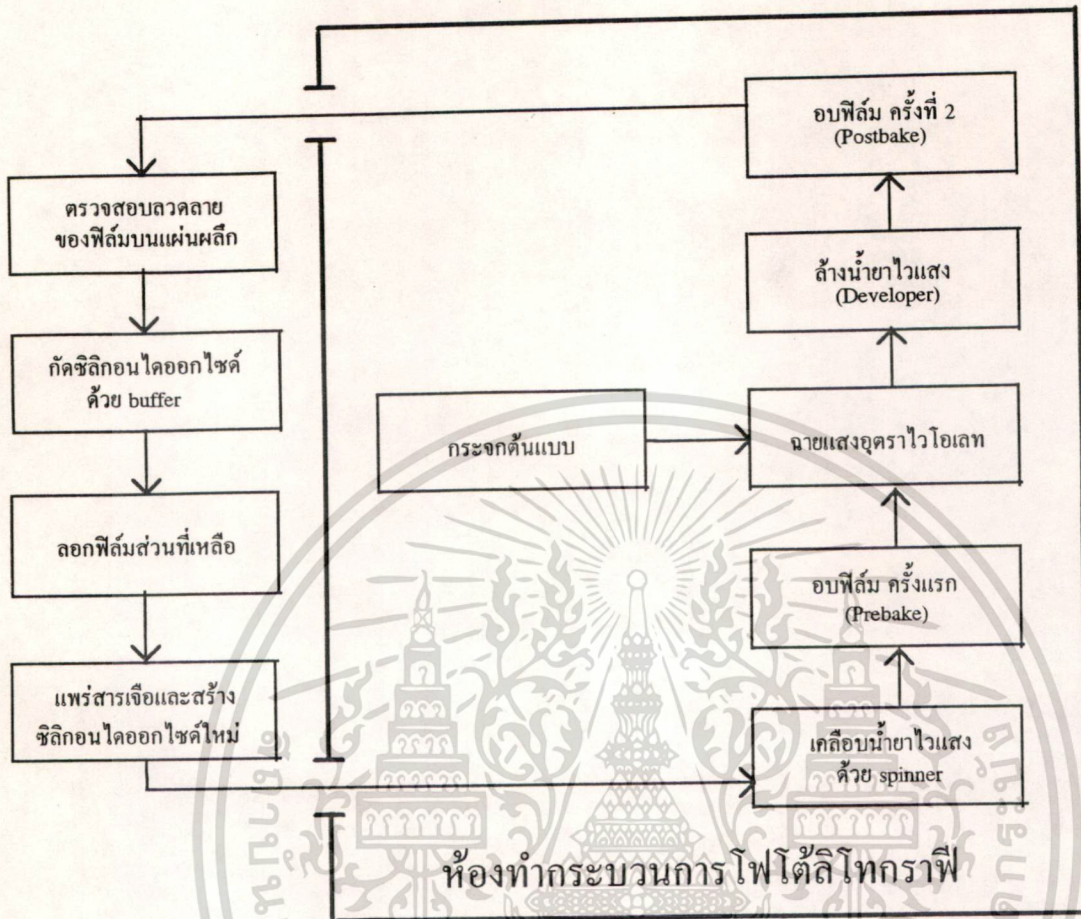


(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) การสร้างชั้นซัลฟิดอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน

(ข) ภาพตัดขวางแผ่นผลึกซัลฟิดอนหลังจากสร้างชั้นซัลฟิดอนไดออกไซด์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 โพลีชาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี สามารถใช้น้ำยาไวแสงได้ทั้งชนิดลบและชนิดบวก แต่ในขั้นตอนนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ (น้ำยา waycoat) เคลือบบนแผ่นผลึกซิลิกอน (ส่วนลำดับขั้นตอนการใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกจะได้กล่าวในโอกาสต่อไป) สำหรับรายละเอียดของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมีดังนี้ คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 60 นาที
- เคลือบนำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ "spinner" ความเร็ว 5000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบครั้งแรก (prebake) ให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ แผ่นที่ 1 ด้วยอุปกรณ์ "mask aligner" ซึ่งจะให้แสงอุตราไวโอเลตออกมาแหล่งจ่ายแสง คือ หลอดเมอร์คิวรี ($\lambda = 5000$ อังสตรอม) เป็นเวลา 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

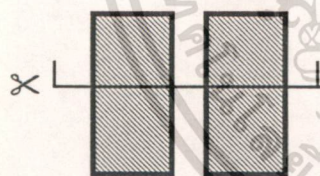
- การล้างภาพ

- จุ่มในน้ำยาล้างภาพ (xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำยาทำความสะอาด (isoprophyl) 3 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที
- ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (postbake) ให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ทาด้านหลังแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสง waycoat แล้วนำไปอบแห้งอีกครั้ง เป็นเวลา 30 นาที
- นำไปกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเคมี ซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดซิลิกอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลาย buffer มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอม/นาที
- นำไปลอกชั้นสารไวแสงชนิดลบที่ยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอนออก โดย
 - ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- แล้วนำไปทำความสะอาดผิวผลึก
- ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

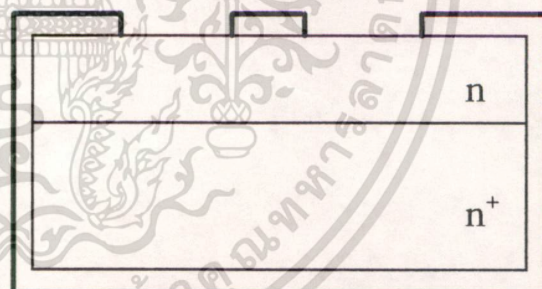
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.8 (ก) การถ่ายภาพจากกระจกต้นแบบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน

(ข) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 1

(ค) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน จากรูป (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.กระบวนการแพร่สารเจือ และ ขับลึก ส่วน P-base

กระบวนการแพร่สารเจือ เป็นกระบวนการควบคุมปริมาณและการกระจายความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่เติมให้แก่แผ่นผลึกซิลิกอน ที่อุณหภูมิสูง 800 - 1000 °C เป็นผลให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) สำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในแผ่นผลึกซิลิกอน โบรอนจะเป็นสารเจือที่แพร่หลายสำหรับสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในขณะที่ฟอสฟอรัสจะใช้สร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือเหล่านี้จะมาจากหลาย ๆ ลักษณะ คือ แหล่งจ่ายสารเจือแผ่นแข็ง เช่น BN และ SiP_2O_7 เป็นต้น แหล่งจ่ายสารเจือของเหลว เช่น BBr_3 และ POCl_3 เป็นต้น และแหล่งจ่ายสารเจือก๊าซ เช่น B_2H_6 และ PH_3 เป็นต้น

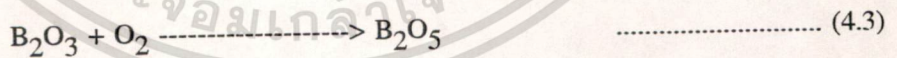
ในทางปฏิบัติกระบวนการแพร่จะแบ่งได้ออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ คือ

1. ขั้นตอนการแพร่สารเจือ predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้น เพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่จะเข้าไปในแผ่นผลึกของสารกึ่งตัวนำ
2. ขั้นตอนการขับลึก (drive in) เป็นขั้นตอนที่ทำต่อเนื่องจากขั้นตอน predeposition ทั้งนี้ เพื่อควบคุมความลึกของรอยต่อ และกำหนดลักษณะการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ

5.1 ขั้นตอนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน

การแพร่สารเจือโบรอน เพื่อสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในส่วน P-base ด้วยแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือ BN (A-grade) ที่อุณหภูมิ 820 °C ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

- ทำการ activation แหล่งจ่ายสารเจือโบรอนเป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที เพื่อให้อะตอมสารเจือโบรอนเปลี่ยนจาก B_2O_3 เป็น B_2O_5 และสามารถแพร่ซึมเข้าไปในแผ่นผลึกซิลิกอนได้ ดังปฏิกิริยาเคมี คือ



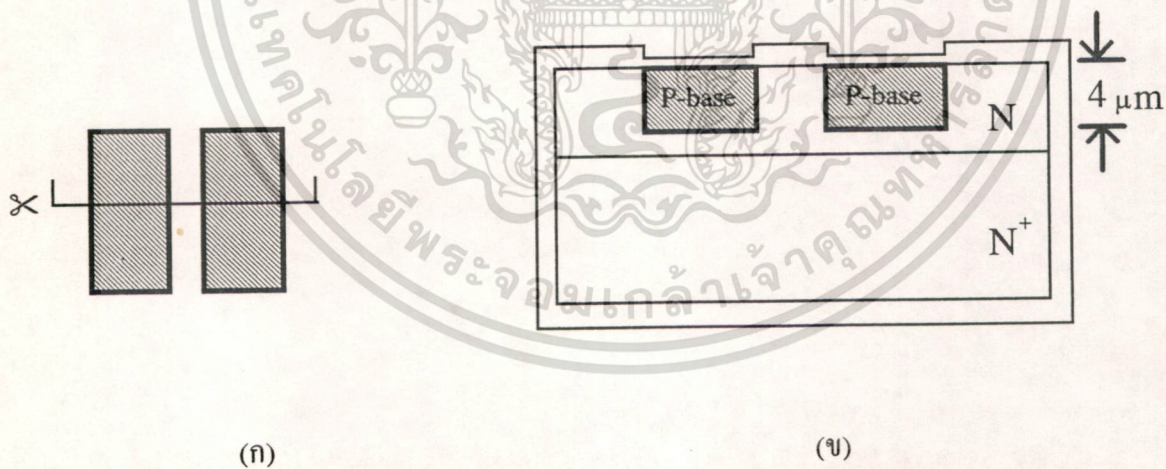
- แล้วทำการ stabilize 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที เพื่อให้อะตอมสารเจือกระจายอย่างสม่ำเสมอ และไล่ก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกจากระบบให้มากที่สุด เพราะก๊าซออกซิเจนที่เหลือจะสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งจะ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือ

- จากนั้นทำการแพร่สารเจือ (predeposition) โดยนำแผ่นผลึกที่ได้เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เรียบร้อยแล้วเข้าไป พร้อมกับแหล่งจ่ายสารเจือ เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที
- หลังจากทำการแพร่สารเจือเสร็จแล้ว จึงนำไปลอกชั้น borosilicate glass (BSG) โดย
 - จุ่มแผ่นผลึกลงใน กรดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- วัดค่าสภาพต้านทานแผ่น (Sheet resistivity) เพื่อตรวจสอบว่าอะตอมสารเจือโบรอนได้แพร่เข้าไปในแผ่นผลึกซิลิกอน ตามที่ได้กำหนดไว้หรือไม่

5.2. กระบวนการขั้วลึกลง/สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่

ทำการขั้วลึกลงอะตอมสารเจือโบรอน พร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนของกระบวนการดังนี้ คือ

- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบชื้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 11 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที

