



ปีการศึกษา 2532

การควบคุมแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของมอสเฟตกำลังชนิดดีเอ็มอส
CONTROLLING OF THRESHOLD VOLTAGE IN DMOS

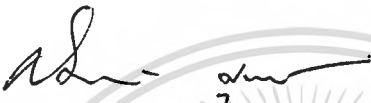


ปริญญาโทปีการศึกษา 2532

เรื่อง การควบคุมแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของมอสเฟตกำลังชนิดดีมอส

ผู้จัดทำ

นาย วิชัย เทวนิบาลพันธุ์


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช)



	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทำงานของดีมอส	2
2.1 การทำงานของดีมอส	2
2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส	5
2.2.1 คุณสมบัติทางด้านไฟตรง	5
2.2.2 คุณสมบัติทางด้านไฟสลับ	7
2.3 ลักษณะแฝงในดีมอส	8
2.3.1 ไดโอดแฝง	8
2.3.2 ทราานซิสเตอร์แฝง	8
2.4 แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน	9
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังชนิดดีมอส	12
3.1 กวรวอกแบบ	12
3.2 กระบวนการสร้าง	13
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	25
4.1 คุณสมบัติของ I-V curve	25
4.2 คุณสมบัติของ \sqrt{I} -V curve	28
4.3 ค่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจากการคำนวณ	30
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	33
ภาคผนวก ก. แสดงค่าคงที่ต่างๆ	34
ภาคผนวก ข. การหาความลึกของรอยต่อและความหนาแน่น ของอะตอมสารเจือ	36
ภาคผนวก ค. กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ และการแพร่สารเจือ	39
กิตติกรรมประกาศ	42
หนังสืออ้างอิง	43

การควบคุมแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของมอสเฟตกำลังชนิดติมอส
CONTROLLING OF THRESHOLD VOLTAGE IN DMOS

นายวิชัย เทวินภิบาลพันธุ์ 291197

อาจารย์ที่ปรึกษา :

รศ.ดร.สมเกียรติ ผูกเดช

บทคัดย่อ

มอสเฟตกำลังชนิดติมอสเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างผลระหว่างมอสเฟตและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ด้วยลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ ทำให้ติมอสมีคุณสมบัติหลายประการที่ดีกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ พารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งของติมอสก็คือ แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) เช่นเดียวกับมอสเฟตทั่วไป การควบคุมแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนสามารถทำได้หลายวิธี เช่นโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นเกตออกไซด์ และ โดยการควบคุมความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้กล่าวถึงการศึกษาและผลการทดลอง การควบคุมค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของติมอสโดยการควบคุมความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วนพี-เบสของชั้นสารกึ่งตัวนำ ผลการทดลองพบว่าสามารถควบคุมค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนได้เป็นอย่างดี โดยการควบคุมอะตอมสารเจือในส่วนพี-เบสให้มีค่าระหว่าง 5.1×10^{16} ถึง 3.7×10^{17} ซม.⁻³ จะได้ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนระหว่าง 2.4 ถึง 8.0 โวลต์ โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 10 %

บทที่ 1

บทนำ

ก่อนหน้าที่จะมีการพัฒนามอเตอร์กำลังนั้น อุปกรณ์ประเภทกำลังที่มีความเร็วสูงก็เห็นจะมีแค่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เท่านั้น ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ประเภทกำลังตัวแรกได้เกิดขึ้นเมื่อประมาณช่วงปี 1950 จากเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทำให้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ประเภทกำลังสามารถทนกระแสได้ถึงหลายร้อยแอมแปร์และทนต่อแรงดันได้สูงถึงประมาณ 600 โวลต์ จะเห็นได้ว่าความสามารถทนต่อกระแสและแรงดันมีค่าสูงมากทีเดียว แต่ในการนำไปใช้งานจะพบว่ามีจุดค้อยที่สำคัญอยู่ก็คือ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยกระแสในการควบคุมการทำงาน กระแสในการไบอัสไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เพื่อให้ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้และมีความเร็วสูงพอสมควร ปกติจะมีค่าประมาณ 10 - 20 % ของกระแสคอลเลคเตอร์ จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้กระแสไบอัสค่าสูงทีเดียว ทำให้สิ้นเปลืองในส่วนของวงจรถูกไบอัส นอกจากนั้นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ยังสามารถเกิดปัญหา secondary breakdown และ thermal runaway ได้อีกด้วย จากสาเหตุต่างๆ เหล่านี้จึงได้มีการพัฒนามอเตอร์กำลังขึ้น มอเตอร์กำลังนี้สามารถแก้ไขข้อจำกัดในการใช้งานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดี กล่าวคือ มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงดันในการควบคุมการทำงาน จะไม่มีกระแสไบอัสใดๆไหล ทั้งในสภาวะ ON และ OFF นอกจากต้องการกระแสเพียงเล็กน้อยในการชาร์จและดิสชาร์จเกตคาปาซิเตอร์เท่านั้น นอกจากนี้แล้วมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยพาหะส่วนมากในการทำให้เกิดการไหลของกระแสเท่านั้น ไม่เหมือนในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีทั้งกระแสพาหะส่วนมากและส่วนน้อย ต้องเสียเวลาส่วนหนึ่งในการรวมตัวของประจุพาหะ ทำให้อุปกรณ์จำพวกมอเตอร์มีความเร็วในการสวิตช์สูงกว่า ส่วนในเรื่องของ thermal runaway นั้นปัญหานี้ไม่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เลย เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานภายในมีค่าสูงขึ้นตาม เป็นการจำกัดกระแสให้ไหลได้น้อยลง

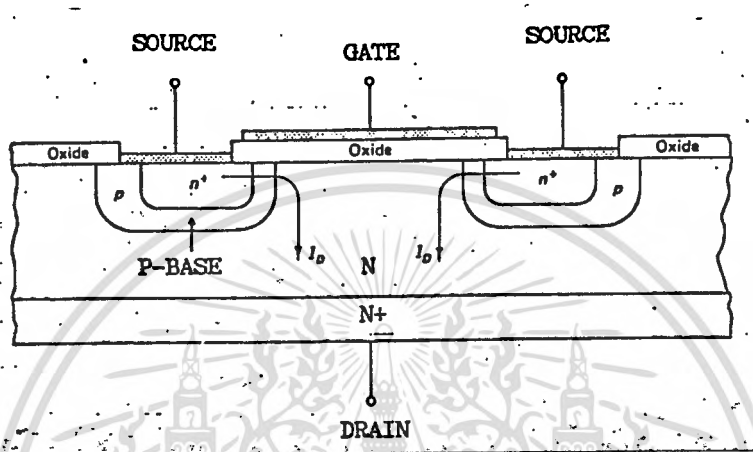
จากคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ ทำให้มอเตอร์กำลังได้รับการพัฒนาและความนิยมในการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ มอเตอร์กำลังที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นมอเตอร์กำลังชนิดคิมอส เป็นมอเตอร์ที่ผสมผสานกันระหว่างเทคโนโลยีของมอเตอร์และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ มีการแพร่หลาย 2 ครั้ง เหมือนกับไบโพลาร์ โดยจะทำการศึกษาและทดลองการควบคุมแรงดันขั้วเริ่มเปลี่ยนโดยวิธีการควบคุม ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วนพี-เบส

บทที่ 2

ทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์

2.1 การทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น เป็นทรานซิสเตอร์แบบเอ็นแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด โครงสร้างของทรานซิสเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์

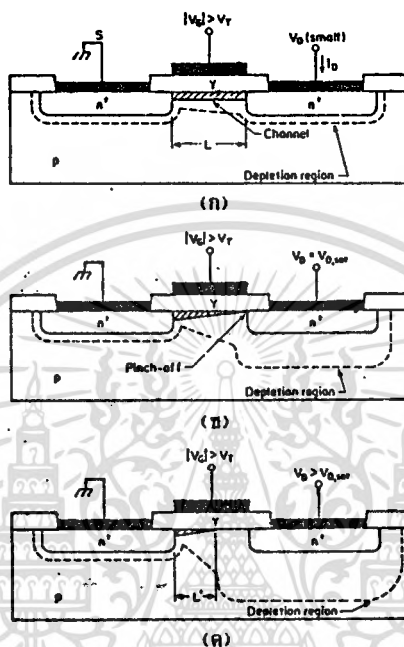
จะเห็นได้ว่า ทรานซิสเตอร์เป็นโมสเฟตที่ต้องการมีการแพร่สารเจือ 2 ครั้ง -คือครั้งแรกในส่วนของพี-เบส และอีกครั้งในส่วนที่เป็นซอส ผลต่างระหว่างบริเวณที่เป็นพี-เบสและซอสก็คือ แชนแนลนั่นเอง ส่วนขาเกตจะอยู่ทางด้านล่าง และเกตอยู่ทางด้านบนเหนือส่วนที่เป็นพี-เบสและซอส กระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์จะไหลทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ต่างจากโมสเฟตแบบธรรมดาที่มีกระแสไหลเฉพาะในแนวนอนเท่านั้น

เมื่อต้องการให้กระแสไหลจากเกตไปยังซอส จะต้องทำให้เกิดช่องว่างของกระแสเสียก่อน โดยการป้อนแรงดันบวกเข้าที่เกต แรงดันที่ป้อนเข้าไปนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในส่วนของออกไซด์ สนามไฟฟ้านี้จะดึงดูดอิเล็กตรอนมายังบริเวณผิวหน้าของพี-เบส กลายเป็นแชนแนลขึ้น เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ขาเกตก็จะทำให้เกิดกระแสไหลจากเกตไปยังซอสได้โดยผ่านทางแชนแนล แรงดันที่ป้อนเข้าไปที่เกตเพื่อทำให้เกิดแชนแนลขึ้นนี้ เรียกว่า แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดภายหลังต่อไป

การทำงานของทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการทำงานของโมสเฟตโดยทั่วไป ซึ่งจะแสดงดังต่อไปนี้

โมสเฟตแบบเอ็นแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ในภาวะการทำงานต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 โดยมีแชนแนลหรือชั้นกลับ (Inversion layer) เกิดขึ้นเนื่องจากการไบอัส ดังในรูปที่ 2 ก-ค. แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) คือแรงดันไฟฟ้าส่วนเกตที่

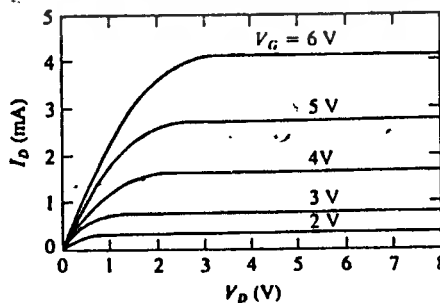
พอทำให้เกิดแชนแนลขึ้นระหว่างซอสและเดรน ถ้าแรงดันที่ป้อนให้แก่เกต (V_g) มีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (V_T) แล้ว จะทำให้เริ่มเกิดแชนแนลขึ้นจากซอสไปเดรน ถ้าแรงดันไฟฟ้า V_g น้อยกว่า V_T แล้วจะไม่เกิดแชนแนลขึ้น แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้า V_g สูงกว่า V_T แล้วก็จะเกิดแชนแนลขึ้นได้เช่นกัน



รูปที่ 2 แสดงมอสเฟตเมื่อได้รับ โวลต์ต่าง ๆ กัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของมอสเฟตแบบเอ็นแชนแนล เอ็นเอ็นเอเอ็มที โหมด จะเป็นดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

เมื่อ $V_d < V_g - V_T$ แล้ว มอสเฟตจะทำงานอยู่ในช่วงเชิงเส้น ในช่วงนี้กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นตามค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เดรนตามสมการต่อไปนี้

$$I_d = (W \div L) \mu_n C_{ox} ((V_g - V_T) V_d - V_d^2 \div 2)$$

เมื่อ I_d คือ กระแสเดรน

V_d คือ แรงดันไฟฟ้าที่เดรน

V_g คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกต

V_T คือ แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน

W คือ ความกว้างของแชนแนล

L คือ ความยาวของแชนแนล

μ_n คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน

C_{ox} คือ ความจุไฟฟ้าที่ส่วนเกต

เมื่อ $V_d > V_g - V_T$ แล้ว มอสเฟตจะทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว ในช่วงนี้จะทำให้เกิดการไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อระหว่างส่วนเดรนกับฐานรอง เป็นผลให้แชนแนลที่ใกล้กับส่วนเดรนแคบลงจนขนาดตอนที่เรียกว่า pinched off ในช่วงนี้กระแสจะมีค่าคงที่ไม่แปรผันตามแรงดันที่เดรน

ให้ V_{dsat} และ I_{dsat} คือ แรงดันเดรนและกระแสเดรนในช่วงพินช์ออฟ

$$\begin{aligned} V_{dsat} &= V_g - V_T \\ I_{dsat} &= (W \div L) \mu_n C_{ox} (V_g - V_T)^2 \div 2 \end{aligned}$$

2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส

คุณสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. คุณสมบัติทางด้านไฟตรง (Static characteristic) ได้แก่ตัวแปรทาง DC เช่น ค่าแรงดันพังทลาย , กระแสรั่วไหล , ความต้านทานภายใน
2. คุณสมบัติทางด้านไฟสลับ (Dynamic characteristic) ได้แก่ตัวแปรทาง AC เช่นค่าความจุไฟฟ้าภายใน , ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์

2.2.1 คุณสมบัติทางด้านไฟตรง (Static characteristic)

1) ค่าแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) หมายถึงแรงดันสูงสุดที่ดีมอสสามารถทนได้โดยไม่เกิดความเสียหาย แรงดันพังทลายชนิดต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นแยกได้เป็น

การพังทลายแบบอะวอลันซ์ (avalanch breakdown) เกิดขึ้นจากการที่สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงซึ่งจนทำให้ที่ประจุพาหะมีพลังงานเพิ่มขึ้นและเกิดการชนกับอิเล็กตรอนในโครงร่างผลึกของซิลิกอนทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก อิเล็กตรอนนั้นก็จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าชนกับอิเล็กตรอนอื่นต่อเนื่องกันเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ จนไม่สามารถควบคุมได้ การพังแบบอะวอลันซ์นี้โดยปกติจะเกิดขึ้นจากรอยต่อ ไดร์บริวีร์สไบอัสค่าสูงๆ หรืออุณหภูมิจากรอยต่อมีค่าสูง

การพังแบบซีเนอร์ (zener breakdown) เกิดขึ้นจากการที่รอยต่อที่บริเวมพลอตพาหะมีความแคบมากๆ เมื่อได้รับแรงดันค่าหนึ่งที่ทำให้ประจุพาหะมีพลังงานสูงพอที่จะทะลุผ่านกำแพงศักย์ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับจำนวนมาก ไหลผ่านรอยต่อ

การพังแบบเพนซ์ทรู (punch through breakdown) เกิดขึ้นจากการขยายตัวของบริเวมพลอตพาหะอื่นเนื่องมาจากรีเวิร์สไบอัส จากในส่วนของพี-เบสไปจนถึงซอส เสมือนว่าเกิดการลัดวงจรระหว่างรอยต่อ

2) กระแสรั่วไหล (leakage current) ในดีมอสมีกระแสรั่วไหลอยู่ 2 อย่าง คือ

กระแสรั่วไหลที่เกต (gate leakage current) เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างไม่สะอาด หรือความไม่สมบูรณ์ของเนื้อซิลิกอนไดออกไซด์ ทำให้มีอ็อกซิเจนปนเปื้อนอยู่ในซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริก เป็นเสมือนสะพานอ็อกซิเจนที่ทำให้กระแสสามารถไหลจากเกตมายังซอสและเดรนได้

กระแสรั่วไหลที่เดรน (zero bias drain current) เกิดขึ้นจากความไม่สะอาดในกระบวนการสร้างออกไซด์ที่เกตคือที่เกตออกไซด์มีอ็อกซิเจนปนเปื้อนอยู่เมื่อนำแผ่นเวเฟอร์ผ่านกระบวนการสร้างที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้อ็อกซิเจนเหล่านั้นแพร่ลงไปใน

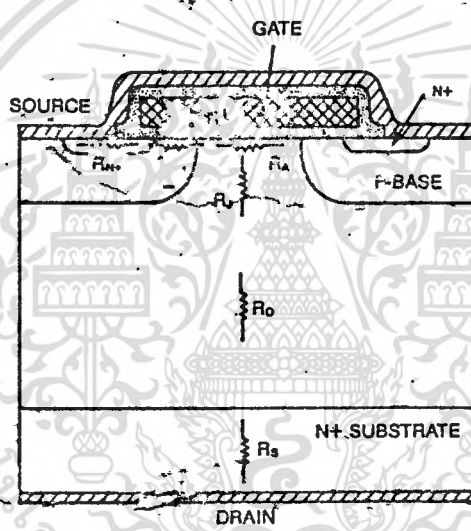
เนื้อซิลิกอนได้

ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นอุณหภูมิยังมีผลต่อกระแสรั่วไหลด้วย กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูงขึ้นจะทำให้แรงดันเข็ดเริ่มเปลี่ยนของมอสเฟตทุกชนิดมีค่าลดลงประมาณ $5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ทำให้กระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้ว่ากระแสรั่วที่เดรนมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

3) ความต้านทานภายใน (ON resistance) เกิดจากความต้านทานต่างๆทั้งหมดจากซอสไปยังเดรน ในสถานะ ON แรกสุดคือความต้านทานที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเนื้อสาร (R_{contact}) เมื่อผ่านเข้ามาในส่วนของซอสจะมีความต้านทานในเนื้อสาร ($R_{\text{N}+}$) ความต้านทานของแชนแนล (R_{channel}) และความต้านทานของแอคตีวูเลชัน (R_{a}) เกิดขึ้นจากความสามารถในการนำไฟฟ้าของบริเวณนี้กลับที่ถูกสร้างขึ้นโดยแรงดันไบอัสที่เกต และสุดท้ายคือความต้านทานในเนื้อสารที่เป็นส่วนเดรน (R_{d} และ R_{s})



รูปที่ 4 แสดงความต้านทานภายในโครงสร้างของดีมอส

$$R_{\text{ON}} = R_{\text{contact}} + R_{\text{N}+} + R_{\text{channel}} + R_{\text{a}} + R_{\text{d}} + R_{\text{s}}$$

ส่วนที่มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของดีมอสก็คือ ความต้านทานของแชนแนล (R_{channel}) และความต้านทานของแอคตีวูเลชัน (R_{a}) ความต้านทานของแชนแนลจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสที่เกตตามสมการ

$$R_{\text{channel}} = (L/W) \times 1/(\mu_{\text{ns}} C_{\text{ox}} (V_{\text{g}} - V_{\text{T}}))$$

เมื่อ μ_{ns} คือ ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว

ถ้าต้องการให้ความต้านทานในส่วนแอคตีวูเลชันต่ำๆทำได้โดยเพิ่มแรงดันไบอัสให้มากขึ้น ส่วนค่าความต้านทานในแอคตีวูเลชันจะมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันพิกหลายตามสมการต่อไปนี้คือ

$$R_{\text{d}} = K \times BV^n$$

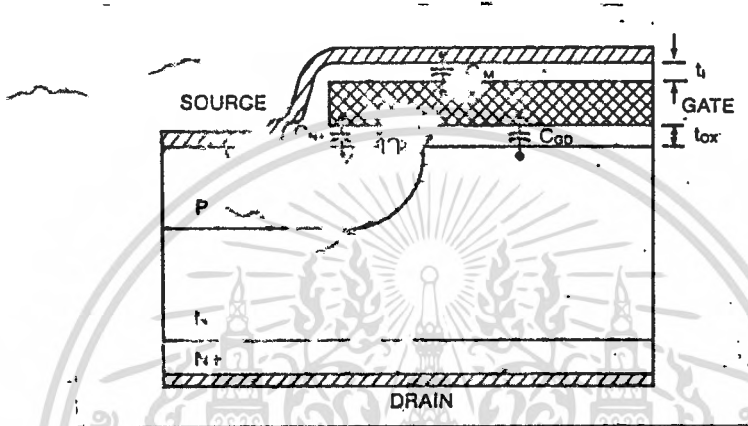
เมื่อ K คือค่าคงที่ และ n มีค่าอยู่ระหว่าง 2.2 - 2.7 ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้าง

จะเห็นว่าถ้าต้องการให้แรงดันพิกหลายมีค่าสูงสามารถทำได้โดยเพิ่มค่าความต้านทานแอคตีวูเลชันให้สูงขึ้น ซึ่งทำได้โดยเพิ่มค่าความต้านทานแอคตีวูเลชันโดยการทำให้ความหนาแน่นของแอคตีวูเลชันสูงขึ้น หรือเพิ่มค่าความหนาแน่นของแอคตีวูเลชันโดยการทำให้ความหนาแน่นของแอคตีวูเลชันสูงขึ้น หรือเพิ่มค่าความหนาแน่นของแอคตีวูเลชันโดยการทำให้ความหนาแน่นของแอคตีวูเลชันสูงขึ้น

ทานของชั้นอินทิ แต่ว่าการเพิ่มค่าความต้านทานชั้นอินทิั้นจะทำให้ R_{ON} มีค่าสูงขึ้น ทำให้ความสามารถทางกระแสมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น จะทำให้ R_{ON} มีค่าสูงขึ้นด้วย

2.2.2 คุณสมบัติทางด้านไฟสลัป (Dynamic characteristic)

1) ความจุไฟฟ้าภายใน (parasitic capacitance) มีตัวเก็บประจุแฝงอยู่มากมายภายในดีมอส ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงความจุไฟฟ้าที่แฝงอยู่ในดีมอส

ค่าประจุทั้งหมดทางอินพุตที่มองจากเกตไปยังซอร์ส (C_{gs}) จะประกอบไปด้วย

1. ค่าประจุระหว่างส่วนที่ซ้อนกันอยู่คือ N^+ ในซอร์สและเกต (C_{N^+})
2. ค่าประจุระหว่างส่วนที่ซ้อนกันอยู่คือพี-เบส และเกต (C_p)
3. ค่าประจุระหว่างขั้วโลหะของซอร์สและเกต (C_m)

$$C_{gs} = C_{N^+} + C_p + C_m$$

ส่วน C_{gd} คือค่าประจุระหว่างเกตและ N^+ ในส่วนของเดรน

2) ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (transconductance) นิยามของทรานส์คอนดักแตนซ์คืออัตราส่วนระหว่างส่วนที่เปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนต่อส่วนที่เปลี่ยนแปลงของแรงดันไบอัส บอกได้ทราบถึงความสามารถในการขยายกระแสตัวเอง เขียนเป็นสมการได้คือ

$$g_m = d I_{ds} \div d V_{gs}$$

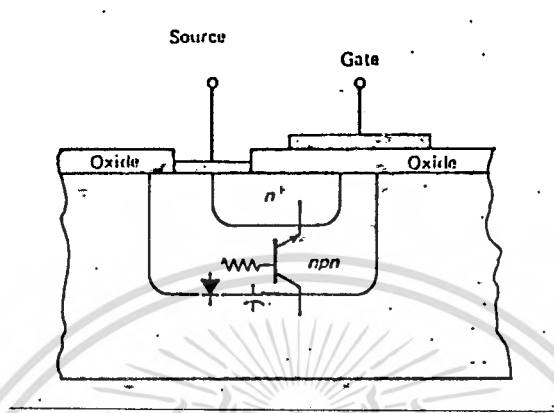
ความสัมพันธ์ระหว่าง g_m และตัวแปรอื่นๆจะมีสมการดังนี้

$$g_m = (W \div L) \times \mu_n C_{ox} (V_g - V_T)$$

ในดีมอสความยาวของแชนแนล(L) จะมีขนาดเล็กกว่ามอสเฟททั่วไปมาก จึงมีค่าทรานส์คอนดักแตนซ์สูงกว่า การเพิ่มค่าทรานส์คอนดักแตนซ์สามารถทำได้โดยลดความหนาของซี้ออกไซด์ที่เกตซึ่งจะทำให้ความจุไฟฟ้าที่เกตมีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ยังมีผลต่อแรงดันพิกทลายที่ เดรน-เกตด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆจึงต้องเลือกอย่างเหมาะสม

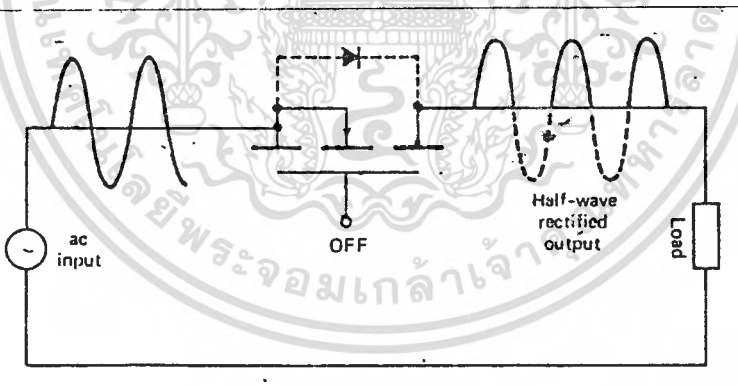
2.3 ลักษณะแผงในดีมอส

นอกจากตัวเก็บประจุแผงที่อยู่ใบบริเวณรอยต่อต่างๆแล้ว ยังมีลักษณะแผงอื่นๆอีกในดีมอสดังในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงลักษณะแผงในดีมอส

2.3.1 ไดโอดแผง เกิดจากรอยต่อของพี-เนสกับชั้นอินทิ ไดโอดแผงนี้บางครั้งทำให้เกิดปัญหาที่คือมันจะแสดงคุณสมบัติของการเร็คติไฟयर เมื่อเรานำดีมอสไปใช้งานในลักษณะของอนาลอกสวิทซ์ ทำให้ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติของสวิตซ์อย่างแท้จริง (ดูในรูปที่ 7)



รูปที่ 7 แสดงผลกระทบบของไดโอดแผง

แต่บางครั้งในวงจรสวิทซ์บางวงจรที่มีกระแสไหลย้อนกลับผ่านตัวอุปกรณ์ เช่น วงจร DC to AC inverter หรือ power supply แบบสวิทซ์ ตัวทรานซิสเตอร์ที่เป็นแบบไบโพลาร์ จะต้องใช้ไดโอดต่อคร่อมเพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับ ถ้าใช้ดีมอสแทนที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จะทำให้ไม่ต้องสิ้นเปลืองไดโอดภายนอกที่มาต่อเพิ่ม

2.3.2 ทรานซิสเตอร์แผง เกิดจากรอยต่อของส่วนซอส-พีเบส และ พีเบส-เดรน ทำให้เกิดเป็นรอยต่อของ N-P-N ชั้น เกิดเป็นทรานซิสเตอร์แบบNPNชั้น ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหานี้ ในดีมอสจะทำการช็อตซอสเข้ากับพี-เบส



2.4 แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage)

แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน คือ แรงดันที่ทำให้ไบอัสเกตเกิดเพื่อที่จะทำให้เกิดชั้นแผลชั้นพอดค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ บอกให้ทราบถึงค่าแรงดันไบอัสอย่างน้อยที่สุดที่มอสเฟตต้องการเพื่อให้มันสามารถทำงาน ปกติค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนนี้ไม่ควรจะสูงหรือต่ำเกินไป ถ้าหากสูงจนเกินไปจะทำให้แรงดันไบอัสต้องมีค่าสูง แต่ถ้าต่ำเกินไปจะทำให้ประจุที่อาจจะตกค้างอยู่ที่เกตสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นแผลชั้นได้โดยไม่ต้องมีการไบอัส และนอกจากนั้นเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามา อาจทำให้การทำงานของดีมอสผิดพลาดได้

การหาแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของดีมอส

เมื่อให้ Q_{ns} คือ ความหนาแน่นของประจุต่อพื้นที่ 1 หน่วย ที่ผิวเกต

Q_{ss} คือ ความหนาแน่นของประจุต่อพื้นที่ 1 หน่วย ที่ผิวสัมผัสระหว่าง Si และ SiO_2

Q_n คือ ความหนาแน่นของประจุต่อพื้นที่ 1 หน่วย ที่ผิวของชั้นกลับ

Q_{sd} คือ ความหนาแน่นของประจุต่อพื้นที่ 1 หน่วย ที่ผิวของบริเวณปลดพาหะ

เมื่อพลังงานศักย์ที่ผิว (surface potential : ψ_s) มีค่าเป็น 2 เท่าของพลังงานเฟอร์มี (Fermi potential : ψ_f) จะทำให้ประจุทั้งหมดอาศัยอยู่ในบริเวณปลดพาหะ ประจุจะถูกดึงดูดมายังผิวหน้าของ Si ตามแรงดันไบอัสเกต ซึ่งจะกลายเป็นชั้นกลับชั้นจะได้เงื่อนไขต่างๆ คือ

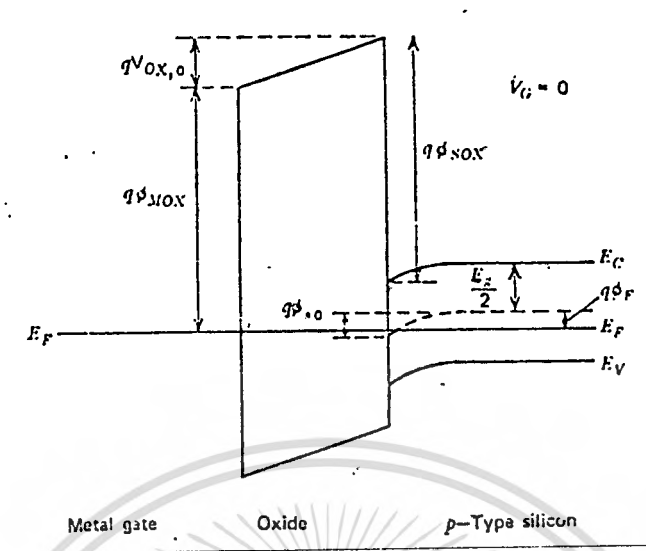
$$\psi_s = 2\psi_f \tag{1}$$

$$Q_n = 0 \tag{2}$$

$$Q_{ns} + Q_{ss} + Q_{sdmax} = 0 \tag{3}$$

แรงดันที่ตกคร่อมผิวออกไซด์ (V_{ox}) จะไม่เท่ากับ แรงดันไบอัสที่เกต (V_g) เนื่องจากผลต่างของระดับพลังงานระหว่างโลหะ- SiO_2 และ SiO_2 -Si นอกจากนี้ยังเกิดจากผลของแถบพลังงานที่ผิวหน้าของ Si เกิดการโค้งงอ Q_{ns} สามารถหาได้จากรูปที่ 8

026988



รูปที่ 8 แสดงแถบพลังงานในโครงสร้างเมื่อแรงดันไบอัสเกตเท่ากับศูนย์ กำหนดให้ σ_{mox} คือ ระดับพลังงานระหว่าง โลหะ และ SiO_2

σ_{siox} คือ ระดับพลังงานระหว่าง Si และ SiO_2

$V_{ox,0}$ คือ แรงดันที่ตกคร่อมผิวออกไซด์เมื่อแรงดันไบอัสเกตเป็นศูนย์

σ_{s0} คือ พลังงานศักย์ที่ผิวเมื่อแรงดันไบอัสเกตเป็นศูนย์

E_g คือ ความกว้างของระดับพลังงาน ในแถบต้องห้ามของ Si

σ_{ms} คือ ผลต่างของ work function ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ระดับพลังงานเฟอร์มีจะมีค่าคงที่ ดังนั้นผลรวมของพลังงานของทั้ง 2 ด้านของออกไซด์จะมีค่าเท่ากับ

$$q\sigma_{mox} + qV_{ox,0} = q\sigma_{siox} + (E_g/2) - q\sigma_{s0} + q\sigma_f \quad (4)$$

$$\sigma_{ms} = \sigma_{mox} - \sigma_{siox} - (E_g/2q) - \sigma_f \quad (5)$$

เมื่อรวมสมการ 4 และ 5 เข้าด้วยกัน จะได้แรงดันรวมที่ตกคร่อมผิวออกไซด์ทั้งหมดเมื่อแรงดันไบอัสเกตเป็นศูนย์ ($V_G = 0$) คือ

$$V_{ox,0} = -(\sigma_{ms} + \sigma_{s0}) \quad (6)$$

ดังนั้น เมื่อป้อนแรงดันไบอัสเกต แรงดันที่ตกคร่อมออกไซด์จะสัมพันธ์กับแรงดันที่เกตดังนี้

$$V_G = V_{ox} = V_{ox,0} + \sigma_s - \sigma_{s0} \quad (7)$$

หรือเขียนในอีกรูปหนึ่งได้คือ

$$V_G = V_{ox} + \sigma_{ms} + \sigma_s \quad (8)$$

ความหนาแน่นของประจุที่ผิวเกตต่อหน่วย 1 หน่วย (Q_s) มีค่าเท่ากับ

$$Q_s = C_{ox} V_{ox} \quad (9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันไบอัสมีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน ($V_g = V_T$) และ $\sigma_s = 2\sigma_f$ แล้ว จากสมการ 3 , 8 , 9 จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนคือ

$$V_T = - (Q_{ss} - Q_{sdmax}) \div C_{ox} + \phi_{ms} + 2\sigma_f \quad (10)$$

Q_{sdmax} คือ ความหนาแน่นของประจุต่อพื้นที่ 1 หน่วยที่ผิวของบริเวณปลดพาหะ เมื่อบริเวณปลดพาหะมีความกว้างมากที่สุด (X_{max})

$$Q_{sdmax} = qN_a X_{max} \quad (11)$$

$$X_{max} = (4\epsilon_s \sigma_f \div qN_a)^{1/2} \quad (12)$$

นำสมการ 11 และ 12 แทนกลับไปในสมการที่ 10 จะได้

$$V_T = \phi_{ms} - (Q_{ss} \div C_{ox}) + 2\sigma_f + (\sqrt{2q\epsilon_s \epsilon_0 N_a 2\sigma_f \div C_{ox}}) \quad (13)$$

เมื่อ ϕ_{ms} คือ ผลต่างของ work function ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

(หาได้จากสมการที่ 5)

Q_{ss} คือ ความหนาแน่นของประจุต่อพื้นที่ 1 หน่วย ที่ผิวสัมผัสระหว่าง

Si และ SiO₂

σ_f คือ พลังงานเฟอร์มิ

C_{ox} คือ ความจุไฟฟ้าในชั้น SiO₂

N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ

ϵ_0 คือ ค่า permittivity ของสุญญากาศ

ϵ_{s1} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ Si

q คือ ประจุอิเล็กตรอน

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้างมอสเฟทกำลังชนิดดีมอส

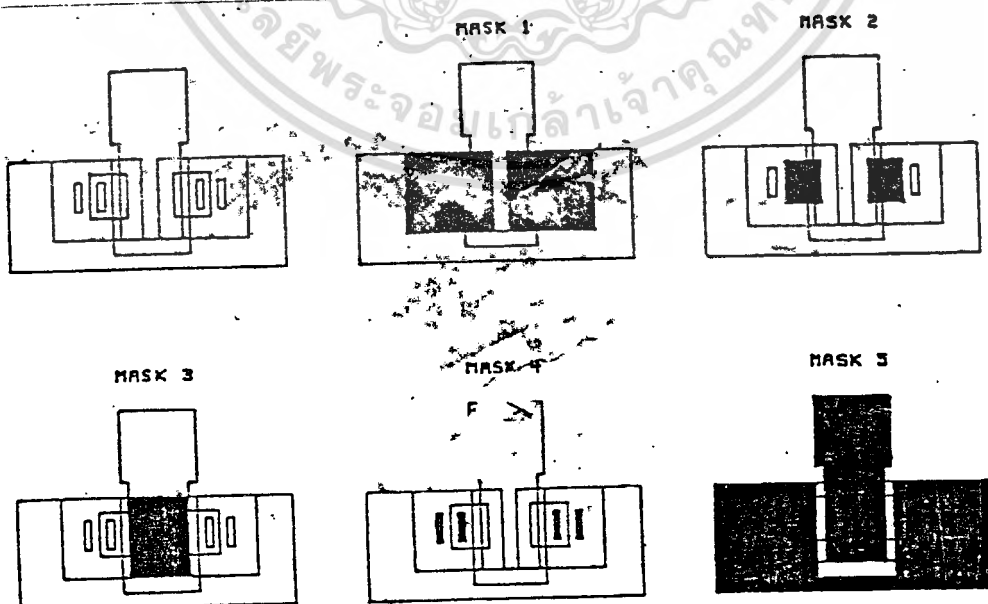
3.1 การออกแบบ

เพื่อศึกษาถึงผลของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วนพี-เบส ที่มีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของดีมอส ดังนั้นจึงได้ออกแบบให้ดีมอสมีความยาวของแชนแนลคงที่เท่ากับ 10 ไมครอน และความกว้างของแชนแนลคงที่เท่ากับ 400 ไมครอน ส่วนความหนาแน่นของสารเจือในส่วนพี-เบสจะมีค่าดังนี้