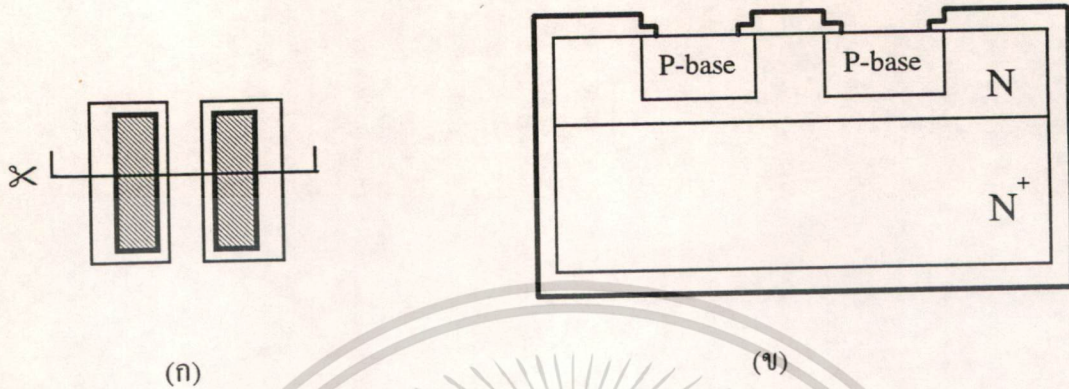


รูปที่ 3.9 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่แพร่สารเจือ โบรอนและขั้วลึกรอยต่อส่วน P-base
(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน จากรูป (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี II

เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อแพร่สารเจือชนิดเอ็น เป็นส่วน N^+ -source ในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2 โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4

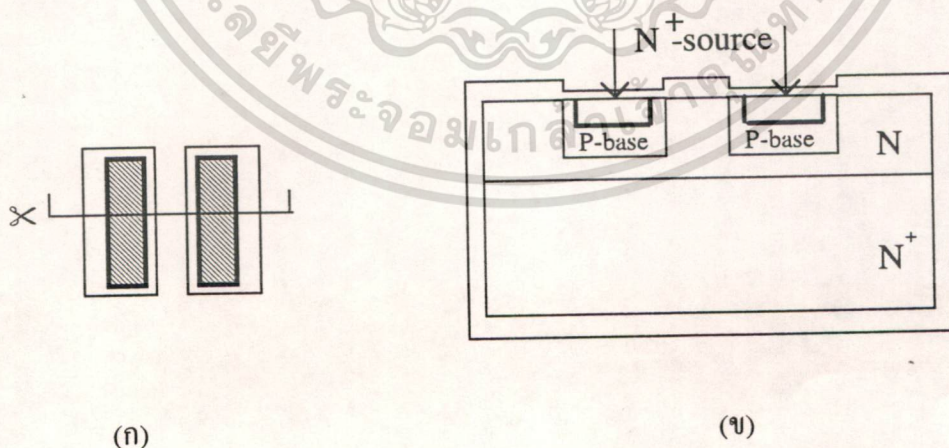


รูปที่ 3.10(ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2
(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน จากรูป (ก)

7. กระบวนการแพร่สารเจือส่วน N^+ -source

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

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

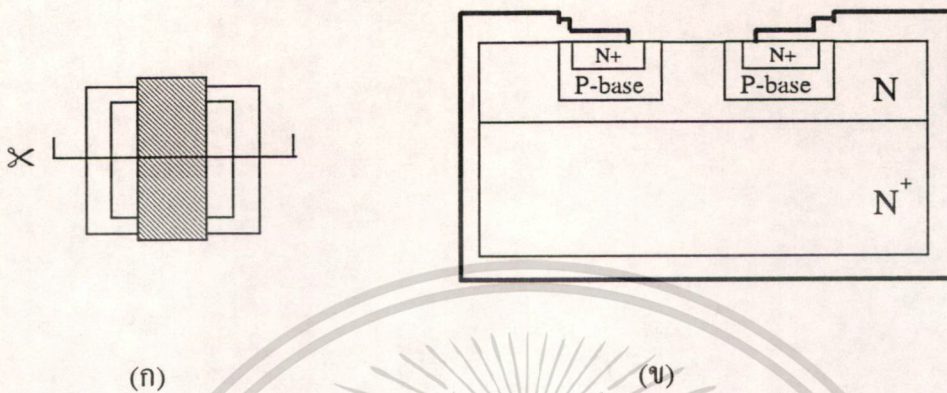


รูปที่ 3.11 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่แพร่สารเจือฟอสฟอรัสและขับลิกรอยต่อส่วน N^+ -source
(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน จากรูป (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. กระบวนการโฟลด์ลิโทกราฟี III

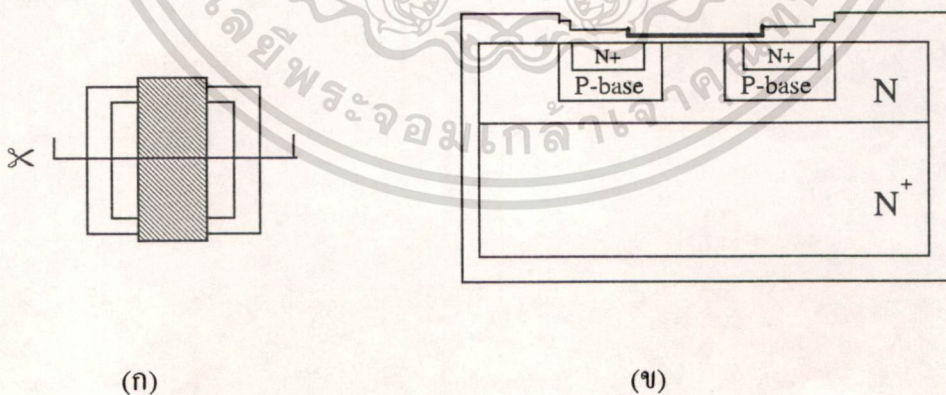
เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อสร้างส่วนเกตออกไซด์ ในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4



รูปที่ 3.12 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการโฟลด์ลิโทกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3
 (ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน จากรูป (ก)

9. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับส่วนเกต (Dry oxidation for gate oxide)

ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณส่วนเกต โดยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง ที่อุณหภูมิ 1100°C เวลา 30 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที ได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 Å

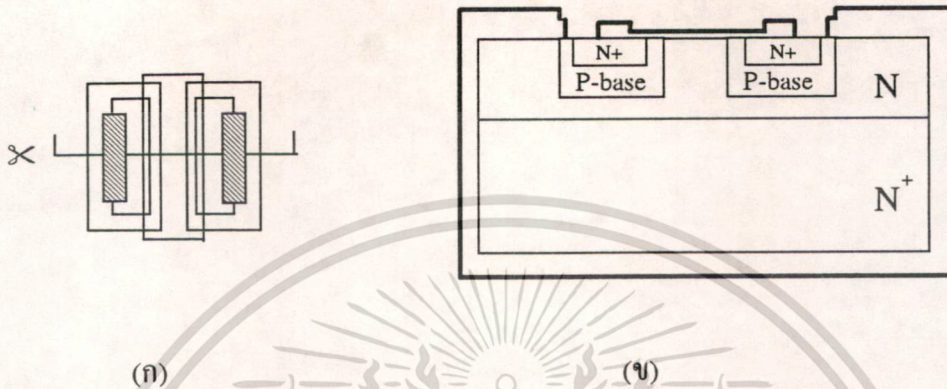


รูปที่ 3.13 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่สร้างเกตออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม
 (ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน จากรูป (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี IV

เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อสร้างส่วนเกทขั้วสัมผัสโลหะอะลูมิเนียม ในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4 โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4



รูปที่ 3.14(ก) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4
(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน จากรูป (ก)

11. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Aluminium evaporation) ด้านหน้า

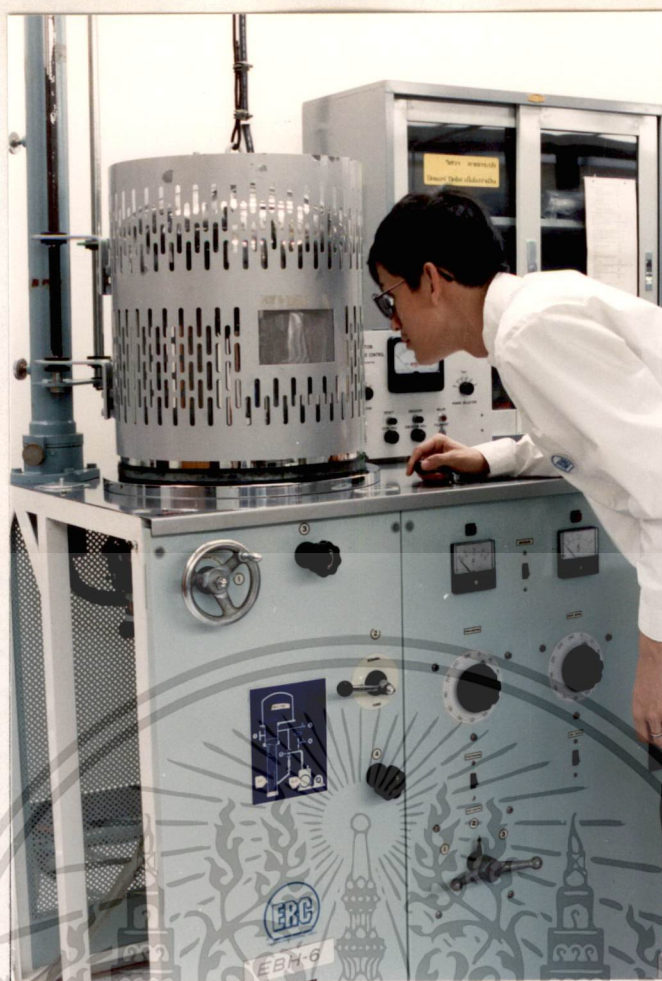
เพื่อสร้างอะลูมิเนียมส่วนเกทและส่วนขอส โดยใช้เครื่องมือ Vacuum evaporator ซึ่งมีบรรยากาศภายในครอบแก้ว (chamber) ประมาณ 1×10^{-6} Torr แล้วให้ความร้อนแก่เส้นลวดอะลูมิเนียมยาวประมาณ 1 เซนติเมตรประมาณ 6-10 เส้น จนการเป็นไออะลูมิเนียมไปเกาะที่ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน โดยทั่วไปการเคลือบอะลูมิเนียมที่ผิวหน้าแผ่นผลึกจะมีความหนาประมาณ $1 \mu\text{m}$

12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี V

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีนี้ ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ-1350) ซึ่งใช้ในการสร้างลวดลายอะลูมิเนียมด้านบนแผ่นผลึกจากกระจกต้นแบบแผ่นที่ 5 มีลำดับขั้นตอนดังนี้ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Vacuum evaporator

- ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (postbake) ให้แผ่นฟิล์มที่เคลือบอยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- นำแผ่นผลึกไปกัดชั้นอะลูมิเนียมด้วยสารละลาย ซึ่งมีส่วนผสมของกรดฟอสฟอริกเป็นหลักจุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลายนี้ ซึ่งมีอุณหภูมิราว 40 °C เป็นเวลา 2-3 นาที
- นำไปลอกชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวกที่ยังคงค้างบนแผ่นผลึกออก โดย
 - จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