1. DM 1 แพร่สารเจือโบรอนให้มีความหนาแน่นของอะตอม $3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
2. DM 2 แพร่สารเจือโบรอนให้มีความหนาแน่นของอะตอม $1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
3. DM 3 แพร่สารเจือโบรอนให้มีความหนาแน่นของอะตอม $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
4. DM 4 แพร่สารเจือโบรอนให้มีความหนาแน่นของอะตอม $5.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

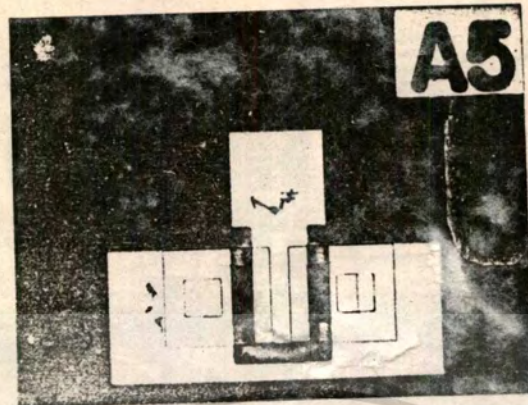
สำหรับระกจกัฒแบบที่ใช้ในการสร้างดีมอส มีดังนี้

- Mask 1 เปิดช่องซิลิกอน ไดออกไซด์ เนื้อแพร่ส่วนพี-เบส
 Mask 2 เปิดช่องซิลิกอน ไดออกไซด์ เพื่อแพร่ส่วนซอส
 Mask 3 เปิดช่องซิลิกอน ไดออกไซด์ เพื่อสร้างเกตชั้นใหม่
 Mask 4 เปิดช่องซิลิกอน ไดออกไซด์ เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า
 Mask 5 เปิดช่องซิลิกอน ไดออกไซด์ เพื่อกัดลวดลายให้เป็นขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 9 แสดงระกจกัฒแบบที่ใช้ในการสร้างดีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แสดง pattern ของ DM 1 - DM 4

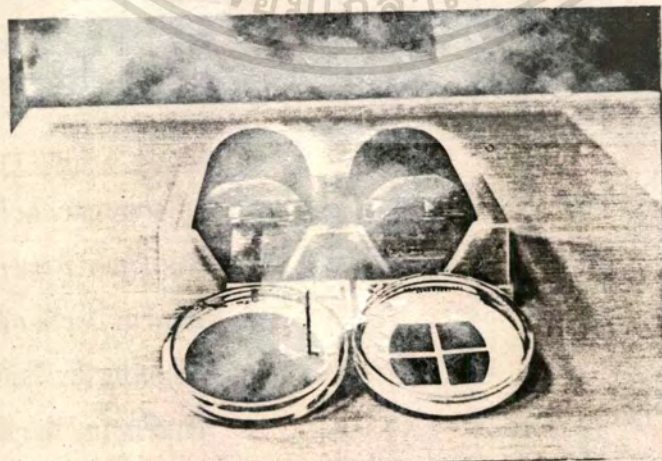
3.2 กระบวนการสร้าง

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. แผ่นผลึกซิลิกอน เริ่มต้น

- ชนิด Epitaxial N/N⁺ ร. 100>
- ความหนาของแผ่นผลึก 420 ไมครอน
- ความหนาของชั้นอีพิ 18.9 - 23.1 ไมครอน
- นวัตกรรมต้านทาน 5 - 10 Ω -cm
- จะใช้แผ่นผลึกเริ่มต้นทั้งหมดจำนวน 4 แผ่น โดยใช้ชื่อเรียกคือ DM 1, DM 2

, DM 3, DM 4 เพื่อทำการศึกษาค่าของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความหนาแผ่นของอะตอมสารเจือไนเซ็น P-base แตกต่างกันไป



รูปที่ 11 แผ่นผลึกเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที

เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน

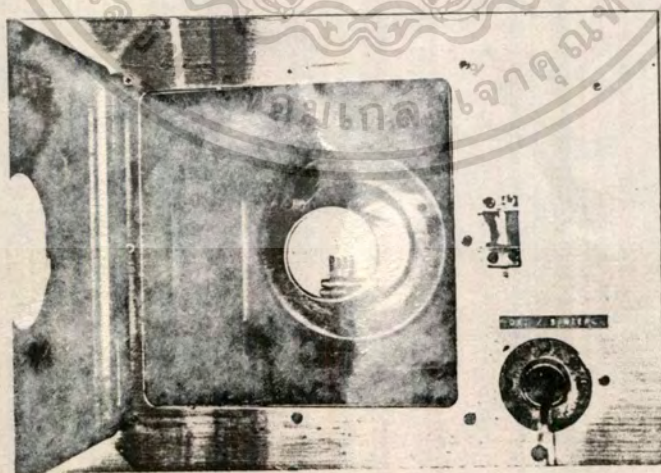
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความเร็วสูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. กระบวนการออกซิเดชันครั้งแรก

เพื่อการสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ ให้มีขนาดความหนาไม่น้อยกว่า $4,000 \text{ \AA}$ จึงต้องทำกระบวนการออกซิเดชัน โดยนำแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทั้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ $1,100^{\circ}\text{C}$

เงื่อนไขและขั้นตอนของกระบวนการ

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 120 นาที โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 30 นาที โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 60 นาที โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที



รูปที่ 14 นำแผ่นเวเฟอร์เข้าเตาเพื่อสร้างชั้นออกไซด์

4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิกอน เพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออก สำหรับการแพร่ส่วนของ P-base ในขั้นตอนนี้ใช้ กระบวนการที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วนำไปอบให้แห้ง จึงนำไปทำการพิมพ์แผ่นด้วยต้นแบบกระจกมาสก์ที่ I สำหรับรายละเอียดของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat มีลำดับขั้นดังนี้ คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 15-20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรก ใต้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ $90-100^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาสก์ที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลตออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000^{\circ}\text{A}$ เป็นเวลา 10 นาที
- การล้างภาพ
 - จุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1 นาที
 - จุ่มในน้ำยาทำความสะอาด (Isopropyl) 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที
 - ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ใต้น้ำแห้งที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ $90-100^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 20-30 นาที
- ทาต้านหลังแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสง Waycoat แล้วนำไปอบแห้งอีกครั้ง เป็นเวลา 20 นาที

5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิกอน ไดออกไซด์ เราใช้สารละลายเคมีซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์นี้ เราเรียกว่าสารละลาย Buffer มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ ประมาณ $1,000 \text{ \AA}/\text{นาที}$

6. การลอกชั้นสาร ไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสงและยังค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอนสามารถลอกทิ้งได้โดย

- ต้มในกรด ซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

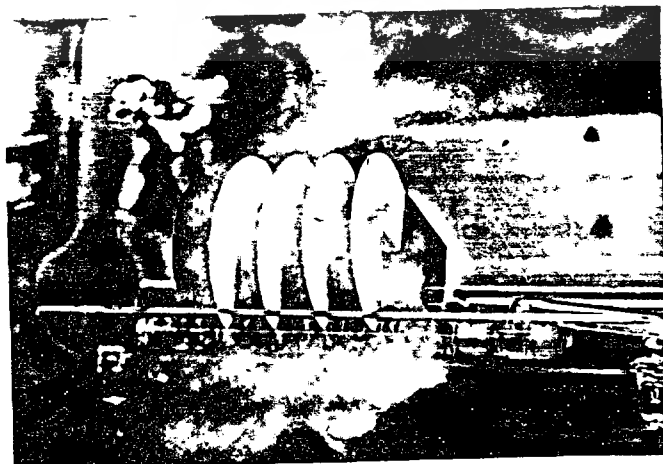
7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตน ในเครื่องสั่นความเร็วสูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% ประมาณ 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

8. กระบวนการ P-base deposition

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือปนด้วยแหล่งจ่ายสารเจือปน BN(A) ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

- ทำการ Activation ที่อุณหภูมิ 820°C เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตร/นาที
- ทำการ Stabilize ที่อุณหภูมิ 820°C เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตร/นาที
- ทำการ Predeposition ดังนี้
 - แผ่น DM 1 ที่อุณหภูมิ 820°C เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตร/นาที
 - แผ่น DM 2 ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตร/นาที
 - แผ่น DM 3 ที่อุณหภูมิ 880°C เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตร/นาที
 - แผ่น DM 4 ที่อุณหภูมิ 910°C เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตร/นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 15 แผ่นสีขาวที่วางสลับกับแผ่นเวเฟอร์คือแผ่นโบรอนนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. การลอกชั้น Boron glass

- จุ่มแผ่นผลึกลงใน กรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

10. การทำความสะอาดผิวผลึก

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 7

11. กระบวนการ P-base drive-in / Reoxidation

ทำการขับเคลื่อนอะตอมสารเจือโบรอน พร้อมทั้งสร้างชั้นเซมิคอนไดออกไซด์ชั้นด้วย ที่อุณหภูมิ $1,100^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนของกระบวนการดังนี้ คือ

- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบชื้น เป็นเวลา 20 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 100 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที

หลังจากการ drive-in แล้ว ทำการวัดความต้านทานแผ่น (ρ_{\square}) ของทุกแผ่น ได้ผลดังนี้

แผ่น	ρ_{\square} (Ω/\square)
DM 1	400
DM 2	660
DM 3	850
DM 4	1500

12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี II

ใช้กระบวนการที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นเซมิคอนไดออกไซด์ เพื่อแนวสารเจือปอสฟอรัสที่ส่วนเซอส ในขั้นตอนที่ต้องทำอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ได้ความยาวเช่น แผล (L) มีขนาดเท่ากันตลอด ดังที่แสดงในรูปข้างล่าง ส่วนรายละเอียดของกระบวนการเหมือนขั้นตอนที่ 4

13. การกัดชั้นเซมิคอนไดออกไซด์

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 5

14. การลอกชั้นสารไวแสง

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 6

15. ทำความสะอาดผิวผลึก

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 7

16. กระบวนการ N^+ -source deposition

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยแหล่งสารเจือ SiP_2O_7 (PH1000) ที่อุณหภูมิ $1,040^\circ C$ เป็นเวลา 12 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที

17. การลอกชั้น Phosphorous glass

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% นาน 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

18. การทำความสะอาดผิวผลึก

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 7

19. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี III

ใช้กระจกมาส์คที่ III เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์ บริเวณส่วนเกทออก เพื่อทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่ เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4

20. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 5

21. การลอกชั้นสารไวแสง

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 6

22. การทำความสะอาดผิวผลึก

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 7

23. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วนเกท

ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ บริเวณส่วนเกทโดยใช้การออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ $1,150^\circ C$ ใช้เวลา 35 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที ได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่หนาประมาณ $1,000\text{\AA}$

24. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี IV

ใช้กระจกมาส์คที่ IV เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกบริเวณที่จะทำส่วนหัวไมโคร รายละเอียดของกระบวนการเหมือนกับขั้นตอนที่ 4 แต่ไม่ต้องทำด้านหลังแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสง Waycoat

25. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 5 และกัดซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหลังแผ่นผลึกออกให้หมดด้วยเพื่อใช้เป็นหัวเดรน

26. การลอกชั้นสารไวแสง

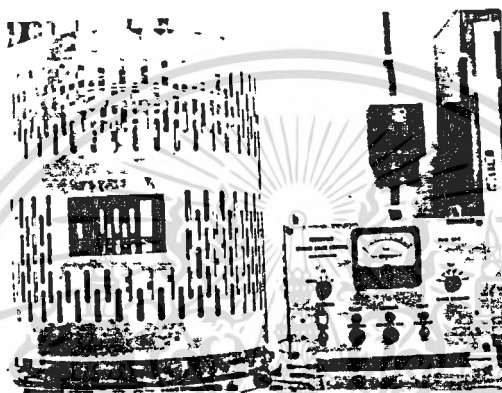
รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 6

27. การทำความสะอาดผิวผลึก

รายละเอียดเหมือนขั้นตอนที่ 7

28. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยการใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporator ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นของอะลูมิเนียมหนาประมาณ 1 ไมครอน



รูปที่ 16 เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ

29. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี V

ใช้กระจกมาส์คที่ V เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของอะลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออกขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ มีลำดับขั้นตอนดังนี้ คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 15-20 นาที
- เคลื่อนน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5,000 รอบต่อนาที

เป็นเวลา 20 วินาที

- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาส์คที่ V ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา

10 วินาที

- การล้างภาพ จุ่มในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งที่เกิดด้วยการไนโตรเจน

- อบครั้งที่สอง ให้นำแผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา

20-30 วินาที

30. การกัดชั้นอะลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้ละลายชั้นอะลูมิเนียม ได้แก่ สารละลายผสมซึ่งมีกรดฟอสฟอริก เป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกเสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลายนี้ ซึ่งมีอุณหภูมิราว 50 °C เป็น

เวลา 1-2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงไนอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

32. กระบวนการ Sintering

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

33. การทดสอบอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน (On wafer test)

ก่อนที่จะนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่สร้างเสร็จแล้วไปตัดแบ่งออกเป็นชิป จะมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าก่อน โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Probe station ซึ่งใช้เข็มจิ้มลงไปที่จุดต่อสาย (bonding pad) ที่ 2 ขั้วคือ ขั้วเกท และขั้วซอส ส่วนฐานรองของแผ่นผลึกซิลิกอนจะเป็นส่วนเดรน แล้วต่อสายโลหะเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) เพื่อดูว่ามีชิปใดทำงานได้ หรือไม่ได้ ส่วนชิปที่เสียก็จะถูกทำเครื่องหมายไว้ และจะไม่นำไปเก็บบรรจุ

34. การตัดแยกชิป (Scribing)

เป็นการตัดแบ่งแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยเครื่องที่เรียกว่า Sawing machine ซึ่งควบคุมการตัดด้วยใบมีด (Sawing blade) ที่หมุนด้วยความเร็วประมาณ 500 รอบต่อวินาที แล้วแผ่นผลึกชิ้นเล็ก ๆ ที่ได้ในขั้นนี้ ก็คือดีมอสตัวหนึ่ง ๆ ซึ่งเรียกว่า ชิป หรือ ไคซ์

35. การติดชิป (Die bonding)

เป็นการนำเอาชิปที่ทำงานได้ หลังจากที่ได้ทดสอบ และตัดออกเป็นชิปแล้ว มาติดบนตัวถังแบบ TO-3 และ TO-5 โดยการติดกับตัวถัง TO-3 จะใช้กาวยเงิน (silver press) ติดชิปกับตัวถัง แล้วนำไปอบในแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วน TO-5 จะใช้เครื่องติดชิปที่ให้ความร้อนประมาณ 400°C ช่วยในการยึดติดชิปเข้ากับส่วนผิวของตัวถังที่เป็นทอง

36. การต่อสาย (wire bonding)

เป็นการต่อลวดโลหะอะลูมิเนียมระหว่างชิป กับขาของตัวถังที่จะต่อไปใช้งานภายนอก ซึ่งจะใช้ความถี่ในการสั่นที่ปลายเข็มในการต่อสาย ในกรณีของตัวถังแบบ TO-3 จะใช้ลวดโลหะเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 ไมครอน ส่วนตัวถังแบบ TO-5 จะใช้ลวดโลหะเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 ไมครอน

37. การเก็บบรรจุ (Encapsulate)

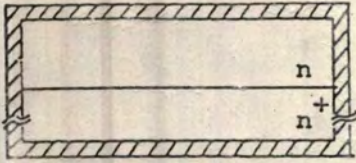
เนื้อป้องกันชิปไม่ให้เสียหายจากอุณหภูมิสูงหรือความชื้น หรือสารเคมีจากภายนอก เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อป้องกันไม่ให้เสียหากอุณหภูมิสูงหรือความชื้น หรือสารเคมีจากภายนอก ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

หรือ การกระทบกับลวดโลหะที่ใช้ต่อสาย นอกจากนี้ยังช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในรอยต่อพี-เอ็นในขณะทำงาน โดยการปิดด้วยฝาโลหะ

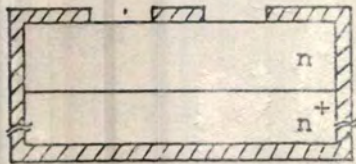
38. การทดสอบขั้นสุดท้าย (final test)

เมื่อนำมาเก็บบรรจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ต้องมีการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์อย่างละเอียดอีกครั้ง อาทิเช่น การวัดคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น , การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน กับแรงดันเดรนซอส , การวัดค่าความจุระหว่างรอยต่อพี-เอ็น และส่วนเกทออกไซด์ , การวัดการตอบสนองความถี่ (Switching speed) เป็นต้น เพื่อนำไปสรุปเป็นข้อมูลที่จะศึกษาในครั้งต่อ ๆ ไป

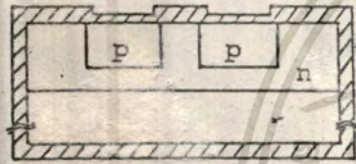




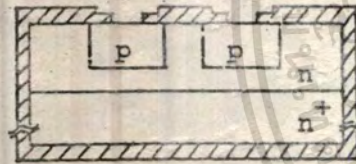
ทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึกและสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยการออกซิเดชัน



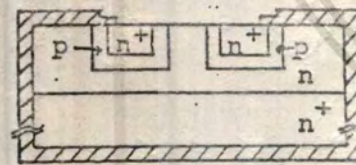
เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับแพร์สารเจือโบรอน



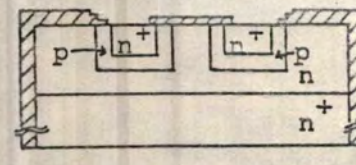
แพร์สารเจือโบรอน, ทำการรับลิทพร้อมทั้งสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ด้วย



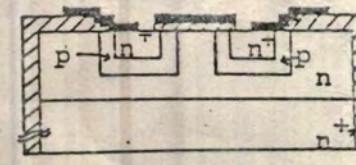
เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับแพร์สารเจือฟอสฟอรัส



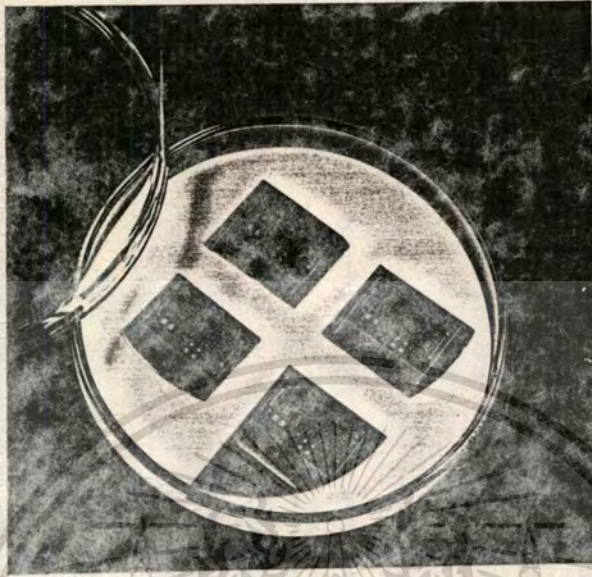
แพร์สารเจือฟอสฟอรัส และเปิดช่องเพื่อสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนเกท



สร้างซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนเกทใหม่, เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับสร้างขั้วโลหะ และกัดซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหลังทิ้ง



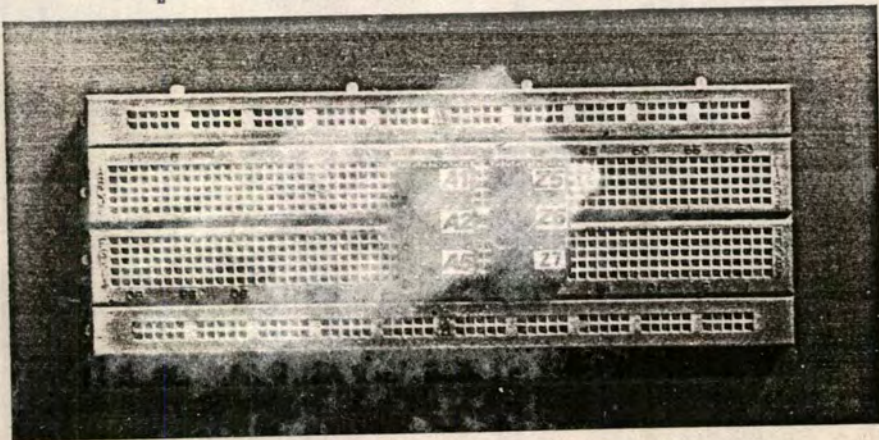
สร้างขั้วโลหะด้วยการเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศแล้วกัดอลูมิเนียมออกเป็นลวดลายของส่วนซอร์ส และเกท



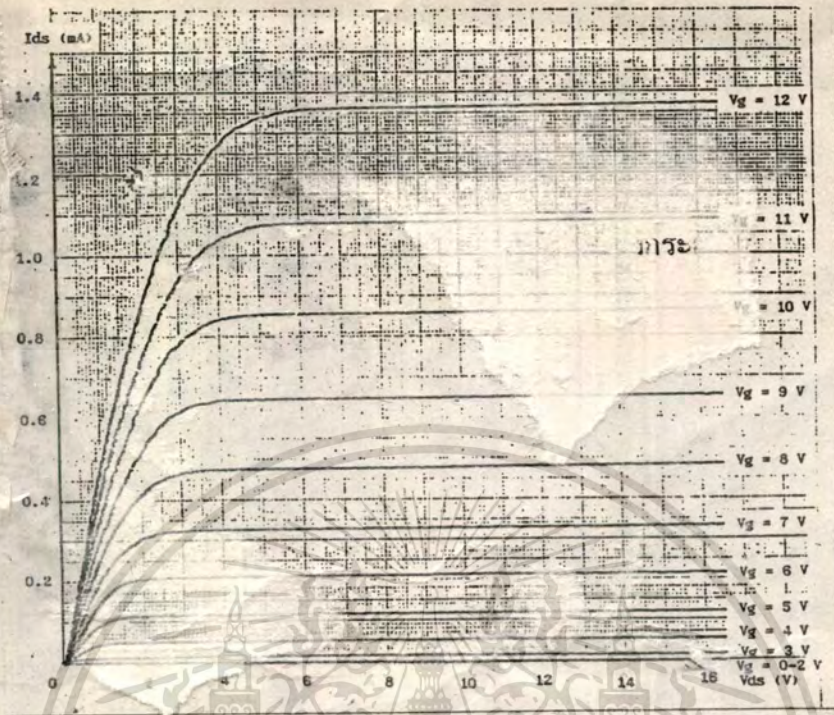
รูปที่ 18 แสดงคีมออสที่สร้างเสร็จเรียบร้อยยกแค้นเวเฟอร์



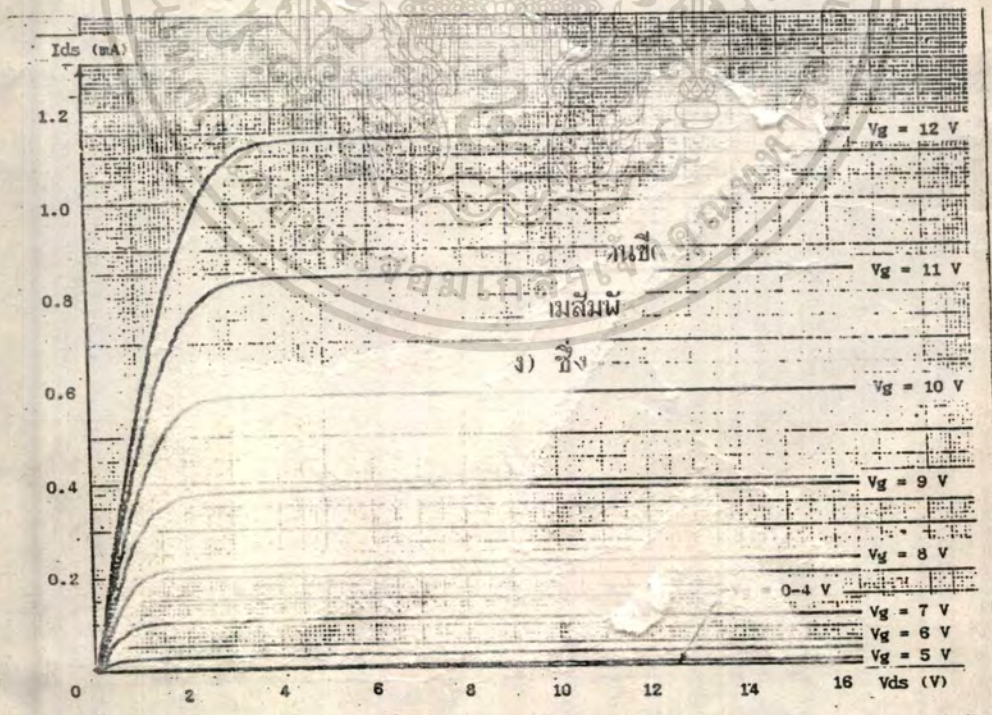
รูปที่ 19 คีมออสแต่ละตัวหลังจากการตัดแยกชิ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ 20 แสดงชิ้นที่ถูกบรรจุลงในตัวถัง ไลซีนแบบตีตะขานไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และคงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

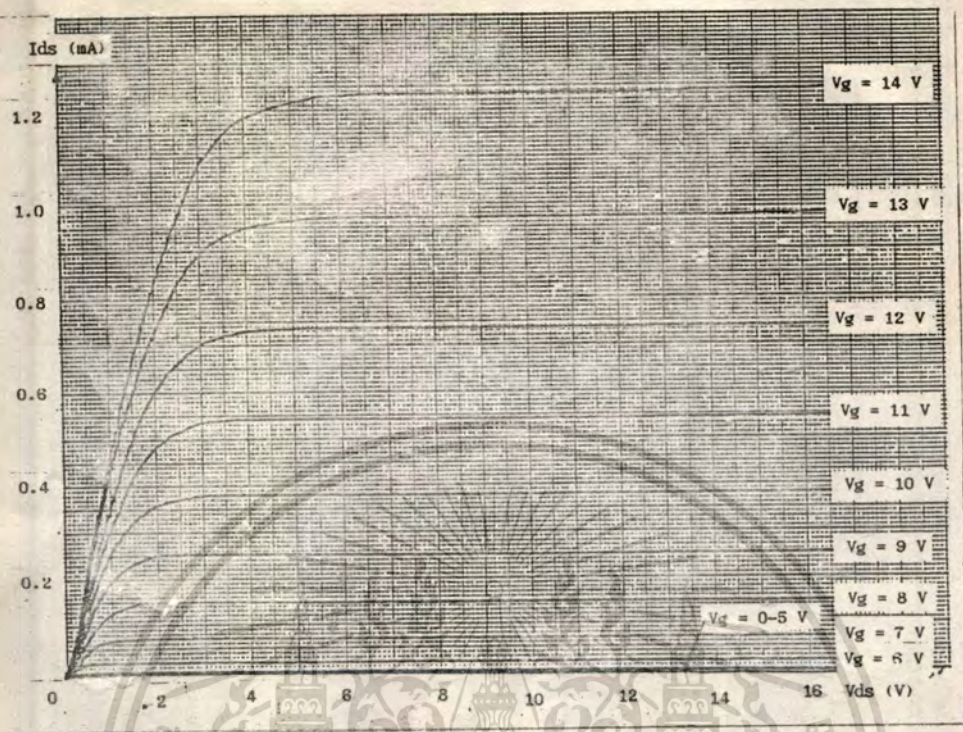


รูปที่ 22 ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนของ DM1

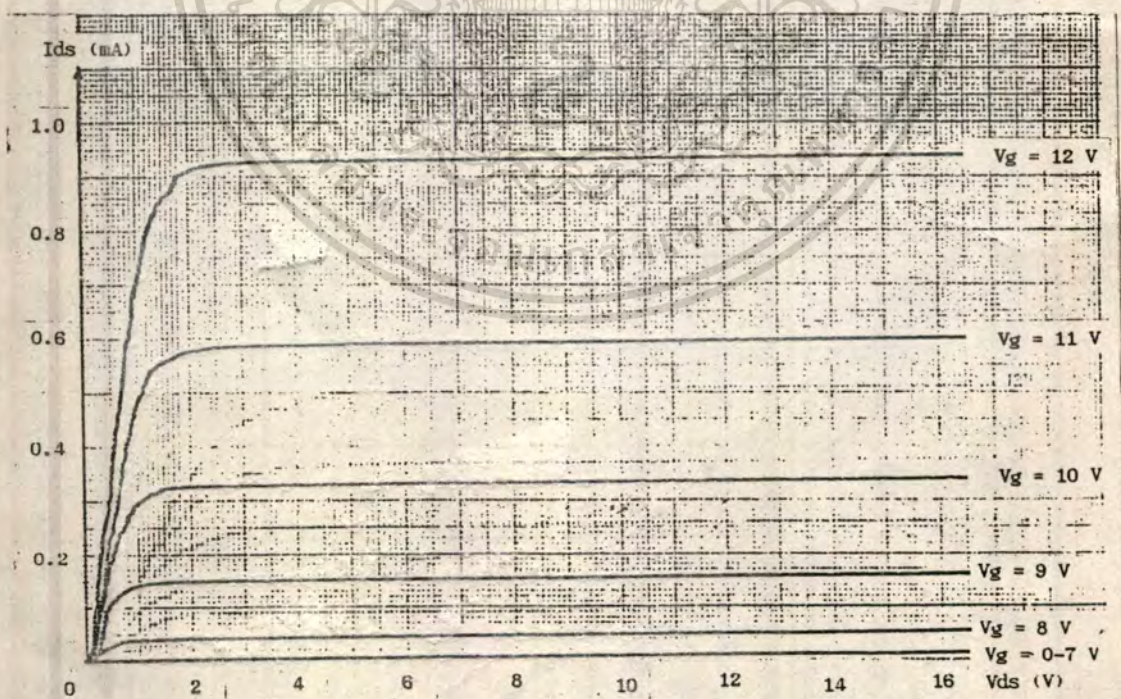


รูปที่ 22 ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนของ DM2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 ค) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนของ DM3

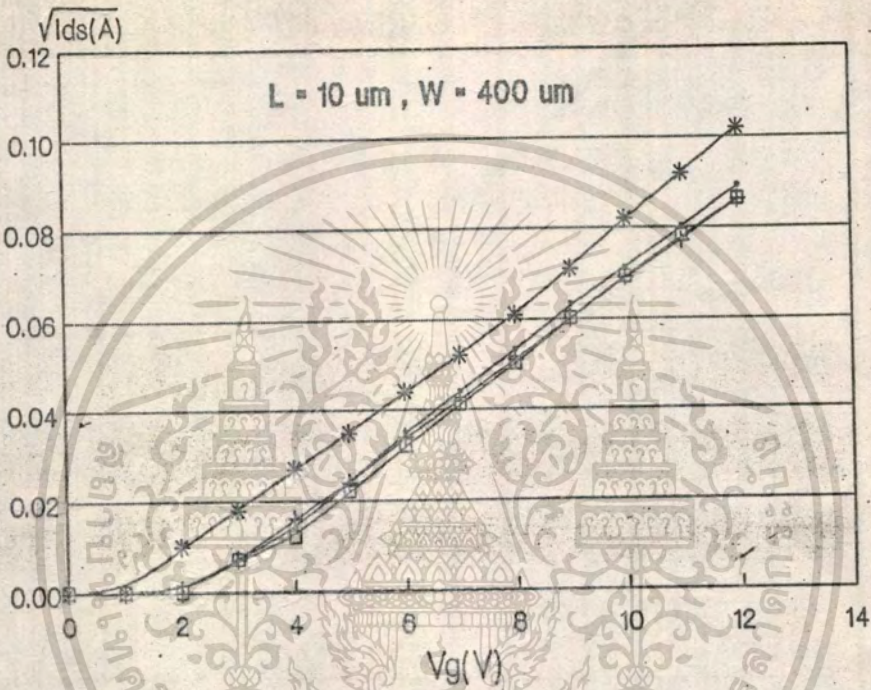


รูปที่ 22 ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนของ DM4

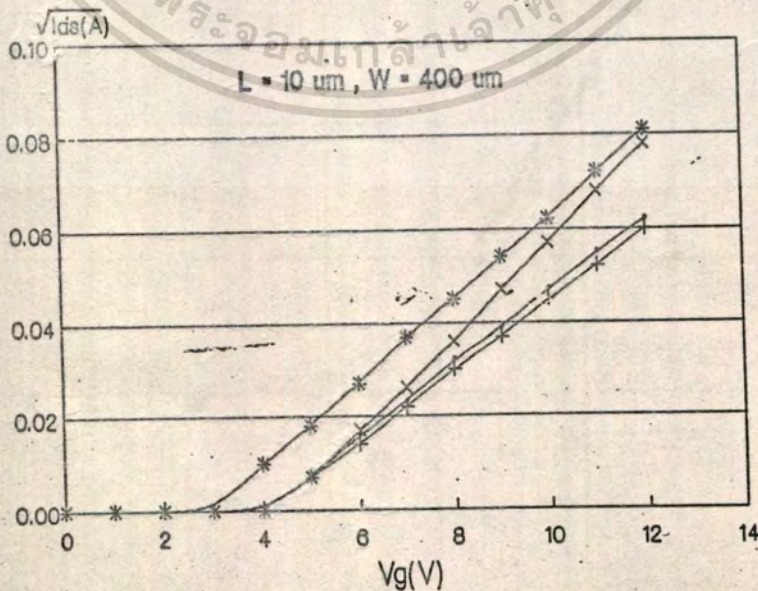
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 คุณสมบัติของ $\sqrt{I-V}$ curve