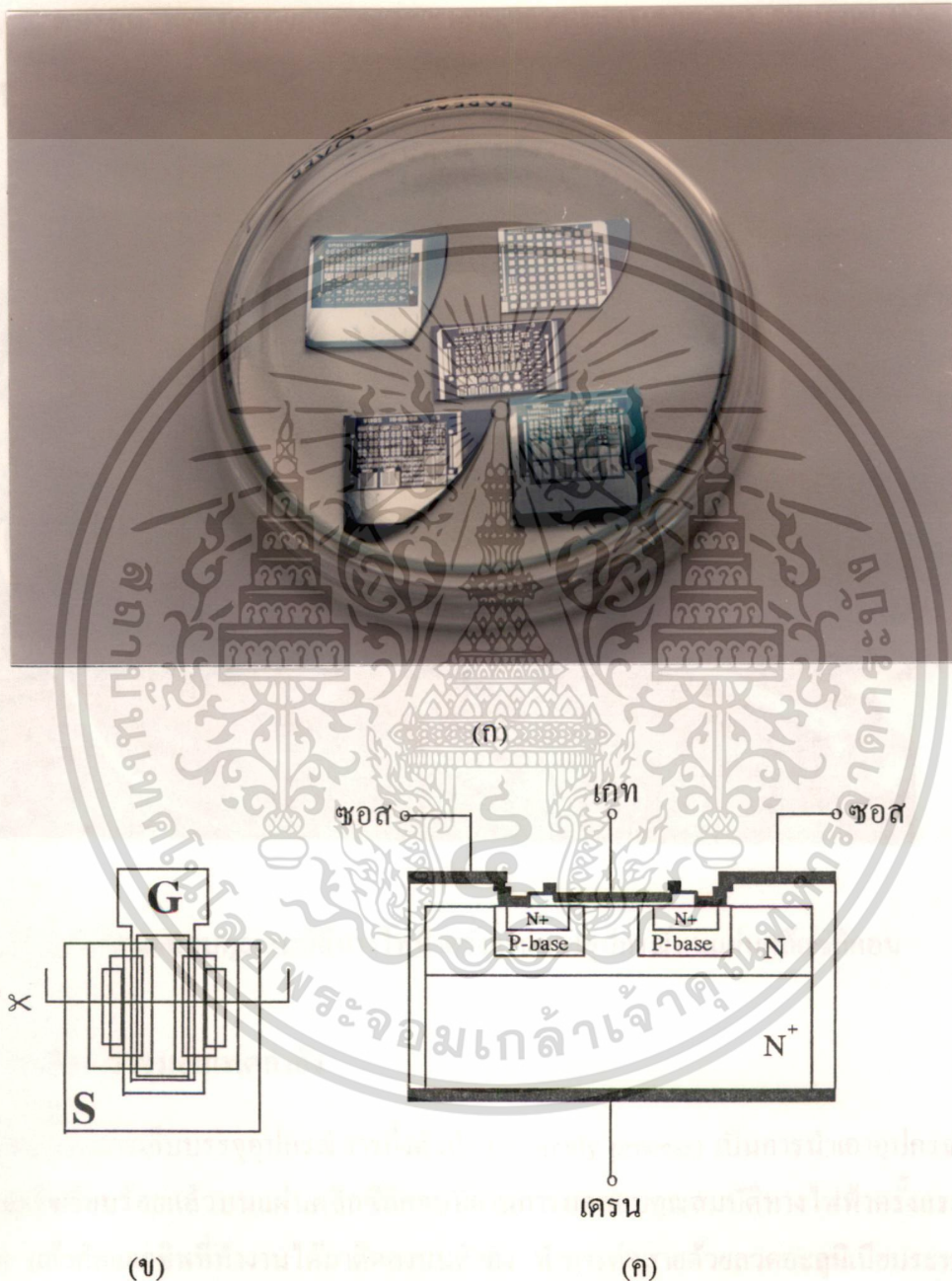
13. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Aluminium evaporation) ด้านหลัง

เพื่อสร้างอะลูมิเนียมส่วนครน ด้านหลังแผ่นผลึกซิลิกอน โดยมีลำดับขั้นตอนเหมือนกับหัวข้อที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. กระบวนการ Sintering

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



รูปที่ 3.16 (ก) ภาพถ่ายของชิปที่ได้สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วบนผลึกซิลิกอน

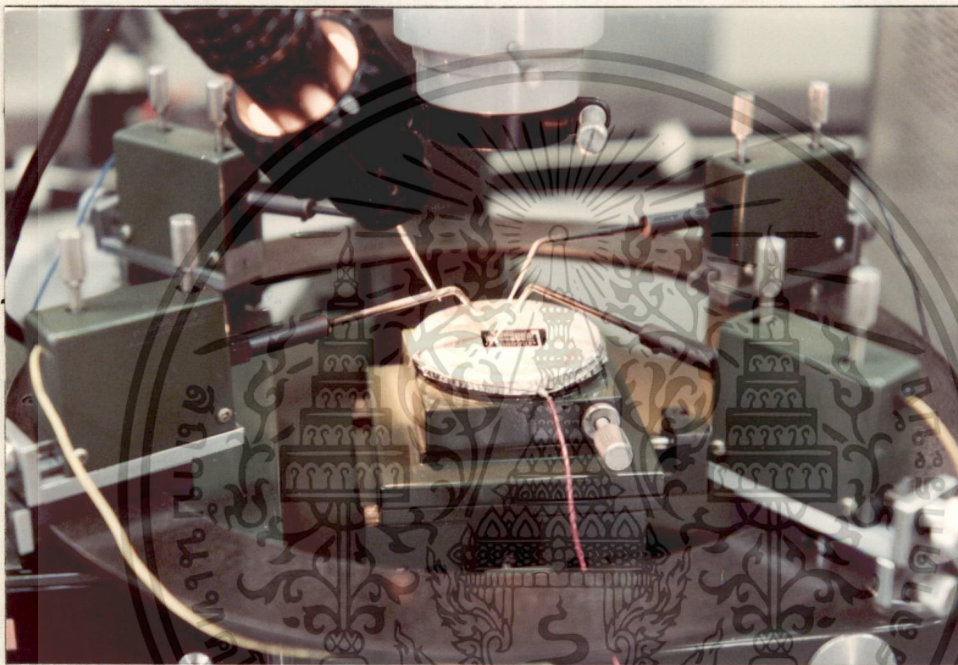
(ข) ภาพด้านบนของชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว

(ค) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน จากรูป (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. การทดสอบอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน (On wafer test)

ก่อนที่จะนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่สร้างเสร็จแล้วไปตัดแบ่งออกเป็นชิพ จะมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าก่อน โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Probe station ซึ่งใช้เข็มจิ้มลงไปอยู่ที่จุดต่อสาย (bonding pad) ที่ 2 ขั้ว คือ ขั้วเกท และขั้วซอส ส่วนฐานรองของแผ่นผลึกซิลิกอนจะเป็นส่วนเดรน แล้วต่อสายโลหะเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) เพื่อความีชิพใดทำงานได้ หรือไม่ได้ ส่วนชิพที่เสียก็จะถูกทำเครื่องหมายไว้และจะไม่นำไปเก็บบรรจุ



รูปที่ 3.17 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกของอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน

3.2.3 การเก็บบรรจุมอสเฟตกำลัง

กระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (assembly process) เป็นการนำเอาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกมาทำการตัดแยกชิพ แล้วตัดแยกชิพที่ทำงานได้มาติดลงบนตัวถัง ทำการต่อสายด้วยลวดอะลูมิเนียมระหว่างชิพกับขาตัวถังจากนั้นปิดฝานิกฝาเข้ากับตัวถัง และทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย จนมั่นใจว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานได้ตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้จากการออกแบบและสามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

กระบวนการเก็บบรรจุ อธิบายสรุปพอสังเขปได้ดังต่อไปนี้ คือ

3.2.3.1 การตัดแยกชิพ

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

3.2.3.2 การติดชิพบนตัวถัง

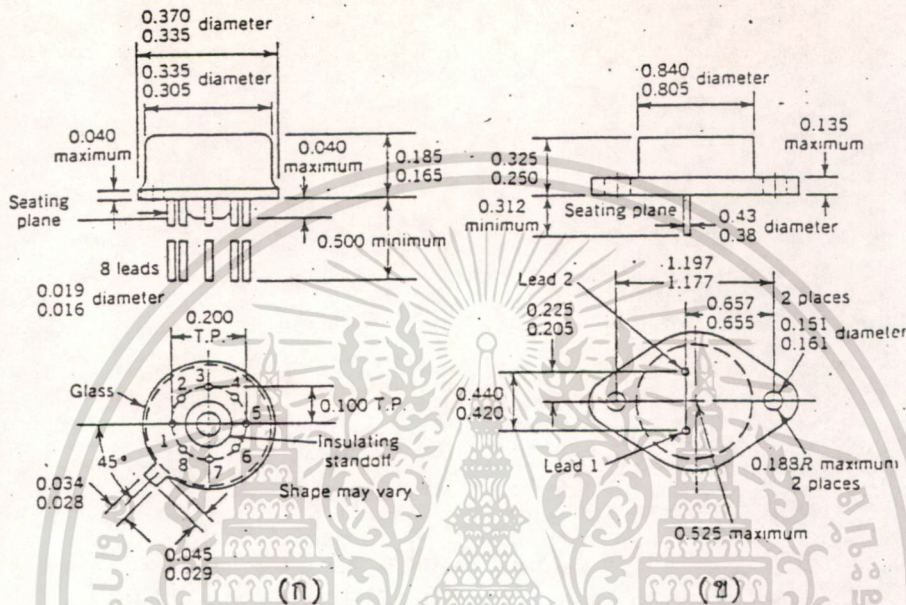
การติดชิพ (die bonding) เป็นการนำเอาชิพที่ทำงานได้หลังจากที่ผ่านการทดสอบครั้งแรกและคัดออกเป็นชิพเรียบร้อยแล้ว มาติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 สำหรับดีมอสที่มีขนาดเล็ก และตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 สำหรับดีมอสที่มีขนาดใหญ่ โดยชิพขนาดเล็กที่นำมาติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 จะใช้เครื่องติดชิพที่ให้ความร้อนสูงประมาณ 400°C ช่วยในการยึดชิพให้ติดกับผิวของตัวถังที่เป็นทอง ส่วนชิพขนาดใหญ่ที่ติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 จะใช้กาวเงิน (silver press) ติดชิพเข้ากับตัวถัง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับในรูปที่ 3.19 เป็นตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 และ TO-3 ซึ่งแสดงขนาดต่าง ๆ ของตัวถัง (หน่วยเป็นนิ้ว)

3.2.3.3 การต่อสาย

การต่อสาย (wire bonding) เป็นการเชื่อมต่อลวดอะลูมิเนียมระหว่างชิพกับขาของตัวถังที่จะต่อไปใช้กับงานภายนอก ซึ่งในการต่อสายจะใช้หลักการของความถี่สูง ในกรณีของตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 จะใช้ลวดอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 25 μm ส่วนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 จะใช้ลวดอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 125 μm

3.2.3.4 การฉีกฝา

การฉีกฝา (encapsulate) เป็นการปิดฝาโลหะเข้ากับตัวถัง เพื่อป้องกันไม่ให้ชีพเกิดเสียหายอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรก สารเคมีภายนอก และการกระทบกับลวดโลหะที่ใช้ต่อสาย นอกจากนี้ในขณะที่ทำงานยังช่วยระบายความร้อนบางส่วนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์