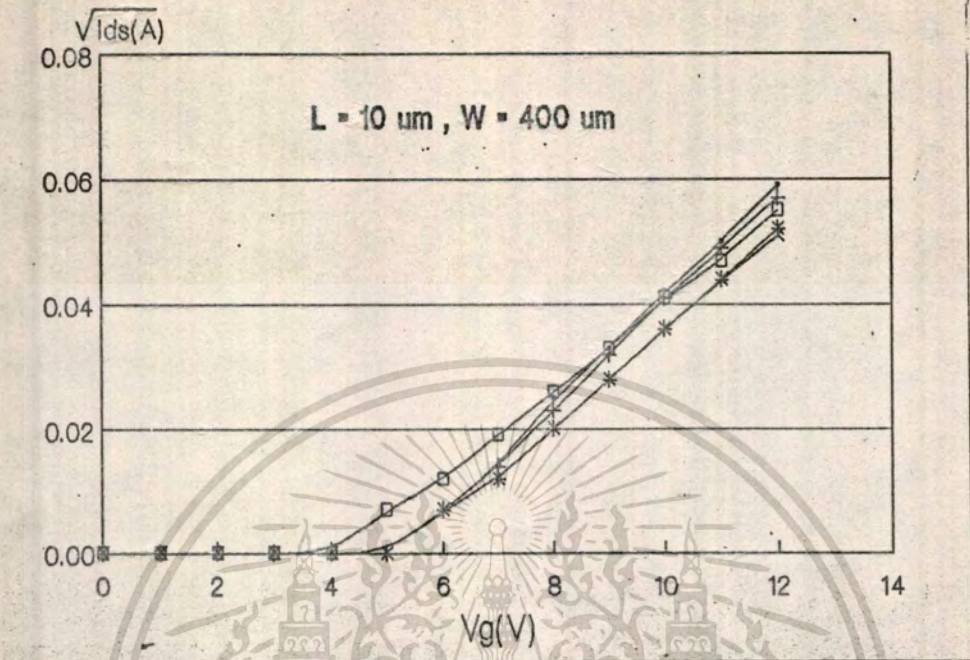
นำกราฟที่ได้ไปคำนวณแล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ใหม่ระหว่าง $\sqrt{I_{ds}}$ กับ V_g แสดงในรูปที่ 23 ก) , ข) , ค) , ง) ซึ่งเป็นกราฟ I-V ของ DM 1 , DM 2 , DM 3 และ DM 4 ตามลำดับ จากกราฟนี้สามารถหาแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน โดยลากกราฟมาตัดแกน V_g



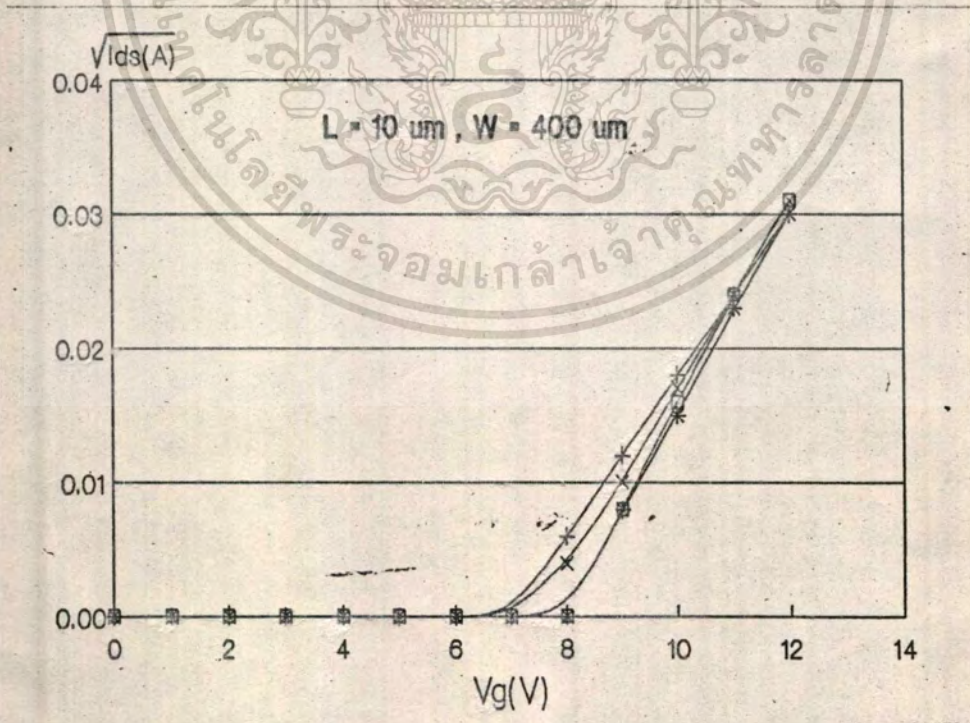
รูปที่ 23 ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{ds}}$ และ V_g ของ DM1



รูปที่ 23 ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{ds}}$ และ V_g ของ DM2



รูปที่ 23 ด) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{ds}}$ และ V_g ของ DM3



รูปที่ 23 ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{ds}}$ และ V_g ของ DM4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรวจใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป	แผ่น DM1	ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ	2.40	โวลท์
	แผ่น DM2	ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ	4.00	โวลท์
	แผ่น DM3	ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ	5.20	โวลท์
	แผ่น DM4	ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ	8.00	โวลท์

4.3 ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจากการคำนวณ

ต่อไปจะคำนวณค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนที่ได้ออกแบบไว้โดยการหาจากสมการที่ 13

$$V_T = \phi_{ms} - (Q_{ss} \div C_{ox}) + 2\phi_f + (\sqrt{2q\epsilon_{s1}\epsilon_o N_a} 2\phi_f \div C_{ox})$$

จากสมการที่ 5

$$\begin{aligned}\phi_{ms} &= \phi_{mox} - \phi_{sox} - (E_g \div 2q) - \phi_f \\ &= 3.2 - 4.35 + (1.12 \div 2) - \phi_f \\ &= -0.59 - \phi_f\end{aligned}$$

$$Q_{ss} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$$

$$\phi_f = (KT \div q) \ln(N_a \div n_1)$$

$$= (1.38 \times 10^{-23} \times 300) \div (1.6 \times 10^{-19}) \ln(N_a \div n_1)$$

$$= 0.0259 \ln(N_a \div n_1)$$

$$n_1 = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\begin{aligned}C_{ox} &= \epsilon_o \epsilon_{ox} \div t_{ox} \\ &= (8.85 \times 10^{-14} \times 3.97) \div (1000 \times 10^{-8})\end{aligned}$$

$$= 3.51 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$$

$$\epsilon_o = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$$

$$\epsilon_{s1} = 11.7$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

จะเห็นว่าตัวแปรต่างๆ เราทราบหมด เหลือเพียง N_a เท่านั้น N_a สามารถหาได้จากการวัดค่าวิกฤตความต้านทานแล้วนำมาเทียบค่าในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอะตอมสารเจือและค่าวิกฤตความต้านทาน (กราฟแสดงในภาคผนวก) การหาค่าวิกฤตความต้านทาน (ρ) ต้องทราบความลึกของรอยต่อเสียก่อน (วิธีการหาความลึกของรอยต่อคู่ได้จากภาคผนวก เช่นเดียวกัน) จากการคำนวณจะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

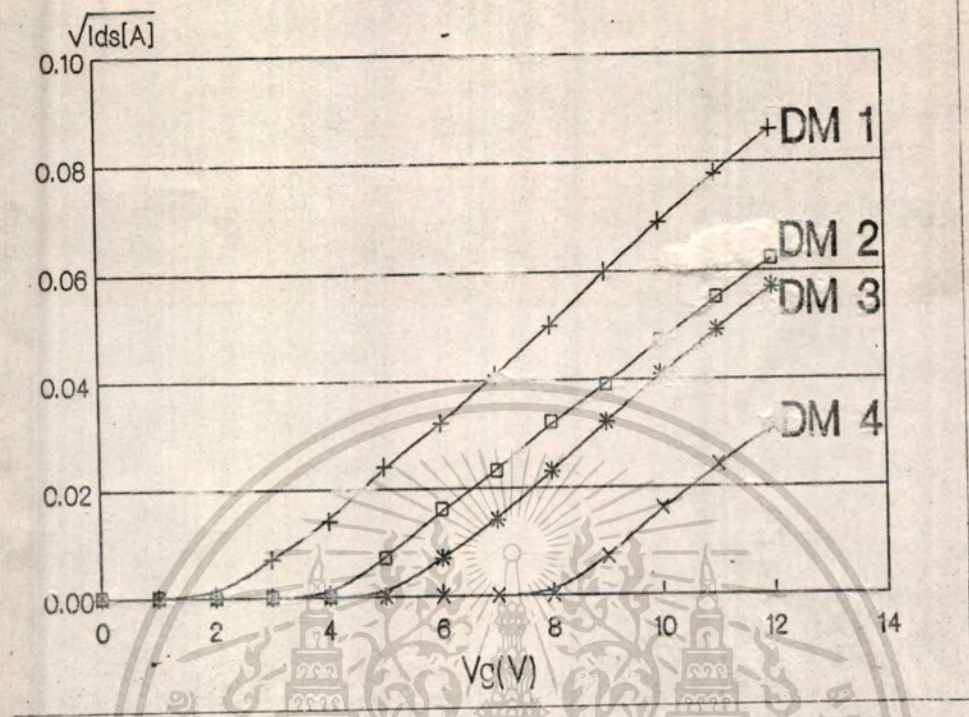
แผ่น	ρ_s (Ω/\square)	ρ ($\Omega\text{-cm}$)	N_a (cm^{-3})
DM1	400	0.114	3.7×10^{17}
DM2	660	0.188	1.7×10^{17}
DM3	850	0.242	1.1×10^{17}
DM4	1500	0.427	5.1×10^{16}

ตารางที่ 1 แสดงค่าที่วัดความต้านทานและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

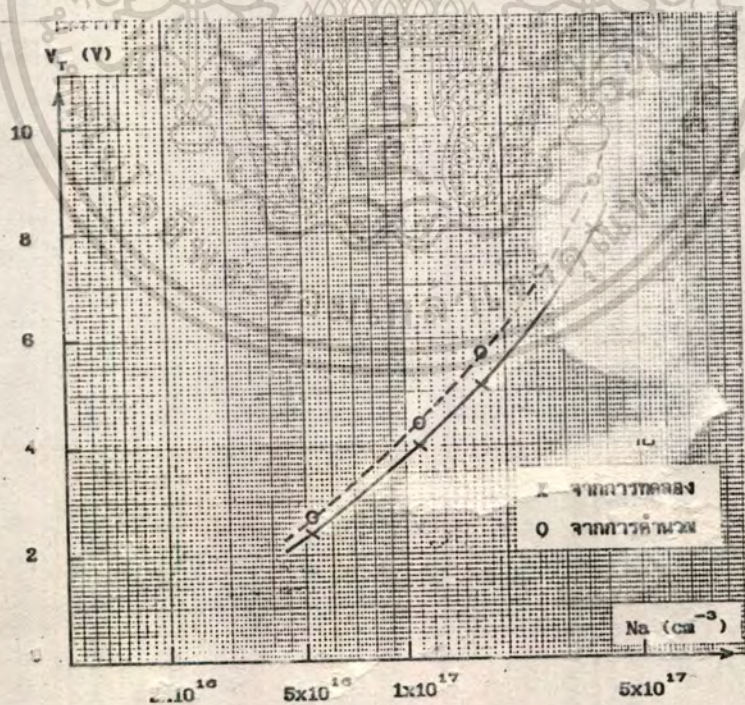
หลังจากทราบค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือรับ (N_a) แล้ว แทนค่าลงในสมการที่ 13 จะได้ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนดังนี้

แผ่น	V_T จากการคำนวณ (V)	V_T จากการทดลอง (V)	ความผิดพลาด (%)
DM1	2.71	2.40	11.4
DM2	4.41	4.00	9.3
DM3	5.72	5.20	9.1
DM4	8.96	8.00	10.7

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับการทดลอง



รูปที่ 24 กราฟแสดงค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของตัวอย่าง 4 แห่งที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนในดีมอสสามารถกำหนดได้จากตัวแปรหลายอย่างด้วยกัน เช่น ระยะเวลาของแผ่นฟิล์ม , ความหนาของชั้นแก๊สออกไซด์ , ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ การควบคุมแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนด้วยวิธีการควบคุมความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนให้เป็นไปตามที่ต้องการได้โดยง่าย จากการทดลองพบว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนที่ได้หลังจากการทดลองวัด เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ จะมีความผิดพลาดอยู่ประมาณ 10 % สาเหตุของความผิดพลาดเนื่องมาจาก ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในวิธีทั้งสองเอง ค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สูตรที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือและความหนาของชั้นออกไซด์เป็นตัวแปรอยู่ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือหามาได้จากการชั่งรอยต่อ ตามทฤษฎีรอยขีดจะต้องมีลักษณะเป็นวงกลม จึงจะคำนวณความลึกของรอยต่อได้ถูกต้อง แต่รอยขีดที่ได้จาก grooving machine จะมีลักษณะไม่กลมที่เดียวทุก ความลึกของรอยต่อที่คำนวณได้จึงมีค่าผิดพลาดไปจากความจริง จึงทำให้การคำนวณความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีความผิดพลาดตั้งแต่แรก และยังเกิดจากความไม่แน่นอนจากการอ่านค่าจากกราฟด้วย (กราฟรูป ๒4) ส่วนค่าความหนาของชั้นออกไซด์ ถึงแม้ค่านี้จะไม่สามารถวัดความหนาออกมาเป็นตัวเลขที่แน่นอน ทราบแต่เพียงค่าประมาณเท่านั้น แต่ว่าความหนาของชั้นออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากการทดลองหาจากที่เดียวกัน ดังนั้นความผิดพลาดของแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจึงไม่ได้มาจากส่วนนี้ ส่วนวิธีที่ได้จากการทดลอง ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนใช้การอ่านและประมาณค่าจากกราฟ (กราฟรูปที่ 23) ทำให้เกิดความผิดพลาดเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองที่ได้สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือขึ้นมาได้ (กราฟรูปที่ 25) ซึ่งมีประโยชน์มากในการสร้างดีมอสในครั้งต่อไป ให้มีแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นไปตามที่ต้องการ

ภาคผนวก ก.

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุอิเล็กตรอน	q	1.6×10^{-19}	C
ค่าคงที่ของ Boltzmann	K	1.38×10^{-23}	J/K
อุณหภูมิห้อง	T	300	K
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ	ϵ_0	8.85×10^{-14}	F/cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ Si	ϵ_{Si}	$11.7 \epsilon_0$	F/cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ SiO ₂	ϵ_{SiO_2}	$3.97 \epsilon_0$	F/cm
ประจุพาหะของสาร Si บริสุทธิ์	n _i	1.45×10^{10}	cm ⁻³
ความกว้างของพลังงานแถบต้องห้าม ใน Si ที่อุณหภูมิ 300 K	E _g	1.12	eV
ค่าความคล่องตัวของประจุใน Si อิเล็กตรอน	μ_n	1350	cm ² /vs
โฮล	μ_p	480	cm ² /vs

ตารางที่ ก1 แสดงค่าคงที่ต่างๆ

โลหะ	ϕ_{max}
อะลูมิเนียม	3.2 eV
ทองแดง	3.8 eV
ทองคำ	4.1 eV
แมกนีเซียม	2.25 eV
นิกเกิล	3.7 eV
เงิน	4.15 eV

ตารางที่ ก2 แสดงระดับพลังงานระหว่างโลหะชนิดต่างๆและซิลิกอนไดออกไซด์

ระนาบของผลึก	Q_{ss}
<111>	$8.0 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$
<110>	$3.2 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$
<100>	$1.4 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$

ตารางที่ ก3 แสดงความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัสระหว่าง
ซิลิกอนระนาบต่างๆ และซิลิกอน ไดออกไซด์

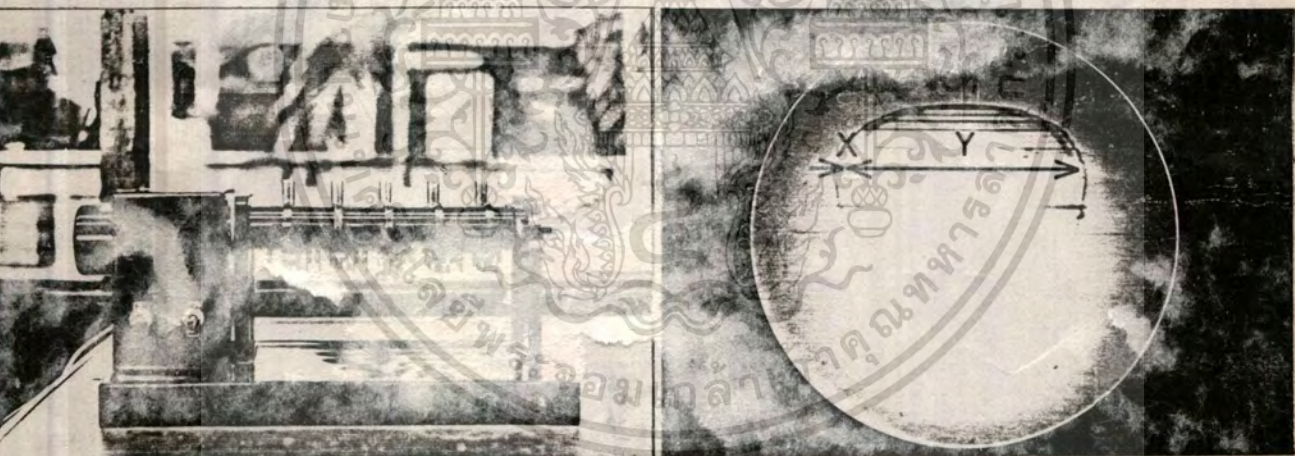
ภาคผนวก ข.

การหาความลึกของรอยต่อด้วยวิธีชูดรอยต่อและการหาความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

เมื่อต้องการหาความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ จะต้องทราบความลึกของรอยต่อเสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ชูดรอยต่อเรียกว่า grooving machine (ดูในรูป ข1) ล้อหมุนเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 cm นำแผ่นเวเฟอร์ที่ต้องการชูดหารอยต่อมาใส่ที่ตัววงล้อ เปิดสวิตซ์ให้เครื่องหมุนประมาณ 50 - 75 รอบ จะทำให้เกิดหลุมขึ้น จากแผ่นเวเฟอร์มาล้างให้สะอาด แล้วทำการข้อมสีในสารละลายของกรดกัดแก้ว (HF) และกรดไนตริก (HNO_3) ส่วนที่เป็นชั้นสีจะมีสีเข้ม เมื่อวัดระยะต่างๆ ได้แล้วจึงนำมาคำนวณความลึกของรอยต่อได้โดย

$$X_j = XY \div D$$

เมื่อ X_j คือ ความลึกของรอยต่อ
 D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของวงล้อ
 X, Y คือ ระยะตามรูป



รูปที่ ข1 เครื่องมือที่ใช้ชูดรอยต่อ

รูปที่ ข2 ลักษณะรอยชูดที่ได้

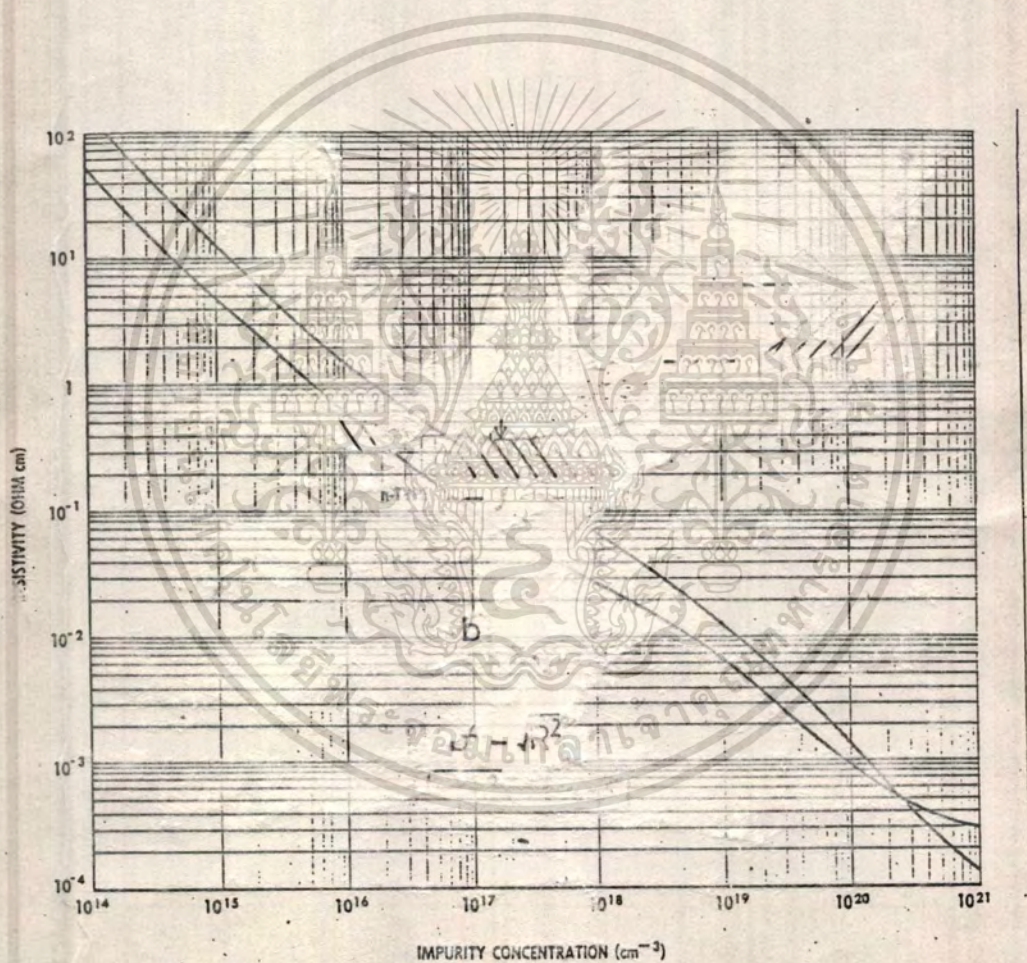
จากใ้เน้ใ้มาคำนวณหาค่าวิกฤตความต้านทานได้จาก

$$\rho = \rho_s X_j$$

เมื่อ ρ คือ วิกฤตความต้านทาน

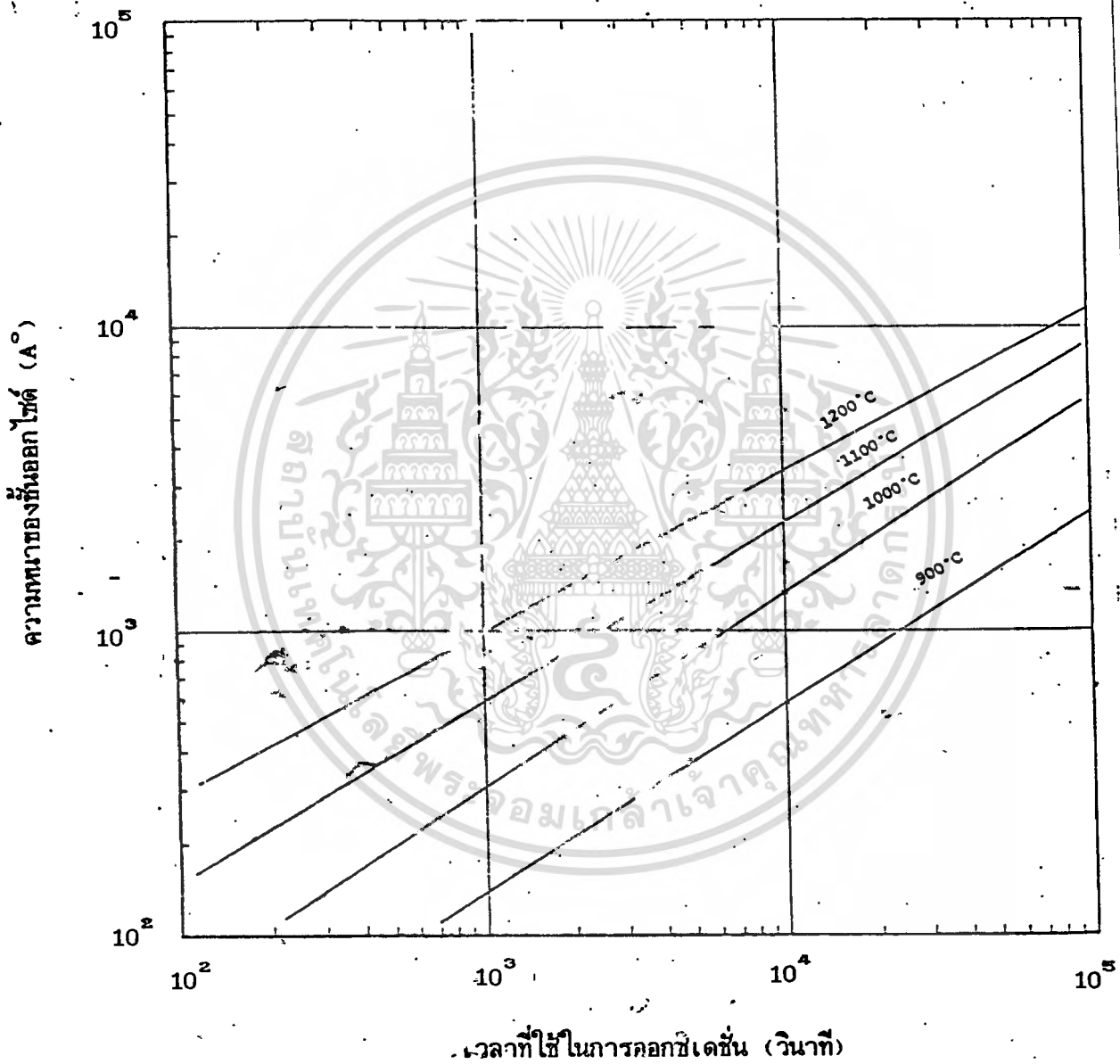
ρ_s คือ ความต้านทานแผ่น

หลังจากทราบวิกฤตความต้านทานแล้ว นำไปเทียบค่าในกราฟรูปที่ ๒4 ก็จะได้ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ



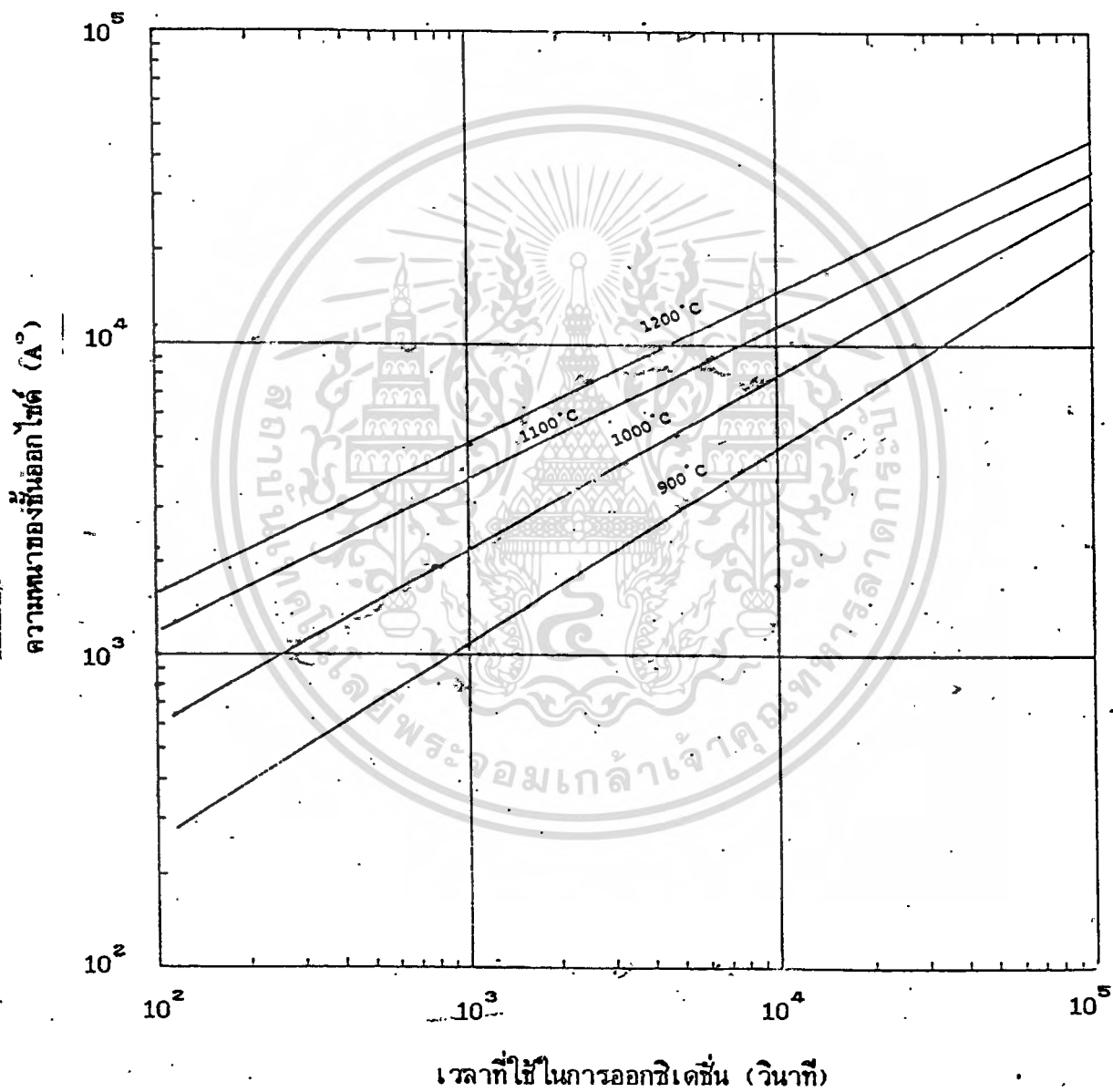
รูปที่ ๒4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์กับ เวลาและอุณหภูมิสำหรับการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

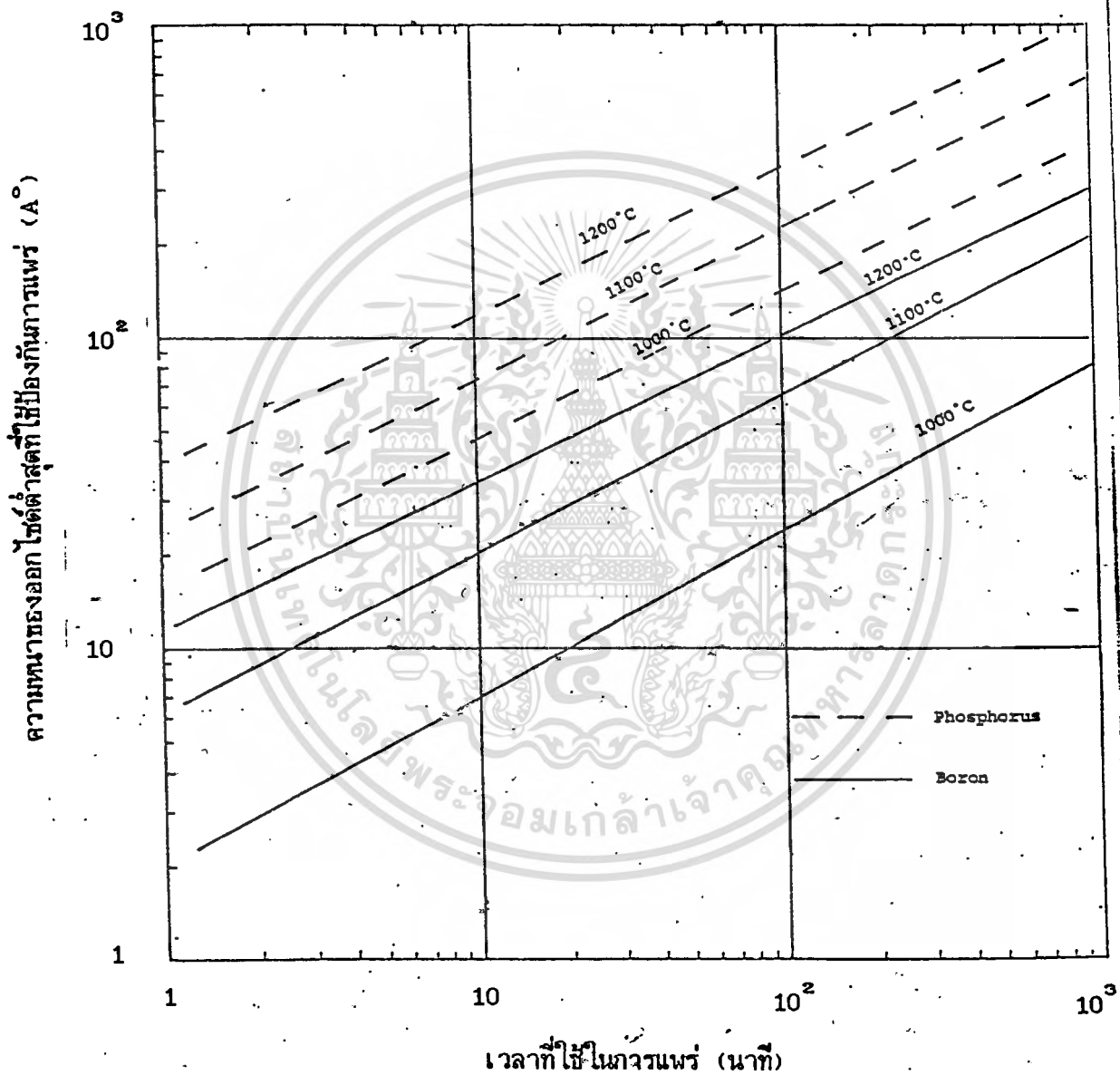


รูปที่ ค2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

เวลาและอุณหภูมิสำหรับการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้ทำประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชั้นออกไซด์ที่บางที่สุดที่ยังสามารถป้องกันความร้อนของอะตอมสารเจือกับเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมสารเจือนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงอื่นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

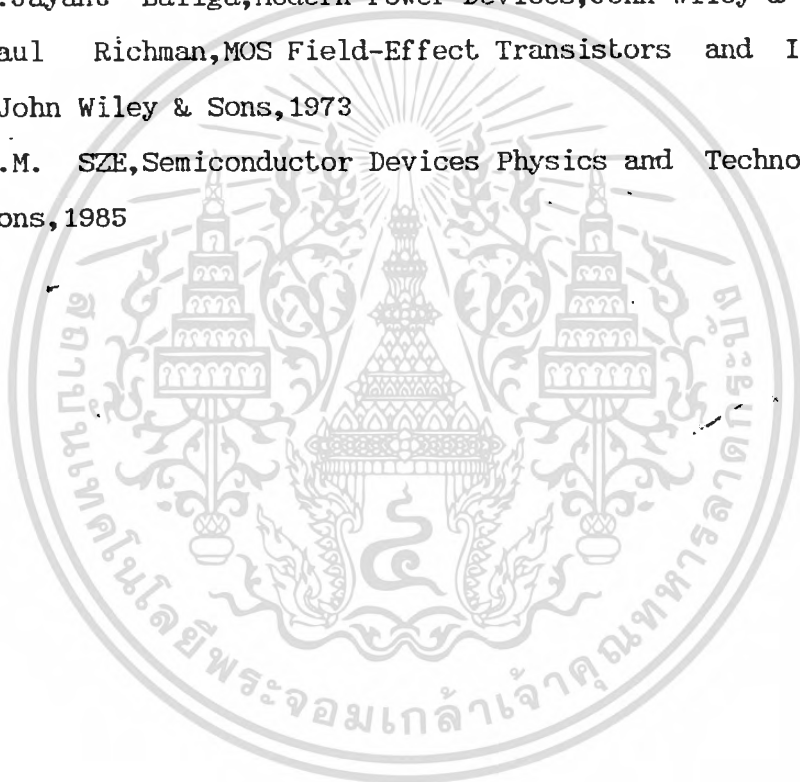
ปริญญาโทนี้ที่ท่านกำลังอ่านอยู่นี้ เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความร่วมมือและช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆท่านในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขปัญหาต่างๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้บริษัทนิคเนติกส์ยังช่วยทำการบรรจุพิมพ์ลงตัวถึง ไอซี ให้ผู้เขียนต้องขอขอบคุณทุกๆท่านมาไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