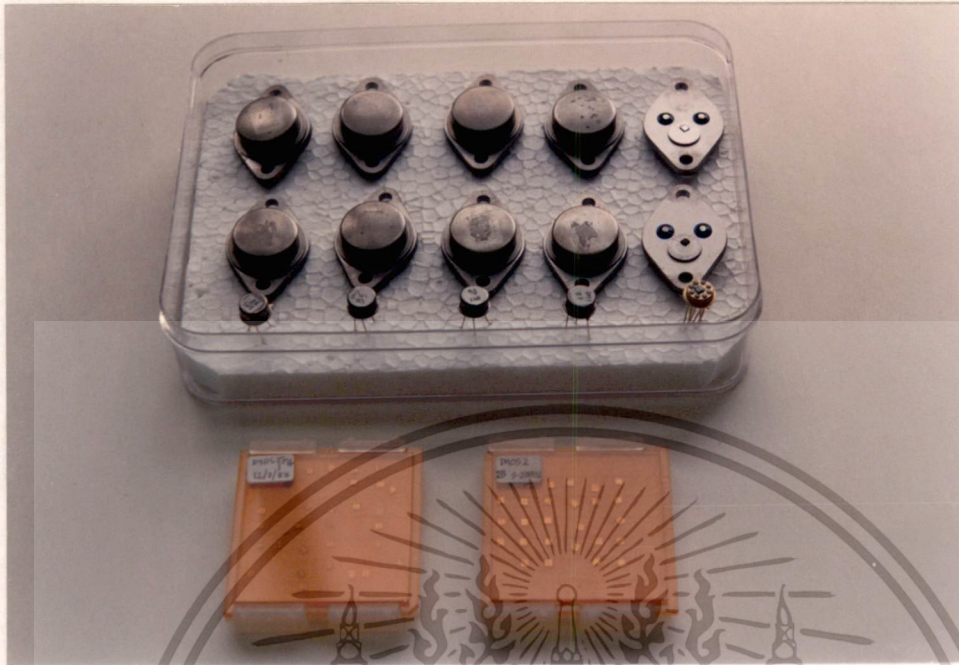
รูปที่ 3.18 ตัวถังกระป๋องโลหะที่ใช้เก็บบรรจุชิพของมอสเฟตกำลัง

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

3.2.3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายของชิพและชิพที่ติดบนตัวถังเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

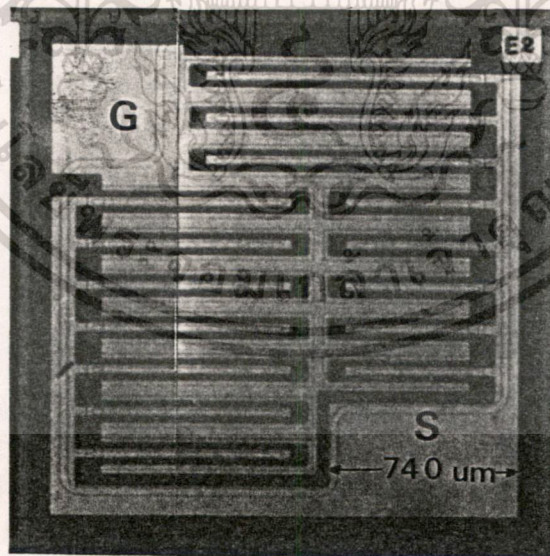
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้ จะได้กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของผลกระทบทางอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคิมอส โดยนำเอาคิมอสที่สร้างเสร็จแล้วตามกระบวนการสร้างที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ครั้งแรกบนแผ่นผลึกซิลิกอน หลังจากทดสอบว่าคิมอสทำงานได้ปกติ จึงนำมาตัดเป็นชิพเดี่ยว ๆ แล้วเก็บบรรจุลงบนตัวถัง จากนั้นจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย เพื่อจะได้ศึกษาถึงรายละเอียดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งผลการศึกษาคิมอสที่กล่าวถึงนี้ มีดังต่อไปนี้ คือ

4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของคิมอส

นำเอาคิมอสที่แสดงในรูปที่ 4.1 มาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐาน คือ แรงดันขีดเริ่มกระแส เทรน ทรานคอนดักแตนซ์ ความต้านทานในภาวะนำกระแส กระแสรั่วไหล และแรงดันพังทลายมีรายละเอียดการวัด ดังนี้



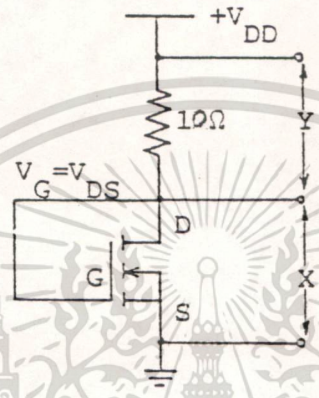
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านบนของคิมอสที่ใช้ทดลองขนาด 4 ตารางมิลลิเมตร

และมีขนาดของ $L = 10$ ไมครอน และ $w = 36,620$ ไมครอน

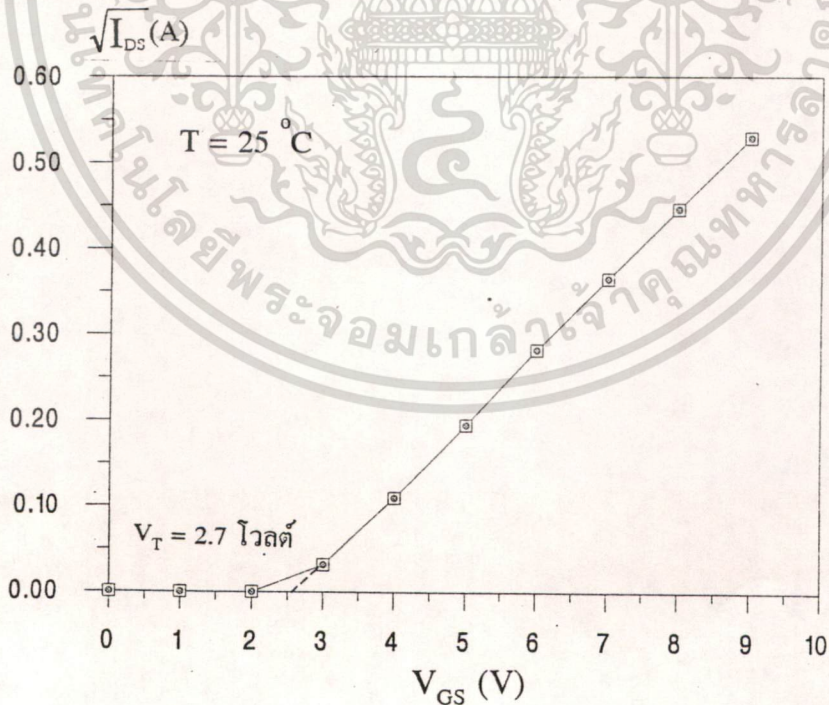
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การวัดแรงดันขั้วเริ่ม

นำดีโอสมาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเกต (V_{GS}) เพื่อหาค่าแรงดันขั้วเริ่มด้วยวิธี $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} โดยต่อวงจรในรูปที่ 4.2 แล้วนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} จากนั้นลากเส้นตรงจากกราฟลงมาตัดแกน V_{GS} ที่จุดตัดแกนนี้จะเป็นค่าแรงดันขั้วเริ่ม ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 วงจรวัดความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} เพื่อหาค่าแรงดันขั้วเริ่ม

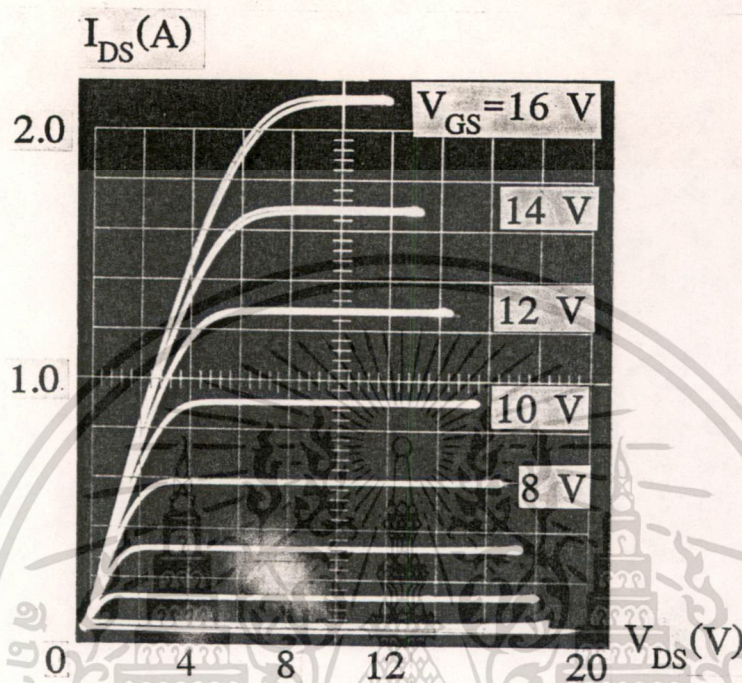


รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} และหาค่าแรงดันขั้วเริ่มของดีโอสเท่ากับ 2.7 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การวัดกระแสเดรน ทรานคอนดักแตนซ์ และความต้านทานในภาว่นำกระแส

นำเอาคีมอสมาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสโดยใช้ เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ได้ผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสเดรน กับแรงดันเดรน ซอส

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 แสดงว่าคีมอสที่สร้างขึ้น สามารถทำงานในลักษณะของ ทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดี และสามารถนำคีมอสไปใช้งานในวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าได้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีค่าทรานคอนดักแตนซ์ (G_{msat}) เท่ากับ 320 มิลลิโมห์ และความต้านทานในภาว่นำกระแส (R_{on}) เท่ากับ 3.33 โอห์ม (วัดที่ $V_{GS} = 16$ โวลต์)

4.1.3 การวัดกระแสรั่วไหลและแรงดันพังทลาย

นำเอาคีมอสมาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน กับแรงดันเดรน-ซอส โดยใช้ เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ในการวัดนี้จะให้ $V_{GS} = 0$ และป้อนแรงดัน V_{DS} จนกระทั่งคีมอสเกิดการพังทลายขึ้น

จากผลการทดลองพบว่า กระแสรั่วไหล I_{DSS} เท่ากับ 3.0 มิลลิแอมป์ ซึ่งกระแสรั่วไหลส่วน ใหญ่จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่ไหลผ่านบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ P-base กับ N-drift ส่วนแรงดันพังทลายที่วัดได้เท่ากับ 170 V ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากจนเกิดปฏิกิริยาแบบทวีคูณของประจุไฟฟ้าอิสระ จนไม่สามารถควบคุมปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในคีมอสได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดรเห็นาเปไซบระเษชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองทั้งสามหัวข้อ เราสามารถสรุปผลการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานต่าง ๆ ก่อนจะเริ่มศึกษาผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ และสามารถสรุปคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ นี้ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของดีมอส

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
พื้นที่ของอุปกรณ์	4	(เซนติเมตร) ²
ความยาวช่องทางเดินกระแส (L_{ch}) [*]	12	ไมครอน
ความกว้างช่องทางเดินกระแส	36,620	ไมครอน
ความลึกรอยต่อส่วน P-base	3.85	ไมครอน
ความหนาแน่นอะตอมส่วน P-base	6.4×10^{16}	(เซนติเมตร) ⁻³
ความลึกรอยต่อส่วน N ⁺ -Source	1.50	ไมครอน
ความหนาแน่นอะตอมส่วน N ⁺ -Source	1.10×10^{18}	(เซนติเมตร) ⁻³
ความหนาเขตทอออกไซด์	950	อังสตรอม
แรงดันขีดเริ่ม	2.70	โวลต์
ทรานคอนดักแตนซ์	320	มิลลิโมห์
ความต้านทานในภาวนำกระแส	3.33	โอห์ม
กระแสรั่วไหล	3.0	มิลลิแอมป์
แรงดันพังทลาย	170	โวลต์

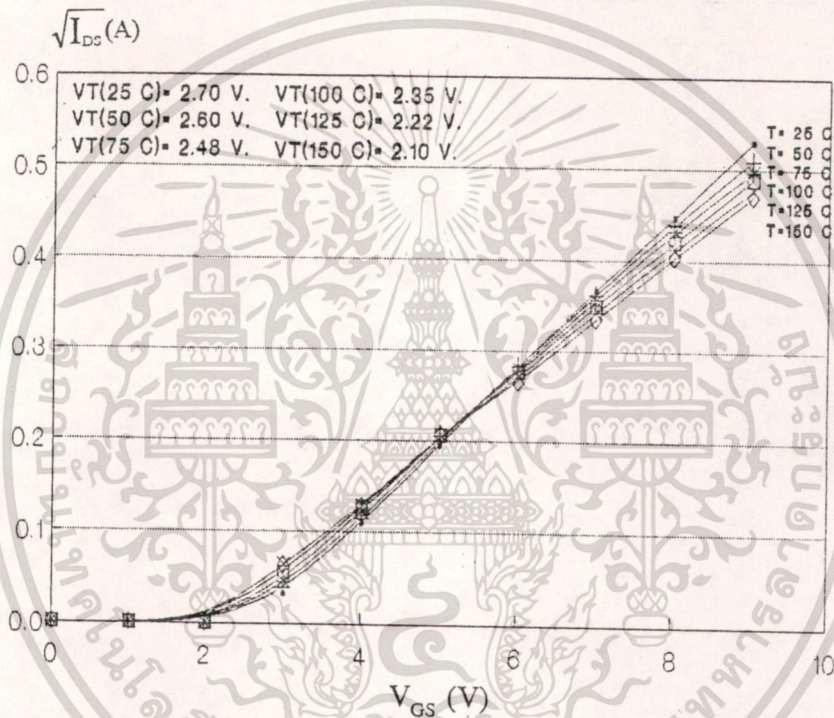
หมายเหตุ * พิจารณาถึงผลเนื่องจากการแพร่ด้านข้าง (lateral diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลกระทบทางอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส

4.2.1 ผลกระทบทางอุณหภูมิกับแรงดันขีดเริ่ม

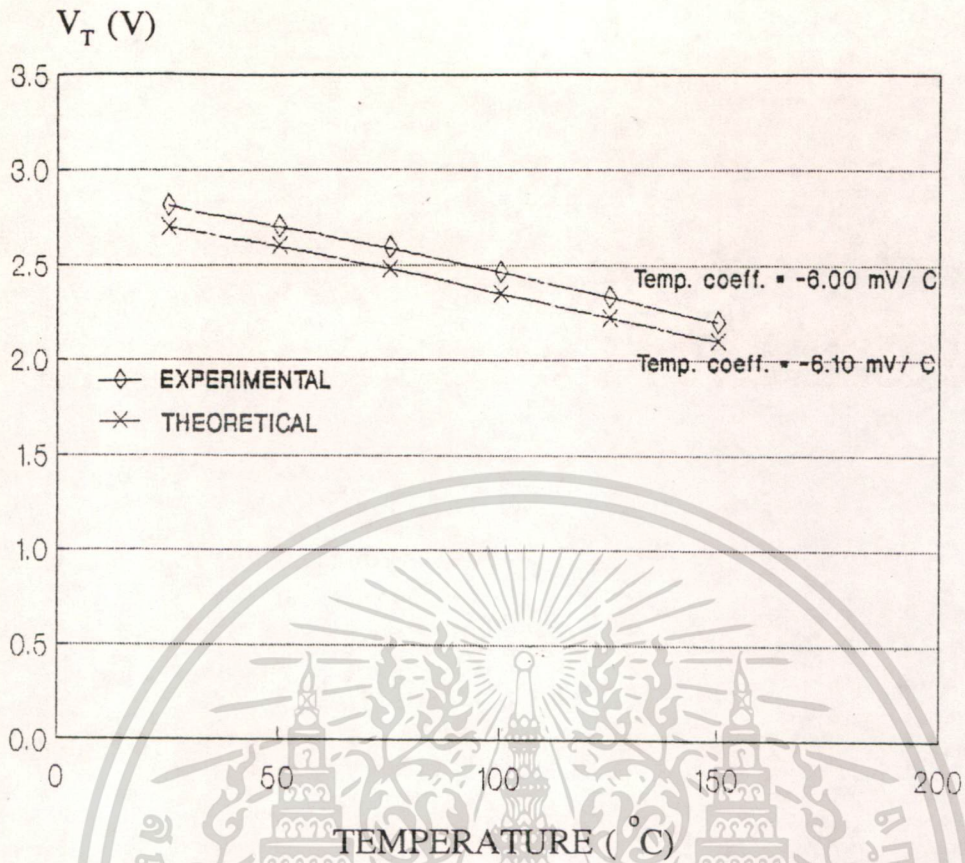
นำเอาดีมอสมาต่อวงจรเหมือนในรูปที่ 4.2 แต่เพิ่มเตาอบ เพื่อเพิ่มส่วนควบคุมอุณหภูมิให้แก่ดีมอสจากอุณหภูมิ 25-150 °C แล้วทำการวัดคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต-ซอส ในแต่ละช่วงอุณหภูมิจาก 25 °C จนกระทั่งถึง 150 °C โดยเพิ่มขึ้นช่วงละ 25 °C จากนั้นนำข้อมูลที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การหาแรงดันขีดเริ่มจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 150 °C

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ V_{GS} ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 - 150 °C ได้แรงดันขีดเริ่มที่อุณหภูมิ 25 °C, 50 °C, 75 °C, 100 °C, 125 °C และ 150 °C เป็น 2.70, 2.60, 2.48, 2.35, 2.22, 2.10 โวลต์ ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ดีมอสสูงขึ้นทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าลดลง และเมื่อนำแรงดันขีดเริ่มเหล่านี้มาเขียนกราฟเทียบกับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แรงดันขีดเริ่มจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเชิงลบมีค่าเท่ากับ -6.00 มิลลิโวลต์/°C เมื่อนำเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากสมการที่ (2.6) โดยเพิ่มเทอมที่ขึ้นกับผลของอุณหภูมิ [9], [10], [11] ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แรงดันขีดเริ่มที่ขึ้นกับผลของอุณหภูมิจากการทดลองเปรียบเทียบกับการ

คำนวณ

$$V_T(T) = V_{FB}(T) + 2\Phi_F(T) + \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A [2\Phi_F(T)]}}{C_{ox}} \quad (2.6)$$

$$\phi_{MS} = -1.15 + \frac{E_G(T)}{2q} - \phi_F(T) \quad (4.1)$$

$$\phi_F(T) = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (4.2)$$

$$n_i = 3.34 \times 10^{19} \left(\frac{T}{300}\right)^3 \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (4.3)$$

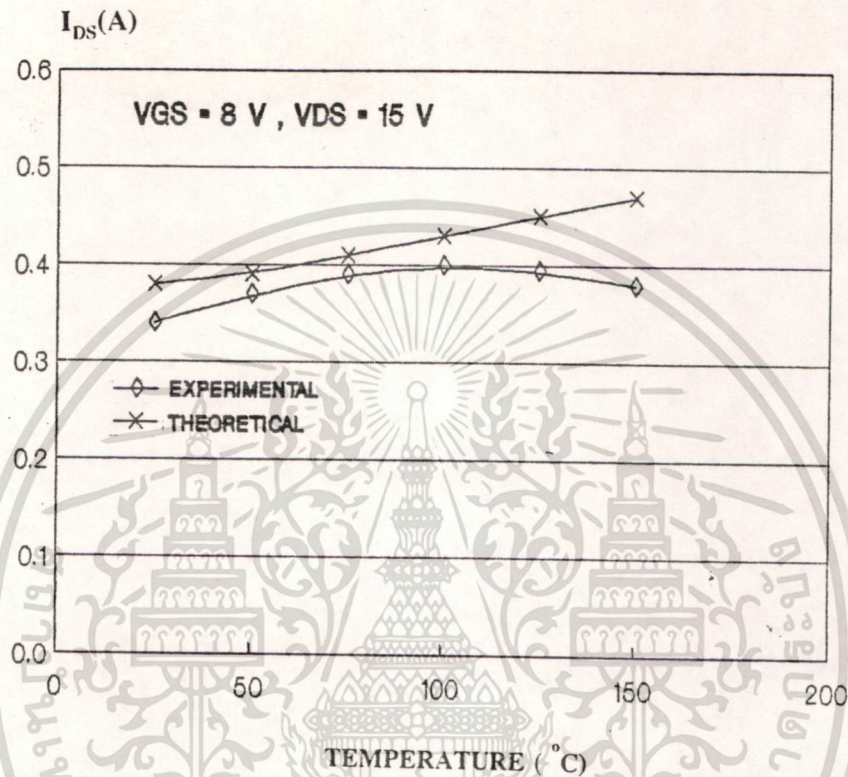
$$E_G(T) = 1.16 - \frac{7.02 \times 10^{-4} T^2}{T - 1108} \quad (4.4)$$

จากการคำนวณแรงดันขีดเริ่มที่อุณหภูมิ 25 - 150°C จะกระจายลดลงจาก 2.81, 2.70, 2.59, 2.46, 2.33 และ 2.20 โวลต์ ตามลำดับ และมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเท่ากับ -6.10 มิลลิโวลต์/°C จากการทดลองพบว่า แรงดันขีดเริ่มจะมีค่าผิดพลาด เมื่อกับการคำนวณประมาณ 4 % ซึ่งสาเหตุที่ผิดพลาดมาจากประจุไฟฟ้าที่ผิว ซึ่งในการคำนวณได้ใช้ค่าต่างๆ ไป ไม่ได้วัดจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลกระทบทางอุณหภูมิกับกระแสครน

นำเอาคีมอสมาวัดค่ากระแสครนเหมือนในหัวข้อ 4.1.2 แต่เพิ่มส่วนควบคุมอุณหภูมิให้แก่คีมอสมในช่วง $25 - 150^{\circ}\text{C}$ โดยพิจารณากระแสครนที่กราฟ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 15$ โวลต์ แล้วนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสครนกับอุณหภูมิ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7