12 มีนาคม 2533



หนังสืออ้างอิง

1. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, สมเกียรติ สุภเดช, "การออกแบบและสร้างมอสเฟตแบบอินแซนเนลเอ็ีเส้าพีเอ็มเอทีไอเอ็มดี", วิศวกรรมสาร, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2528
2. ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์โซลิดสเตต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ไม่ระบุปีที่พิมพ์
3. Mauro Zambuto, Semiconductor Devices, Mc Graw-Hill Book, 1989
4. B. Jayant Baliga, Modern Power Devices, John Wiley & Sons, 1987
5. Paul Richman, MOS Field-Effect Transistors and Integrated Circuits, John Wiley & Sons, 1973
6. S.M. SZE, Semiconductor Devices Physics and Technology, John Wiley & Sons, 1985



ส่วนที่ 2

การศึกษากระบวนการสร้างของมอส์ชนิดซีมอส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

จากคุณสมบัติที่เหนือกว่าทรานซิสเตอร์ประเภทอื่นหลายประการ เช่น

1. ต้องการพลังงานต่ำมาก ขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ
2. สามารถใช้ได้กับ supply voltage ได้ช่วงกว้าง (ประมาณ 3-15

โวลต์)

3. สถานะที่ output สามารถลดลงได้จนถึงระดับ ground และเพิ่มได้จนถึงระดับ supply voltage

4. spike และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีต่ำ

คุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ทำให้ CMOS IC ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง

ในรายงานฉบับนี้จะได้กล่าวถึงหลักการทำงาน กระบวนการสร้าง CMOS IC อย่างละเอียด และยังได้ออกแบบและสร้างวงจรประยุกต์ใช้งานขึ้นมาเป็น IC สำเร็จรูป เช่น Analog Switch , 2 I/P Multiplexer , Tri-state Inverter , Ring Oscillator , D-Flip Flop

CMOS IC ที่สร้างขึ้นเหล่านี้จะถูกทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติต่างๆ แล้วเก็บไว้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อให้ได้ IC ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นต่อไป

สารบัญ

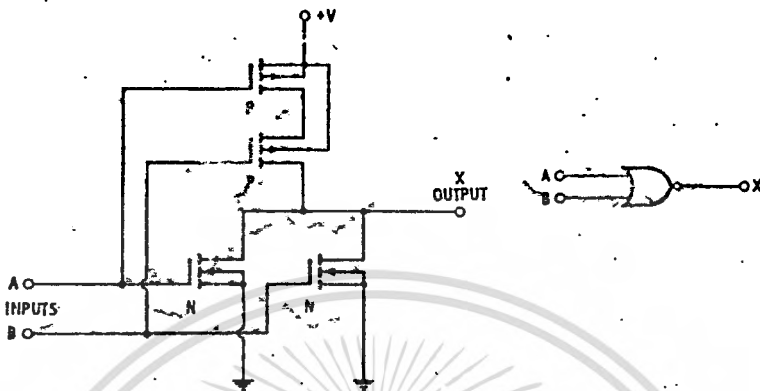
	หน้า
บทคัดย่อ	
1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีและการทำงานของ CMOS	2
3. กระบวนการสร้าง CMOS IC	3
4. PATTERN ของ IC ที่สร้างขึ้น	12
5. การทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติ	15
6. บทสรุปและวิจารณ์	16
7. ข้อควรระวังในการใช้งาน CMOS IC	17
หนังสืออ้างอิง	19



บทนำ

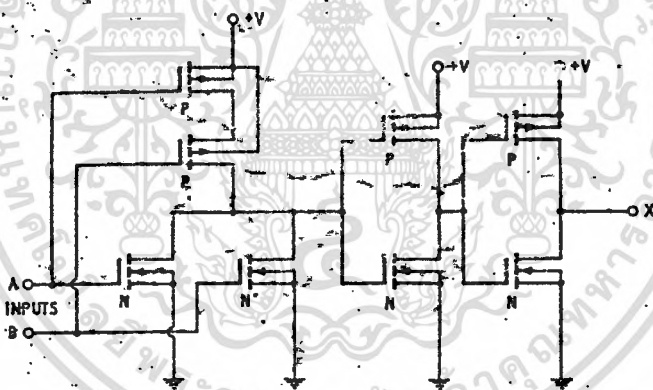
CMOS IC มีอยู่ 3 ประเภท คือ

1. CONVENTIONAL หรือ A-Series แบบนี้เป็นแบบเก่า มีราคาถูก สามารถสร้างได้โดยง่าย



(A) Unbuffered, conventional, or A-series.

2. BUFFERED หรือ B-series เป็นแบบที่พัฒนาขึ้นมาจาก A-series ใหม่คุณสมบัติในการตอบสนองต่อสัญญาณดีขึ้น



(B) Buffered or B-series.

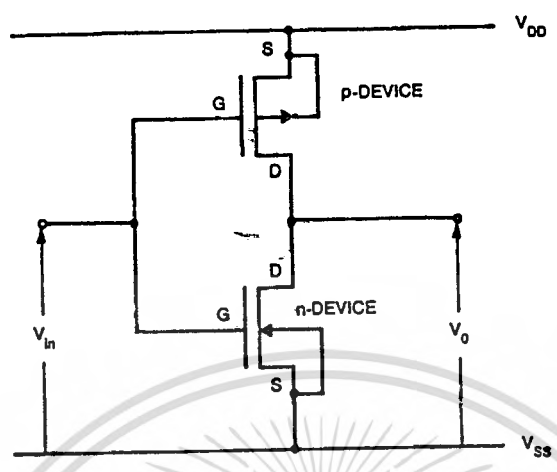
3. SOS หรือ Silicon on sapphire CMOS ใหม่นี้จะถูกสร้างอยู่บน insulating substrate ความเร็วจะสูงกว่า 2 แบบแรกมาก ทำให้ปัญหาของ Latch-up หดไป แต่ CMOS แบบนี้มีราคาแพงกว่า 2 แบบแรกมากเช่นกัน เนื่องจาก sapphire substrate ราคาแพงกว่า silicon wafer ประมาณ 3-5 เท่า และเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตก็ต่างกันออกไป

สำหรับ CMOS IC ที่สร้างขึ้นในโรงงานนี้จะเห็นแบบที่ 1 เนื่องจากข้อจำกัดในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สร้าง แต่เราก็สามารถออกแบบให้ IC ที่สร้างขึ้นมานี้มีการทำงานและคุณสมบัติเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางานของ CMOS

วงจร CMOS แบบพื้นฐานที่จะนำมาอธิบายก็คือ INVERTER ลักษณะของวงจรดังแสดงในรูป



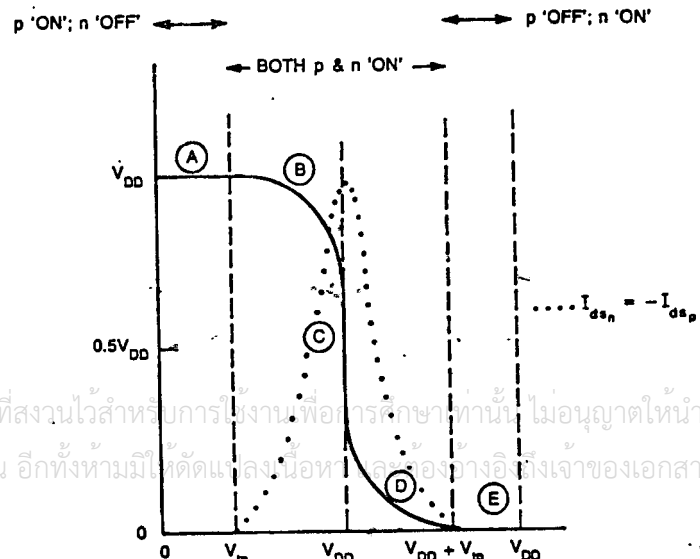
CMOS INVERTER จะประกอบไปด้วย PMOS และ NMOS ต่ออนุกรมกันอยู่ ลักษณะการทํางานของวงจรสามารถสรุปได้ดังนี้

	CUTOFF	LINEAR	SATURATION
p-device	$V_{gs_p} > V_{tp};$ $V_{in} > V_{tp} + V_{DD}$	$V_{gs_p} < V_{tp};$ $V_{in} < V_{tp} + V_{DD}$ $V_{gd_p} < V_{tp};$ $V_{in} - V_o < V_{tp}$	$V_{gs_p} < V_{tp};$ $V_{in} < V_{tp} + V_{DD}$ $V_{gd_p} > V_{tp};$ $V_{in} - V_o > V_{tp}$
n-device	$V_{gs_n} < V_{tn};$ $V_{in} < V_{tn}$	$V_{gs_n} > V_{tn};$ $V_{in} > V_{tn}$ $V_{gd_n} > V_{tn};$ $V_{in} - V_o > V_{tn}$	$V_{gs_n} > V_{tn};$ $V_{in} > V_{tn}$ $V_{gd_n} < V_{tn};$ $V_{in} - V_o < V_{tn}$

เมื่อ V_{tn} คือ Threshold voltage ของ NMOS

V_{tp} คือ Threshold voltage ของ PMOS

จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่าง input และ output ดังกราฟต่อไปนี้



กระบวนการสร้าง CMOS IC

1. แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น

-ชนิด N-type ระบาย <100>

-ค่าความต้านทานจำเพาะ เท่ากับ 4-6 ohm-cm.

แผ่น A

sheet resistance 298 305 303 300 280 289 (ohm/cm²)

slice 5.53 5.67 5.62 5.60 5.22 5.38 (ohm-cm)

แผ่น B

sheet resistance 302 273 290 274 295 296 (ohm/cm²)

slice 5.52 5.09 5.38 5.10 3.49 5.51 (ohm-cm)

-ขนาดความหนาของแผ่นผลึก ประมาณ 175-185 microns

แผ่น A 184 184 186 184 186 186 (microns)

แผ่น B 188 186 186 186 186 186 (microns)

2. การทำความสะอาดแผ่นผลึกเริ่มต้น

-ต้มในกรด HNO₃ เป็นเวลา 10 นาที

-ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI) เย็น

-ต้มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) ร้อน ครั้งที่ 1 5 นาที

-ต้มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) ร้อน ครั้งที่ 2 5 นาที

-ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI) เย็น

-เป่าให้แห้งด้วย N₂ gas

-จุ่มในกรดกัดเนื้อผิว HF 5%

15 วินาที

-ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI) เย็น

-เป่าให้แห้งด้วย N₂ gas

หมายเหตุ : น้ำบริสุทธิ์ (DI) คือ น้ำที่ปราศจากไอออนของแร่ธาตุต่างๆ ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ มีค่าพิกัดความต้านทานประมาณ 18 megaohm-cm

3. กระบวนการออกซิเดชั่นครั้งแรก

เพื่อการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 6,000 Angstroms จึงต้องทำการออกซิเดชั่น โดยผ่านแผ่นผลึกซิลิกอน ทั้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

-ออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน

1.2 ลิตร/นาที

-ออกซิเดชั่นแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน

1 ลิตร/นาที

-ออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน

1.2 ลิตร/นาที

หลังจากการออกซิเดชั่น ชั้นของออกไซด์เป็นสีเขียว เมื่อเปิดตารางดูสีเขียวจะเท่ากับความหนาขนาด 5,000-5,200 Angstroms

จากนั้นตัดแผ่น wafer A , B ออกเป็น 8 ชิ้น mark เครื่องหมายไว้ที่ด้านหลังของแผ่น โดยให้แผ่นหมายเลข 5 เป็นแผ่น monitor ทำความสะอาดหลังจากการตัดด้วย supersonic ในน้ำ DI และเป่าให้แห้ง จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้น ประมาณ 20 นาที

4. กระบวนการ Photolithography

Mask 1 - > Powell

-ทำความสะอาดและไล่ความชื้นด้วยการอบภายในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

-เคลือบน้ำยาไวแสง (Way-coat) ลงบนด้านหน้าของแผ่นด้วยเครื่อง spinner

-นำแผ่น wafer มาอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

-ทำการฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ

-ล้างด้วยน้ำยา Xylene I,II อย่างละ 1 นาที และน้ำยา Isoprophyl Alcohol I,II อย่างละ 1/2 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI

-นำแผ่น wafer มาอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

-เคลือบด้วยน้ำยา Way-coat ที่ด้านหลังของแผ่น Wafer

-นำแผ่น wafer มาอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

5. การลอกชั้นออกไซด์

-กัดออกไซด์ด้วยน้ำยา Buffer ซึ่งมีอัตราการกัดชั้นออกไซด์ ประมาณ 1,000 angstroms/นาที เป็นเวลา 5 นาที 15 วินาที ออกไซด์จะถูกกัดออกหมด โดยสังเกตได้จากหยดน้ำจะไม่เกาะที่ผิวของแผ่น wafer

6. การลอกชั้นสารไวแสง

- ต้มในกรดซัลฟริก (H₂SO₄) ประมาณ 15 นาที

7. ทำความสะอาดผิววงจรรวม

- ต้มในสารละลาย Trichloroethylene 5 นาที

- ทำความสะอาดผิวด้วยเครื่อง Super sonic ใน Acetone 3 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI) เย็น

- จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 15 วินาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI) เย็น

8. กระบวนการ P-well deposition

- เตรียมเตา เมื่อเปิดสวิตช์แล้ว รอจนกว่าเตาจะ stable ในช่วงนี้ปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลด้วยอัตราประมาณ 200 cc/min (ตั้งอุณหภูมิตามต้องการ ในที่นี้ใช้ 850 องศาเซลเซียส)

- เตรียมแผ่น source BN

- ทำการ Activation ในบรรยากาศของ O₂ = 700 cc/min เป็นเวลา 30 นาที

- ทำการ Stabilize ในบรรยากาศของ N₂ = 700 cc/min เป็นเวลา 20 นาที

- ทำการ Pre-deposition ดังนี้

 ในบรรยากาศของ N₂ = 700 cc/min เป็นเวลา 20 นาที

 ในบรรยากาศของ O₂ = 1000 cc/min เป็นเวลา 5 นาที

9. ลอกชั้น Boron-glass

- จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 15 วินาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI)

- เป่าให้แห้งด้วย N₂ gas

- ทำการวัดค่า Resistivity ได้ผลดังต่อไปนี้

 แผ่นที่ 8 526 572 642 615

 แผ่นที่ 7 483 465 470 470

 แผ่นที่ 6 529 442 492 421

 แผ่นที่ 5 (-----monitor-----)

 แผ่นที่ 4 570 620 617 635

เอกสารนี้เป็นเอกสารแผ่นที่ 3 สำหรับ 562 การ 570 และ 561 หรือ 538 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นที่ 2	613	524	525	571
แผ่นที่ 1	572	598	603	629

10. ทำความสะอาดแผ่น wafer

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 7

11. กระบวนการ P-Well drive in

-ตั้งอุณหภูมิเตาเผาที่ 1050 องศาเซลเซียส

-ออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน

1 ลิตร/นาที

-ออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซไนโตร

เจน 1 ลิตร/นาที.

12. กระบวนการ Photolithography

Mask 2 - > P⁺ channel

-เคลือบน้ำยาไวแสง (Way-coat) ลงบนแผ่น wafer ด้วยเครื่อง spinner

-นำแผ่น wafer มาอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

-ทำการฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ

-ล้างด้วยน้ำยา Xylene I,II อย่างละ 1 นาที และน้ำยา Isoprophyl Alcohol I,II อย่างละ 1/2 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI

-นำแผ่น wafer มาอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

-เคลือบด้วยน้ำยา Way-coat ที่ด้านหลังของแผ่น Wafer

-นำแผ่น wafer มาอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

13. การลอกชั้นออกไซด์

-ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 5 แต่ใช้เวลา 7 นาที

-ทำการวัดค่า Resistivity ได้ผลดังต่อไปนี้

แผ่นที่ 8 981 862 866 925

แผ่นที่ 7 793 979 854 782

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับ แผ่นที่ 6 วันที่ 692 ปี 706 ถึง 773 ออก 700 เขาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นที่ 5	(-----monitor-----)				
แผ่นที่ 4	980	978	985	974	
แผ่นที่ 3	1020	958	1060	966	
แผ่นที่ 2	958	945	958	933	
แผ่นที่ 1	960	982	952	963	

14. การลอกชั้นสารไวแสง

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 6

15. ทำความสะอาดแผ่น wafer

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 7

16. กระบวนการ Boron deposition

-ตั้งอุณหภูมิเตาที่ 970 องศาเซลเซียส

-ใช้แผ่น BN ชนิด M26 เป็นแหล่งแพร่สาร

-ทำการ Activation ในบรรยากาศของ $N_2 = 700$ cc/min เป็นเวลา 30 นาที

-ทำการ Stabilize ในบรรยากาศของ $N_2 = 700$ cc/min เป็นเวลา 20 นาที

-จุ่มแผ่น wafer ลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เพื่อกัดชั้นออกไซด์ เป็นเวลา 15

วินาที

-ทำการ Pre-deposition ดังนี้

ในบรรยากาศของ $N_2 = 700$ cc/min เป็นเวลา 30 นาที

ในบรรยากาศของ $O_2 = 1000$ cc/min เป็นเวลา 5 นาที

17. ลอกชั้น Boron glass

-จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 25 วินาที

-ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI)

-เป่าให้แห้งด้วย N_2 gas

-ทำการวัดค่า Resistivity ได้ผลดังต่อไปนี้

แผ่นที่ 8	92.4	96.4	96.1	104	105
แผ่นที่ 7	91.6	87.8	89.7	89.9	94.1
แผ่นที่ 6	95.6	102	88.5	98.6	93.3
แผ่นที่ 5	(-----monitor-----)				
แผ่นที่ 4	91.3	94.6	99.0	103	108