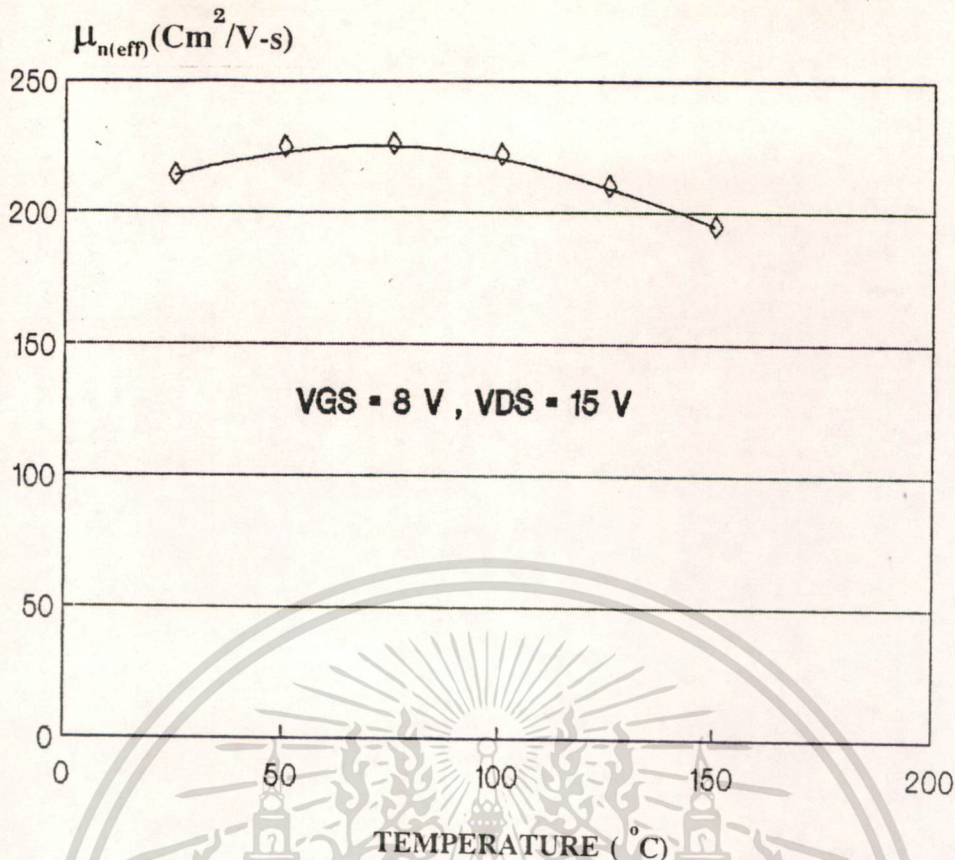


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสครนกับอุณหภูมิ วัดที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 15$ โวลต์

จากการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.7 กราฟที่ได้จากการทดลองไม่เป็นกราฟเชิงเส้น กระแสครนที่ได้ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25°C , 50°C , 75°C , 100°C , 125°C และ 150°C กระแสครนเท่ากับ 340, 370, 390, 400, 395 และ 380 มิลลิแอมป์ ในขณะที่กราฟจากการคำนวณจากสมการที่ (2.14) เป็นกราฟเชิงเส้น โดยใช้ค่าความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอน ($\mu_{n(\text{eff})}$) [12] ของระนาบ (100) เท่ากับ 240 (เซนติเมตร)²/โวลต์-วินาที และจากการคำนวณจะได้กระแสครนอยู่ในช่วง 380-470 มิลลิแอมป์ จากผลการทดลองที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าในช่วงแรกของกราฟกระแสครนมีแนวโน้มสูงขึ้น เกิดจากผลของแรงดันขีดเริ่มที่ลดลง เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกกระแสครนที่ได้กลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผลของกระแสครนที่มากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ไม่สะดวกมีการชนกันเกิดขึ้น ทำให้ค่าความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนลดลง และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนกับอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์หรือมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสารนี้ได้ที่ โทร. 0-2310-3100 หรือ โทรสาร 0-2310-3101

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนกับอุณหภูมิ

วัดที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 15$ โวลต์

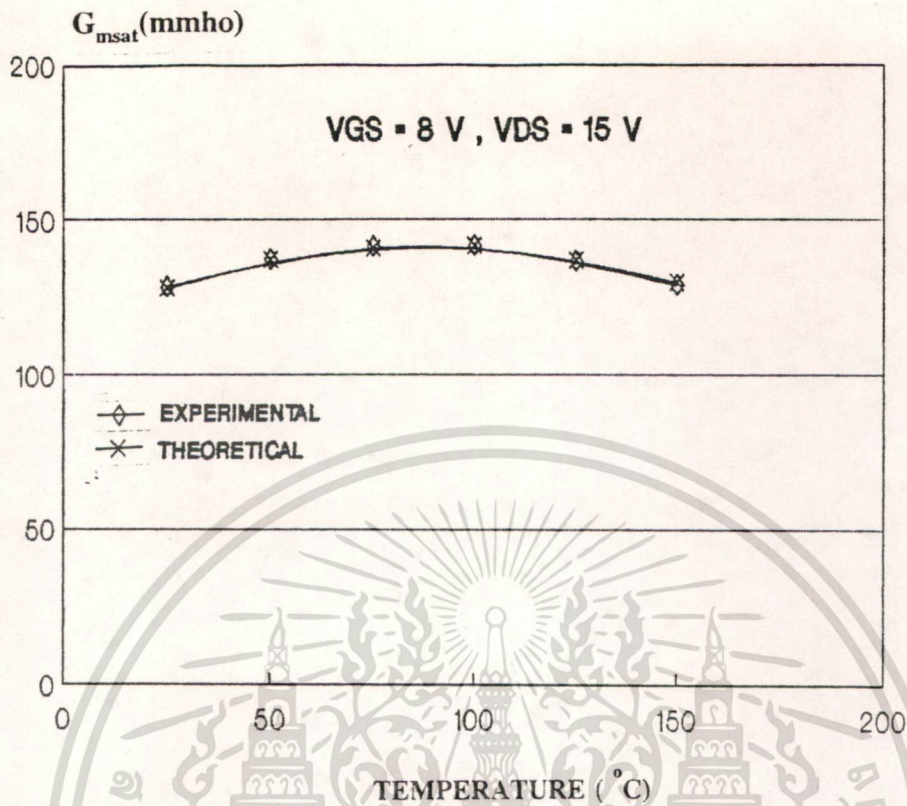
ว่าที่อุณหภูมิ 25°C , 50°C , 75°C , 100°C , 125°C และ 150°C ความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนเท่ากับ 214, 225, 226, 222, 210 และ 195 (เซนติเมตร)²/โวลต์-วินาที ตามลำดับ

4.2.3 ผลกระทบทางอุณหภูมิกับทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัว

นำผลการทดลองที่วัดในหัวข้อ 4.2.2 มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัว (G_{msat}) กับอุณหภูมิ ซึ่ง $G_{msat} = \frac{I_{DS}}{V_{GS}}$ $V_{DS} = \text{const}$ กราฟนี้แสดงในรูปที่ 4.9

จากกราฟในรูปที่ 4.9 มีลักษณะคล้ายกับกราฟในรูปที่ 4.7 โดยในช่วงแรกค่าทรานคอนดักแตนซ์มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นกราฟจะเริ่มลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก สาเหตุที่ได้กราฟเช่นนี้ อธิบายได้เช่นเดียวกับผลของกระแสครนกับอุณหภูมิ ในการทดลองทรานคอนดักแตนซ์ที่อุณหภูมิ 25°C , 50°C , 75°C , 100°C , 125°C และ 150°C เท่ากับ 128.30, 137.04, 141.30, 141.60, 136.68 และ 128.82 มิลลิโม่ และเมื่อคำนวณทรานคอนดักแตนซ์ จากสมการที่ (2.19) โดยใช้ค่าความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนจากกราฟในรูปที่ 4.8 พบว่า กราฟที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก ซึ่งค่าที่คำนวณได้ในช่วง 25°C - 150°C เท่ากับ 127.99, 137.04, 140.78, 141.55, 136.98 และ 129.83 มิลลิโม่ ตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



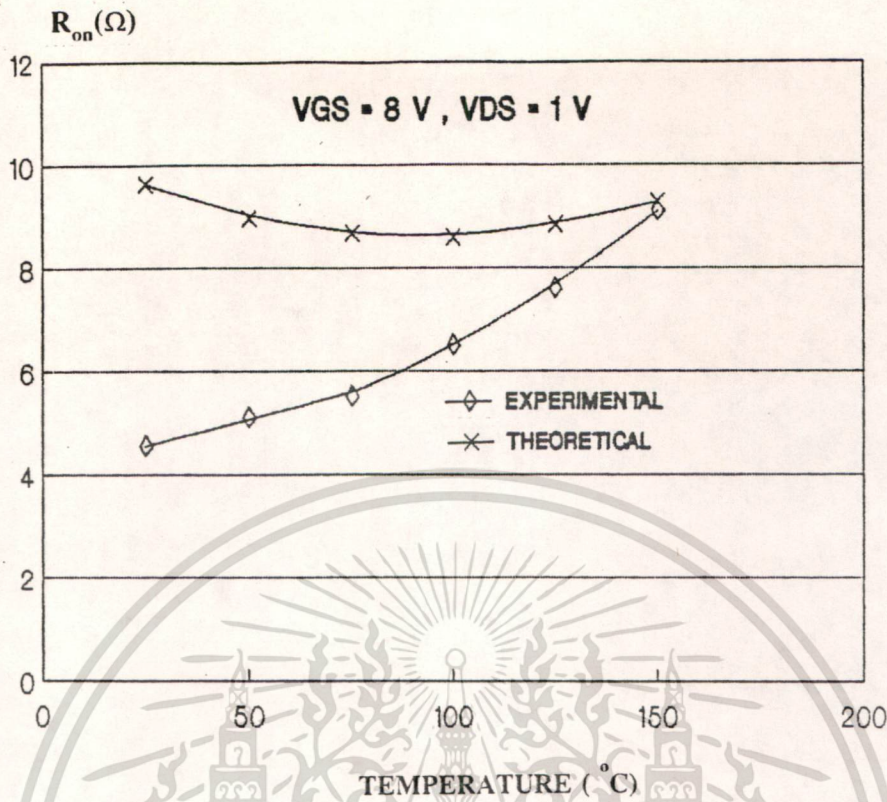
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทรานคอนดักแตนซ์กับอุณหภูมิ
 วัตที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 15$ โวลต์

4.2.4 ผลกระทบทางอุณหภูมิต่อความต้านทานในภาวนำกระแส

นำผลการทดลองที่วัดในหัวข้อ 4.2.2 มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในภาวนำกระแส (R_{on}) กับอุณหภูมิ โดยพิจารณาในช่วงเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส ได้ผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.10

จากการทดลอง มีแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าความต้านทานในภาวนำกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหรืออาจเรียกอย่างหนึ่งว่า ความต้านทานในภาวนำกระแสมีสัมประสิทธิ์เชิงบวกกับอุณหภูมิ ซึ่งจากการทดลองความต้านทานในภาวนำกระแสที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C, 75°C, 100°C, 125°C และ 150°C เท่ากับ 4.55, 5.10, 5.50, 6.50, 7.60 และ 9.09 โอห์ม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากสมการที่ (2.21) พบว่าลักษณะกราฟที่ได้จะเหมือนกับกราฟของกระแสเดรนกับอุณหภูมิ ซึ่งค่าที่คำนวณได้ในช่วง 25°C-150°C เท่ากับ 9.36, 8.95, 8.67, 8.58, 8.83 และ 9.27 โอห์ม สำหรับเหตุผลที่ทำให้ความต้านทานในภาวนำกระแสมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากประจุพาหะอิสระหลักของดีมอสคือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ช้าลง เพราะเกิดการชนกันขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านช่องทางเดินกระแส ซึ่งเสมือนกับว่ามีความต้านทานมากขึ้นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

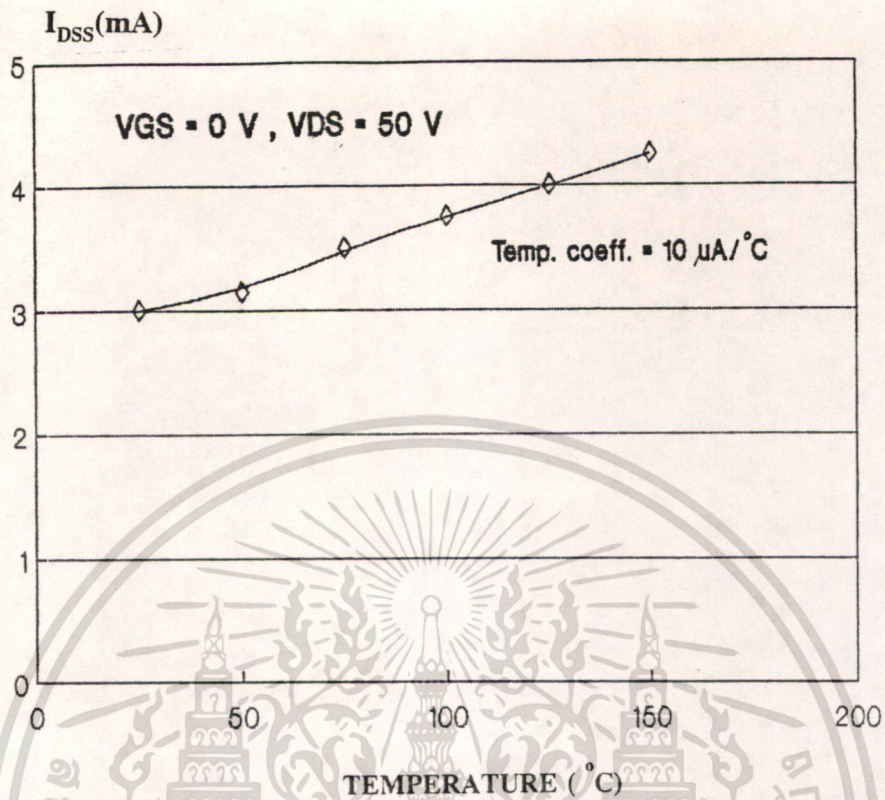


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในภาวะนำกระแสกับอุณหภูมิ
วัดที่ $V_{GS} = 8$ โวลต์ และ $V_{DS} = 1$ โวลต์

4.2.5 ผลกระทบทางอุณหภูมิต่อกระแสรั่วไหล

นำเอาดีมอสมาวัดหาค่ากระแสรั่วไหลเหมือนในหัวข้อ 4.1.3 แต่เพิ่มส่วนควบคุมอุณหภูมิให้แก่ดีมอสในช่วง $25 - 150^{\circ}\text{C}$ แล้วนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับอุณหภูมิซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11

จากการทดลอง พบว่ากระแสรั่วไหล (I_{DSS}) แปรโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เนื่องมาจาก การแตกตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลมีจำนวนมากขึ้น เมื่อดีมอสมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากกราฟรูปที่ 4.11 กระแสรั่วไหล วัดที่อุณหภูมิ 25°C , 50°C , 75°C , 100°C , 125°C และ 150°C เท่ากับ 3.0, 3.15, 3.5, 3.75, 4.0 และ 4.25 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในรูปของสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิจากกระแสรั่วไหลมีค่าเท่ากับ 10 ไมโครแอมป์/ $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลกับอุณหภูมิ วัดที่ $V_{GS} = 0$ โวลต์ และ $V_{DS} = 50$ โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและบทวิจารณ์

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสร้างมอสเฟตกำลังด้วยเทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์สามารถสร้างขึ้นได้และให้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ โดยเฉพาะการศึกษาถึงผลกระทบทางอุณหภูมิต่อพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของดีมอส สำหรับในรายงานการวิจัยนี้ ได้ออกแบบและสร้างดีมอสที่มีขนาดพื้นที่ของชิพขนาด 4 ตารางมิลลิเมตร ความยาวของช่องทางเดินกระแส 12 ไมครอน และความกว้างของช่องทางเดินกระแส 36,620 ไมครอน สามารถนำกระแสได้สูง 2.1 แอมป์ วัดที่ $V_{GS} = 16$ โวลต์ สำหรับการศึกษาลักษณะของอุณหภูมิของดีมอสที่สร้างขึ้นนี้ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้คือ

- ผลกระทบกับแรงดันขีดเริ่ม พบว่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น จากการทดลองแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเท่ากับ -6.0 มิลลิโวลต์/ $^{\circ}C$ และเมื่อเทียบกับการคำนวณจะมีค่าแตกต่างกันประมาณ 4% สาเหตุหลักที่ทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเชิงลบเนื่องจากผลของการแตกตัวคู่อิเล็กตรอน-โฮลของซิลิกอนบริสุทธิ์มากขึ้น และเมื่อนำผลนี้ไปคำนวณในสมการที่ (2.6) ซึ่งจะได้ค่าแรงดันขีดเริ่มลดลงในลักษณะเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ส่วนค่าคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณเกิดขึ้นจากการแทนค่าประจุไฟฟ้าที่ผิวซิลิกอนกับซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยค่าต่างๆ ไปไม่ได้ทำการทดลองวัด เพื่อหาค่าที่แท้จริง

- ผลกระทบกับกระแสเดรน พบว่าจากการทดลองกราฟคุณสมบัติกระแสเดรนกับอุณหภูมิสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกกระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิ $25-100^{\circ}C$ เนื่องจากแรงดันขีดเริ่มที่มีค่าลดลง จะทำให้กระแสเดรนมีค่าสูงขึ้นเป็นไปตามสมการที่ (2.14) และเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นอีก จะได้กราฟในส่วนที่สอง กระแสเดรนที่ได้จะมีค่าลดลง เนื่องจากอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นประจุพาหะอิสระส่วนมากของดีมอส ชนิดเอ็น-แชนแนล มีปริมาณมากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนที่พยายามข้ามช่องทางเดินเคลื่อนที่ไปไม่สะดวกเกิดการชนกันขึ้น ทำให้ความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง จากการทดลองได้หาค่าของให้ความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนจากกราฟคุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสที่อุณหภูมิระหว่าง $100-150^{\circ}C$ มีค่าลดลง 0.54 (เซนติเมตร) 2 /โวลต์-วินาที

- ผลกระทบกับทรานคอนดักแตนซ์ พบว่าจากการทดลองลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทรานคอนดักแตนซ์กับอุณหภูมิเหมือนกับกรณีของกระแสเดรน เนื่องจากกราฟของทรานคอนดักแตนซ์ที่ได้หาจากกราฟคุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส ดังนั้นผลการทดลองที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้

ในทำนองเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นสมบัติของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลกระทบกับความต้านทานในภาชนะนำกระแส พบว่าจากการทดลองความต้านทานในภาชนะนำกระแสจะมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงบวกกับอุณหภูมิ ต่างจากการคำนวณ ซึ่งจะได้กราฟเหมือนกับกรณีของกระแสตรง จากการทดลองความต้านทานในภาชนะนำกระแสมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิประมาณ 36 มิลลิโอห์ม/°C ผลนี้เกิดขึ้น เนื่องจากความคล่องตัวที่แท้จริงของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง ในขณะที่อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น

- ผลกระทบกับกระแสรั่วไหล พบว่ากระแสรั่วไหลจะมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น โดยจากการทดลองผลของกระแสรั่วไหลจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิประมาณ 10 ไมโครแอมป์/°C สำหรับสาเหตุที่ทำให้กระแสรั่วไหลมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของอิเล็กตรอน-โฮลมากขึ้น แต่ในกรณีนี้จะพิจารณาเป็นกระแสของประจุพาหะส่วนน้อยที่ไหลผ่านส่วนรอยต่อระหว่าง P-base กับ N-drift

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้ผู้ใช้งานเดิมจะต้องตระหนักถึงผลของอุณหภูมิต่อพารามิเตอร์ต่างเหล่านี้ด้วย เพื่อให้การใช้งานเดิมไม่ประสบกับปัญหาการทำงานที่ผิดพลาด หรืออาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวเดิมเอง จากข้อมูลทั้งหมดนี้ จะได้นำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ทั้งในแง่การประยุกต์ใช้งานและการออกแบบ สร้าง และพัฒนาเดิมต่อไปในอนาคต

5.2 ปัญหาและอุปสรรคของงานวิจัย

การดำเนินการวิจัย การออกแบบ สร้างและพัฒนาเดิม ประสบปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ มากมายพอสมควร นับตั้งแต่การจัดหาวัสดุวิจัยต่าง ๆ เช่น แผ่นผลึกซิลิกอน แผ่นโพสิเอสเตอร์ที่ใช้ทำต้นแบบ และตัวถังที่ใช้ในการเก็บบรรจุ เป็นต้น นอกจากนี้การขาดเครื่องมือพวก CVD (Chemical Vapour Deposition) ที่มีราคาแพงมาก ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขต้นแบบให้เหมาะสม และยังขาดแคลนเครื่องมือเก็บบรรจุ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง จึงต้องให้บริษัทเอกชนช่วยเหลือในการเก็บบรรจุอุปกรณ์กำลังในงานวิจัยนี้

เนื่องจากการวิจัยทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในประเทศไทยยังมีอยู่น้อยมาก ทำให้การจัดซื้อวัสดุวิจัยเป็นไปด้วยความยากลำบากพอสมควร โดยเฉพาะแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งปกติจะต้องบอกคุณสมบัติของแผ่นผลึกและตั้งโรงงานผลิตล่วงหน้า จะไม่มีการเก็บสินค้าไว้ในโรงงาน เพราะมีราคาแพง และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด จะใช้คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้ยังต้องสั่งซื้อเป็นจำนวนมากด้วย เพราะการปลูกผลึกและตัดผลึกออกเป็นแผ่นในแต่ละแห่งจะได้แผ่นผลึกเป็นจำนวนนับร้อยแผ่น ซึ่งผู้สั่งซื้อจะต้องซื้อทั้งหมดตามจำนวนที่ตัดได้ในแต่ละแห่งผลึก