แผ่นที่ 3	102	105	106	100	114
แผ่นที่ 2	98.1	101	107	103	103
แผ่นที่ 1	111	121	117	134	120

-กีดชั้นออกไซด์อีก 1 1/2 นาที ด้วย Buffer

18. ทำความสะอาดแผ่น wafer

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 7

19. กระบวนการ Drive in / Reoxidation

-ตั้งอุณหภูมิเตาที่ 1,000 องศาเซลเซียส

-ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 30 นาที โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน

1 ลิตร/นาที

-ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 30 นาที โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน 1

ลิตร/นาที

-ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 30 นาที โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน

1 ลิตร/นาที

20. กระบวนการ Photolithography

Mask 3 - > n⁺ channel

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 12

21. การลอกชั้นออกไซด์

-ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4 แต่ใช้เวลา 6 นาที

-ทำการวัดค่า Resistivity ได้ผลดังต่อไปนี้

แผ่นที่ 8	180	179	175	177	199
แผ่นที่ 7	172	185	166	168	170
แผ่นที่ 6	174	166	172	163	168
แผ่นที่ 5	(-----monitor-----)				
แผ่นที่ 4	179	169	182	171	170
แผ่นที่ 3	185	179	172	175	193
แผ่นที่ 2	181	197	187	182	180
แผ่นที่ 1	238	235	236	228	201

22. การลอกชั้นสารไวแสง

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 6

23. ทำความสะอาดแผ่น wafer

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 7

24. Phosphorus deposition

แหล่งจ่ายสารเจือ ใช้แบบแผ่นแข็ง

-ช่วงที่แบ่งแผ่น monitor ออกเป็น 4 ส่วน เนื้อทดลอง Pre-deposition ดูพบว่า ถ้าทำการ Pre-deposition เป็นเวลา 12 นาที ด้วยก๊าซไนโตรเจน อัตราการไหล 600 cc/min ที่อุณหภูมิ 1040 องศาเซลเซียส และ drive in ด้วยก๊าซออกซิเจน อัตราการไหล 1,000 cc/min ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะไม่มีปัญหา จากนั้นวัด Transistor characteristic ได้ voltage breakdown ประมาณ 12 โวลท์ ดังนั้นแผ่นจริงทั้งหมดจะใช้เงื่อนไขดังข้างต้น

25. การลอกชั้น Phosphorus glass

-จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 15 วินาที

-ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI)

-เป่าให้แห้งด้วย N₂ gas

-ทำการวัดค่า Resistivity ได้ผลดังต่อไปนี้

แผ่นที่ 8	39.2	35.9	40.2	36.6	36.0	35.8
แผ่นที่ 7	44.9	46.3	49.3	45.9	47.1	45.0
แผ่นที่ 6	42.4	41.7	41.9	46.5	42.5	44.4
แผ่นที่ 5	(-----monitor-----)					
แผ่นที่ 4	25.8	26.1	31.0	27.4	28.5	29.1
แผ่นที่ 3	41.2	43.2	52.2	41.4	52.1	44.1
แผ่นที่ 2	28.8	27.7	26.4	27.9	29.3	28.0
แผ่นที่ 1	43.8	40.9	39.9	39.3	42.9	38.0

26. ทำความสะอาดแผ่น wafer

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 7

-ตั้งอุณหภูมิเตาที่ 1,000 องศาเซลเซียส อัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน

1.2 ลิตร/นาที

-ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 15 นาที

-ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 20 นาที

-ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 15 นาที

28.กระบวนการ Photolithography

Mask 4 - > Gate oxide

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 12

-หมายเหตุ : ไม่ต้องทำ way coat ด้านหลัง

29.การลอกชั้นออกไซด์

-กัดออกไซด์ด้วยน้ำยา Buffer Etchant Tospolona เวลาประมาณ 2 นาที

30.การลอกชั้นสารไวแสง

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 6

31.ทำความสะอาดแผ่น wafer

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 7

-หมายเหตุ : ช่วงที่ต้องเน้นความสะอาดเป็นพิเศษ โดยการเปลี่ยนน้ำ DI บ่อยๆ เนื่องจากจะสร้าง gate oxide ในชั้นต่อไป

32.การสร้าง gate oxide

-ตั้งอุณหภูมิเตาเผาที่ 980 องศาเซลเซียส

-ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 50 นาที โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน

1 ลิตร/นาที

-ทำการ annealing เป็นเวลา 10 นาที โดยอัตราการไหลผ่านของก๊าซไนโตรเจน 1 ลิตร/นาที

33.กระบวนการ Photolithography

Mask 5 - > Contact

-ทำเช่นเดียวกับข้อ 12

-หมายเหตุ : ไม่ต้องทำ way-coat ด้านหลัง

34. การลอกชั้นออกไซด์

- กัดออกไซด์ด้วยน้ำยา Buffer สำหรับ Oxidation

35. การลอกชั้นสารไวแสง

- ทำเช่นเดียวกับข้อ 6

36. ทำความสะอาดแผ่น wafer

- ทำเช่นเดียวกับข้อ 7

37. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

- ใช้เครื่อง vaccum evaporator ทำการเคลือบแผ่น wafer ด้วยอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 ไมครอน

38. กระบวนการ Photolithography

Mask 6 - > Contact

- ทำเช่นเดียวกับข้อ 12 แต่ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) แทน way-coat

39. การสกัดชั้นอลูมิเนียม

- ใช้ Phosphoric acid อุ่นในจานแก้วให้ร้อนประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 นาที

40. การลอกชั้นสารไวแสง

- จุ่มแผ่น wafer ลงใน Acetone ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI) เย็น ประมาณ 10 นาที
- เป่าให้แห้งด้วย N_2 gas

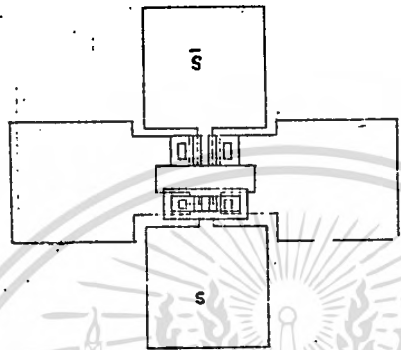
41. กระบวนการ Sintering

- ทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน อัตราการไหล 1000 cc/min ที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที

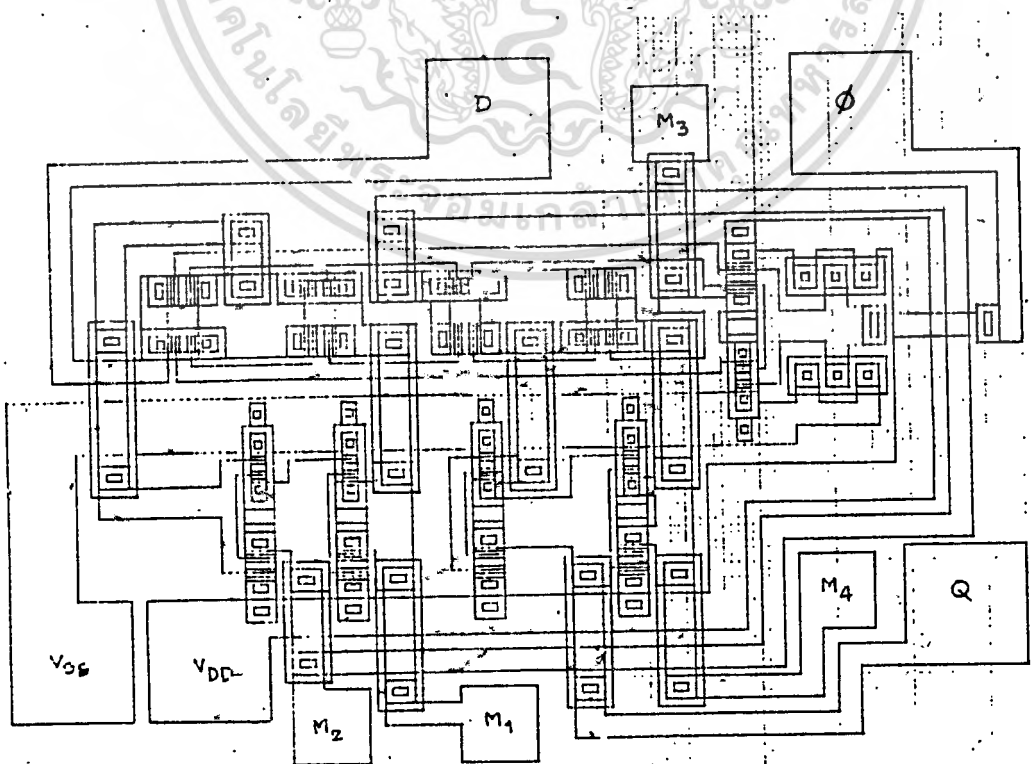
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PATTERN ของ IC ที่ได้สร้างขึ้น

TRANSMISSION GATE

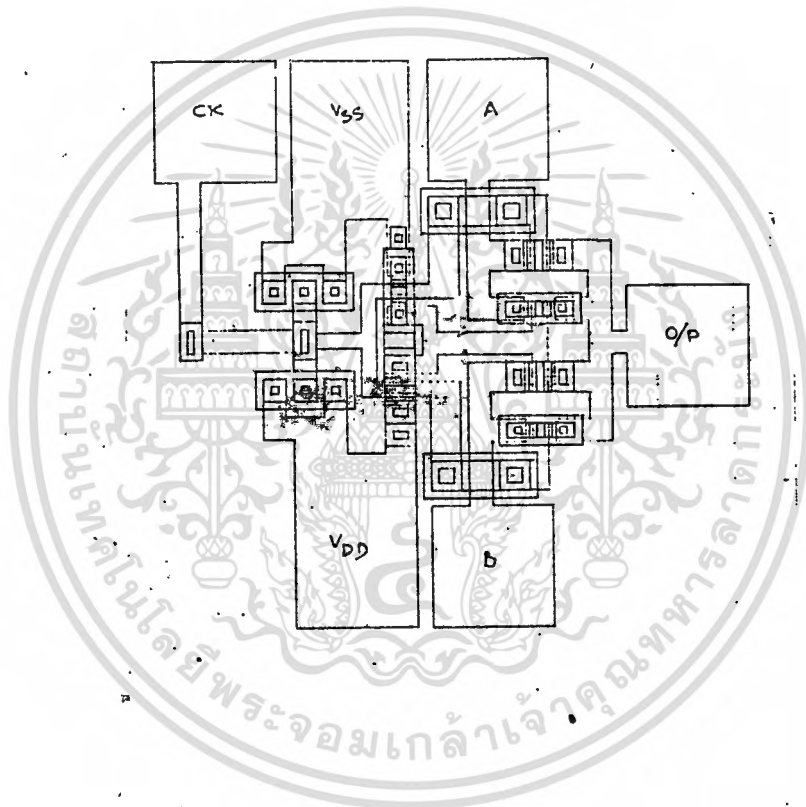


2 PHASE D-FLIP FLOP



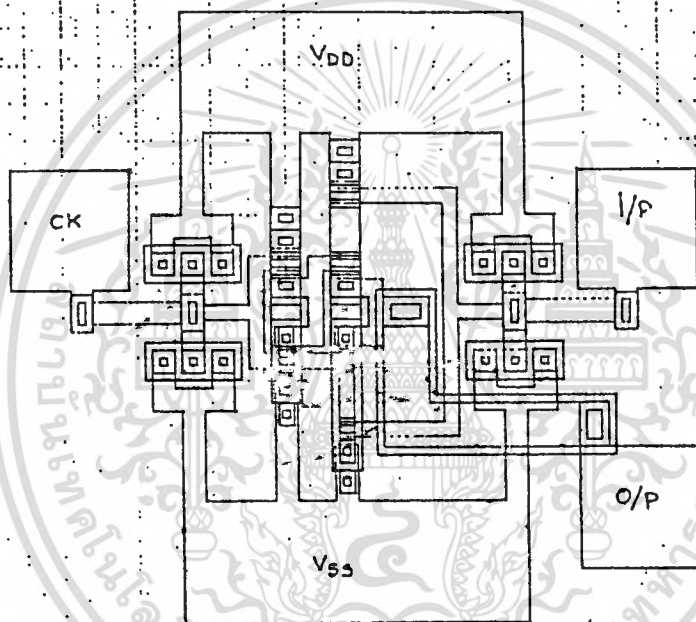
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 INPUT MULTIPLEXER



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

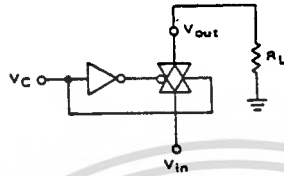
TRI STATE INVERTER



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติ

1. R_{ON} Characteristics



($V_{IN} = V_C \cdot R_L = 10 \text{ KiloOhms}$)

$V_C = + 5 \text{ V}_{DC}$

$R_{ON} = 965 \text{ Ohms}$

$V_C = + 7.5 \text{ V}_{DC}$

$R_{ON} = 915 \text{ Ohms}$

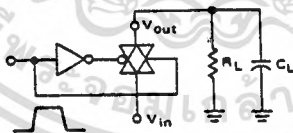
$V_C = + 10 \text{ V}_{DC}$

$R_{ON} = 695 \text{ Ohms}$

$V_C = + 15 \text{ V}_{DC}$

$R_{ON} = 668 \text{ Ohms}$

2. Propagation Delay Time



($V_{IN} \text{ to } V_{OUT} \cdot V_C = 5 \text{ V}_{DC} \cdot R_L = 15 \text{ pF}$)

$V_{IN} = + 5 \text{ V}_{DC}$

$t_{PLH} = 90 \text{ ns}$

$t_{PHL} = 150 \text{ ns}$

$V_{IN} = + 10 \text{ V}_{DC}$

$t_{PLH} = 60 \text{ ns}$

$t_{PHL} = 80 \text{ ns}$

บทสรุปและวิจารณ์

การควบคุมขั้นตอนในกระบวนการสร้างอย่างละเอียด ถูกต้อง จะทำให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ รายงานฉบับนี้ได้เสนอขั้นตอนกระบวนการสร้าง CMOS IC อย่างละเอียด การควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ , เวลา , ความสะอาด สิ่งต่างๆเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญไม่ด้อยไปกว่าขั้นตอนการออกแบบเลย

CMOS IC ที่สร้างขึ้นมาได้นี้ แม้ว่าคุณสมบัติต่างๆ ยังไม่อาจทัดเทียมได้กับ IC ที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด แต่ว่าสิ่งที่ตัวผู้จัดทำมุ่งหวังและเป็นจุดประสงค์สำคัญของโครงการนี้ก็คือ การได้มีโอกาสศึกษาถึงกระบวนการสร้าง การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆ สิ่งต่างๆดังกล่าวนี้จะ เป็นประโยชน์สำหรับการเฝ้าและปรับปรุงคุณสมบัติของตัว IC ต่อไปในภายภาคหน้า

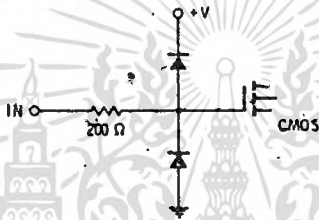


ข้อควรระวังในการใช้งาน CMOS IC

ปกติที่ input ของ CMOS IC จะเป็นวงจรเปิด แต่ที่จนวนไดโอดเลดทริกซึ่งบางมากๆ เมื่อเกิดประจุไฟฟ้าที่ขาแยกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงมาก จนสามารถทำลายตัว IC ให้เสียหายได้ ดังนั้นจึงควรเก็บ IC ไว้บนโฟม เพื่อป้องกันประจุไฟฟ้าดังกล่าวขณะที่ไม่ได้ใช้งาน

แต่โดยทั่วไปแล้ว CMOS IC มักจะมีวงจรป้องกันที่ภาค input วงจรป้องกันมีหลายลักษณะด้วยกันเช่น

1. Double diode เมื่อ input เข้ามามีค่าสูงกว่า $+V$ จะทำให้ D_1 On และถ้า input เข้ามามีค่าต่ำกว่า ground จะทำให้ D_2 On



2. Zener to ground diode จะนำกระแสลบเมื่อ input เข้ามามีค่าต่ำกว่า ground และจะนำกระแสแบบ Zener diode เมื่อ input เข้ามาสูงกว่า $+V$



สำหรับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่ CMOS ปกติควรจะใช้แรงดันระหว่าง 3 ถึง 15 โวลต์ ถึงแม้ว่าตัว IC จะสามารถทนแรงดันได้ถึง 20 โวลต์ ค่าแรงดันระหว่าง 9 ถึง 12 โวลต์ IC จะทำงานด้วยความเร็วสูง ถ้าลดแรงดันเหลือ 5 โวลต์ ความเร็วจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง แต่สามารถทำให้วงจรใช้แรงดันร่วมกับวงจร TTL และวงจร interface อื่นๆ ถ้าใช้แรงดันมากกว่า 15 โวลต์ขึ้นไป จะทำให้ตัว IC ร้อน ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ CMOS กับแรงดันสูงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำ CMOS มาต่อเป็นวงจร มีหลักการจำดังนี้

1. จะต้องต่อขา input ลงจุดใดจุดหนึ่งเสมอ จะปล่อยให้ลอยไว้ไม่ได้
2. ถึงแม้จะมีวงจรป้องกันภายในตัว ก็ไม่ควรป้อน input สูงหรือต่ำเกินไป
3. ป้องกันประจุไฟฟ้าสถิตจากการจับหรือแตะด้วยนิ้วมือ
4. สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ควรจะมี rise time และ fall time ต่ำเพื่อป้องกันปัญหา

clock skew



หนังสืออ้างอิง

1. ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์. "เทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์โซลิตสแตท" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. Don Lancaster. "CMOS COOKBOOK" Howard W.Sams & Co.,Inc. 1977
3. Neil H.E. Weste and Kamran Eshraghian. "PRINCIPLES OF CMOS VLSI DESIGN" Addison-Wesley Publishing Company 1985
4. DeWITT G.ONG, "Modern MOS Technology:Processes,Devices,and Design" McGraw-Hill Book Company 1984