วัสดุวิจัยอื่น ๆ เช่น โพสิเอสเตอร์สองชั้น คุณภาพดีที่ใช้ในการตัดทำต้นแบบของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และตัวถังแบบ TO-3 และ TO-5 ที่ใช้ในการเก็บบรรจุอุปกรณ์กำลังก็จำเป็นที่จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ทำให้เกิดความยุ่งยากและล่าช้าในการจัดซื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังก็มีปัญหาเช่นกัน เนื่องจากแต่เดิมทางศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทำการวิจัยกันเฉพาะอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบกำลังต่ำ ๆ เท่านั้น อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ จึงเหมาะสมและใช้ได้กับพวกอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบกำลังต่ำ ๆ แต่กรณีของมอสเฟตกำลังการเก็บบรรจุจะต้องลงตัวถึง TO-3 ซึ่งมีขนาดใหญ่ และต้องใช้สวคอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางราว 10 มิลล์ ในการต่อสายจากชิพมายังตัวถัง ในกรณีนี้ได้ขอความช่วยเหลือจากบริษัทงานทวิอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ในการเก็บบรรจุ ซึ่งก็ต้องขอขอบคุณเป็นอย่างมาก ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเป็นอย่างดี

นอกจากนี้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการสร้างต่าง ๆ ส่วนใหญ่เป็นแบบพื้นฐาน จึงต้องทำด้วยความระมัดระวังทุกขั้นตอน และต้องใช้นุ้คกลางที่มีความชำนาญเป็นพิเศษทำให้เกิดความล่าช้าหรือบางครั้งเกิดความเสียหายได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้งานวิจัยและพัฒนาทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องมีทิศทางเป้าหมายชัดเจน สมควรที่หน่วยงานที่รับผิดชอบน่าจะระดมความคิดเห็นจากผู้ที่เกี่ยวข้อง แล้วจัดเป็นแผนดำเนินการต่อไป โดยอาจจัดตั้งศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ หรือสนับสนุนห้องวิจัยในสถาบันการศึกษาที่มีความพร้อมในการวิจัย ทำให้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ สามารถแก้ไขลงได้ตามลำดับ และงานวิจัยทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ก็จะก้าวต่อไปได้อย่างมั่นคง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณธวัชชัย วรชิววัน จากบริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด และคุณพรพิทักษ์ โภธิเวชกุล จากบริษัทงานทวิ จำกัด ผู้ให้ความช่วยเหลือในการตัดชิพ และเก็บบรรจุลงตัวถัง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลและจัดพิมพ์ต้นฉบับ จนกระทั่งรายงานการวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ช่วยอุดหนุนทุนวิจัยจนโครงการวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี



คณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Krishna Shinai, Charles S. Korman, B.J. Baliga and P.A. Piacente, "A 50-V, 0.7-m Ω .cm², 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. Richard S.Muller and Theodore I. Kamins, **Device Electronics for Integrated Circuits**, John Wiley & Sons Ltd., 1986, p. 424-435
9. Oliver J. Mccarthy, **MOS Device and Circuit Design**, John Wiley & Sons Ltd., 1982, p 1-12
10. Fritz H. Gaensslen, V. Leo Rideout, E. J. Walker, John J. Walker, **Very Small MOSFET's for Low Temperature Operation**, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-24, No. 3, March 1977, p. 218-229
11. William N. Carr, Jack P. Mize, **MOS/LSI Design and Application**, McGRAW-Hill Book Company, 1972, p. 5-6
12. พอล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง และสมเกียรติ สุภเดช, "การวัดความคล่องตัวของพาหะที่แท้จริงในมอสเฟตกำลังแบบดีมอส", การประชุมทางวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, พ.ศ. 2536, หน้า 946-947

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.60×10^{-19}	คูลอมบ์
ค่าคงที่ของ โบสมัน	k	1.38×10^{23}	จูล/เคลวิน
ค่าคงที่ของ แพลงค์	h	6.63×10^{-34}	จูล-วินาที
ค่าเพอร์มิตติวิตีของสูญญากาศ	ϵ_0	8.85×10^{-14}	ฟารัด/เซนติเมตร
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	ϵ_S	11.7	ฟารัด/เซนติเมตร
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์	ϵ_{ox}	3.97	ฟารัด/เซนติเมตร
ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัส ระหว่าง SiO ₂ กับ -ระนาบ (100)	Q _{SS}	1.4×10^{-8}	คูลอมบ์/ตารางเซนติเมตร
-ระนาบ (111)	Q _{SS}	8.0×10^{-8}	คูลอมบ์/ตารางเซนติเมตร
แรงดันเนื่องจากความร้อน (ที่อุณหภูมิห้อง, 300K)	kT/q	0.0259	มิลลิโวลต์

2. คุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์

น้ำหนักอะตอม	60.08	
ความหนาแน่นอะตอม	2.3×10^{22}	(ลูกบาศก์เซนติเมตร) ⁻¹
ความต้านทาน(ที่ 300K)	$>10^{16}$	โอห์ม-เซนติเมตร
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(ϵ_{e-ox})	3.9	
จุดหลอมเหลว	1700	เซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ	1.0	จูล/กรัม-เซลเซียส
การนำความร้อน	0.014	วัตต์/เซนติเมตร-เซลเซียส
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	0.5×10^{-6}	(เซลเซียส) ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คุณสมบัติของซิลิกอน

เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	
ความหนาแน่นอะตอม	2.96×10^{22}	(เซนติเมตร) ⁻³
ความหนาแน่น	2.328	กรัม/(เซนติเมตร) ³
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	อิเล็กตรอนโวลต์
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิจากพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3×10^{-4}	อิเล็กตรอนโวลต์/เซลเซียส
จุดหลอมเหลว	1417	°C
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว - ระบาย(100)	580	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
- ระบาย(111)	190	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร - ระบาย(100)	1260	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
- ระบาย(111)	1350	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิว - ระบาย(100)	230	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
- ระบาย(111)	-	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสาร - ระบาย(100)	400	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
- ระบาย(111)	480	(เซนติเมตร) ² /โวลต์-วินาที
ดัชนีหักเห	3,420	
การนำความร้อน	1.57	W/cm_o_
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	(เซลเซียส) ⁻¹
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	อังสตรอม
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	(เซนติเมตร) ² /ไคน์
ฟังก์ชันงานของโฟโตอิมิตอน	5.05	อิเล็กตรอนโวลต์
ความแข็ง	7.0	MOHscale
ความร้อนในการละลาย	1000	จูล/กรัม
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิกอนบริสุทธิ์	1.45×10^{10}	(เซนติเมตร) ⁻³
ความดันไอ	2.8×10^{-4}	มิลลิเมตร-ปรอท
โครงสร้างผลึก	$f_{cc,diamond}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

1. การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

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

$$\rho = \rho_s \cdot x_j \quad \text{.....(i)}$$

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

x_j คือ ความลึกของรอยต่อ (cm)

หลังจากนั้นจะนำค่าพิกัดความต้านทานที่ได้ไปหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือได้จากสมการ

$$N = 1/q \mu \rho \quad \text{.....(ii)}$$

เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน (C)

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

2. การหาความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้วยวิธีการ grooving

สำหรับวิธีการ grooving เป็นวิธีการหาความลึกของรอยต่อ โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า grooving machine เป็นวิธีการใช้วงล้อ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง (D)= 4 cm. ขุดลงไปบนผิวหน้าของแผ่นผลึกประมาณ 75-100 รอบ จะทำให้เกิดหลุมวงรี และเมื่อล้างให้สะอาดแล้วนำไปย้อมสี (strain etching) ในสารละลายของกรดกัดแก้ว(HF) กับกรดไนตริก(HNO_3) (ด้วยอัตราส่วน $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 500:1$) ส่วนที่เป็นชั้นพีเมื่อย้อมสีแล้วจะมีสีเข้มขึ้น ส่วนชั้นเอ็นจะมีสีจางกว่า แสดงในรูปที่ ข2 เมื่อวัดระยะ X และ Y ได้แล้ว จึงนำมาคำนวณหาความลึกของรอยต่อได้จากสมการ

$$x_j = XY/D \quad \text{.....(iii)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

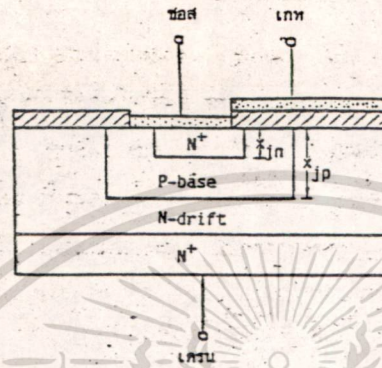
ตัวอย่างการคำนวณหาความลึกของรอยต่อ จากในรูปที่ ข2 จะได้

1. ความลึกของรอยต่อของชั้น P-base

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

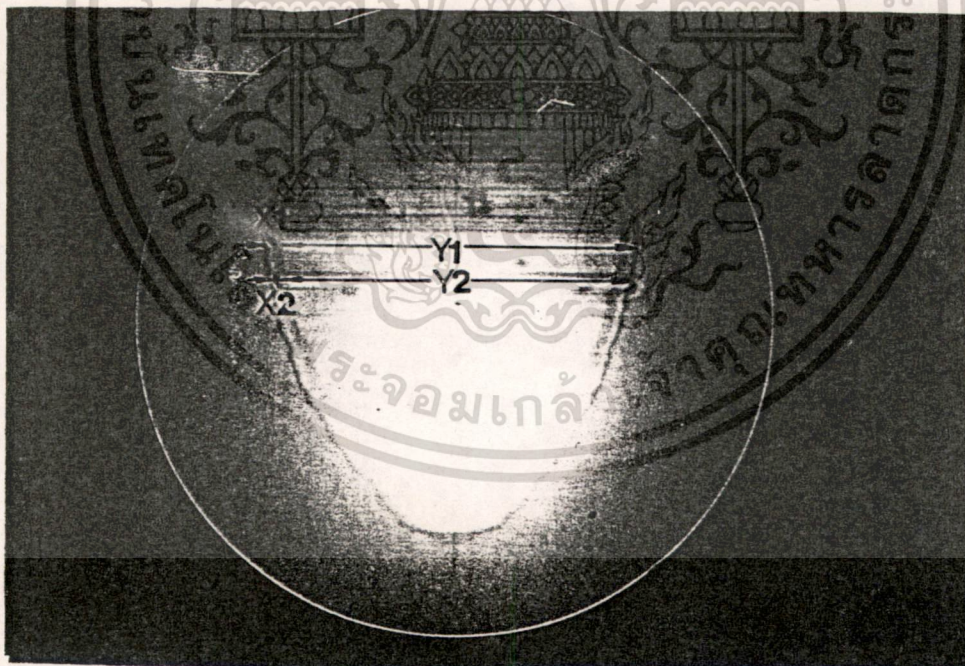
2. ความลึกของรอยต่อของชั้น N⁺-source

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



รูปที่ ข1 ลักษณะโครงสร้างของรอยต่อทั้งสอง เมื่อ

- X_{jp} คือ ความลึกของรอยต่อของชั้น P-base
- X_{jn} คือ ความลึกของรอยต่อของชั้น N⁺-source



รูปที่ ข2 รอยขีดของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ได้จากเครื่อง grooving machine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้