

รายงานการวิจัย ฉบับสมบูรณ์

การหาพารามิเตอร์ เพื่อการจำลองแบบอุปกรณ์มอส  
MOS Parameterization for Device Modeling

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช

นาย สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

นาย วีระ เพ็งจันทร์

สถานที่ทำการวิจัย

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนจาก

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ปีงบประมาณ 2540

RCH

TK

7874

๗๘๓๕

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 30935

วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณชนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทคัดย่อ</b>	<b>I</b>
<b>บทที่ 1 ทฤษฎีการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์</b>	<b>1</b>
1.1 โครงสร้างของมอส	1
1.2 สัญญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์	2
1.3 ชนิดของมอสทรานซิสเตอร์	4
1.4 หลักการทำงานของมอส	6
1.5 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์	10
1.6 แรงดันขีดเริ่ม	14
1.7 ตัวเก็บประจุแบบมอส	17
<b>บทที่ 2 การจำลองแบบอุปกรณ์มอส</b>	<b>25</b>
2.1 แบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์ใน PSPICE	25
<b>บทที่ 3 การทดลอง และผลการทดลอง</b>	<b>29</b>
3.1 การทดลองเพื่อศึกษาการควบคุมแรงดันขีดเริ่มของโครงสร้างมอส	29
3.2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์หาค่าประจุที่สถานะผิวของห้องปฏิบัติการ	29
3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของประจุที่ผิวที่มีต่อแรงดันขีดเริ่ม	32
3.4 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือในชั้นฐานรอง	33
3.5 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับค่าความหนาของเกตอ็อกไซด์	35
3.6 การทดลองเพื่อศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์	38
3.7 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์	42
3.8 การทดลองเพื่อศึกษาค่าตัวแปรทางกายภาพ และผลจากการจำลองแบบของมอสทรานซิสเตอร์	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ภาคผนวก (ก) โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์  
(ข) กราฟ  $V_{th}-Q_{ss}/q$  ที่  $N_{sub}$  ค่าต่างๆ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การหาพารามิเตอร์ เพื่อการจำลองแบบอุปกรณ์ มอส

## MOS Parameterization for Device Modeling

รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ วีระ เพ็งจันทร์

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีบทบาทและสำคัญ ในงานระบบไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ ก็คือ วงจรรวม หรือ ไอซี (I.C. :Integrated Circuits) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วงจรรวมชนิด มอส(MOS ICs) ถือได้ว่าเป็นชิ้นส่วนหลัก ของอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์การสื่อสาร และอุปกรณ์ระบบควบคุม ต่างๆ เป็นต้น การออกแบบ และสร้างวงจรรวมชนิดมอส จึงเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญยิ่ง อย่างไรก็ดี ขั้นตอนของการสร้าง เป็นขั้นตอนที่สิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบที่ถูกต้อง แม่นยำ และสามารถ กำหนดคุณสมบัติได้อย่างถูกต้อง ซึ่งทำได้โดยวิธีการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะสร้างจริง

งานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยเบื้องต้น ที่จะหาพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อนำ มาใช้ในการจำลองแบบ อุปกรณ์มอส ด้วยโปรแกรม PSPICE โดยเริ่มจากการศึกษา มอสทรานซิสเตอร์ และวิเคราะห์จากทฤษฎีการทำงาน รวมทั้งการสร้าง และทดลองเพื่อ เก็บข้อมูลในการหาพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือค่าความหนาแน่นของประจุที่ผิว ( $Q_{ss}/q$ ) ซึ่งจากการทดลองพบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่แผ่น ผลึกฐานรอง โดยมีค่าเฉลี่ยราว  $5.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  ข้อมูลนี้ถูกนำไปใช้ในการจำลองแบบ เพื่อศึกษาการควบคุมแรงดันขีดเริ่ม(V<sub>T</sub>)ของมอสทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด เอ็นมอส และ พีมอส โดยผลของความหนาของชั้นออกไซด์ที่ส่วนเกต(T<sub>ox</sub>) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของแผ่นผลึกฐานรอง(N<sub>sub</sub>) และโดยผลของความหนาแน่นของประจุที่ผิว( Q<sub>ss</sub>)

นอกจากนี้ ได้ทำการทดลองสร้างอุปกรณ์มอส และนำผลการทดลองมาเปรียบ เทียบกับผลการจำลองแบบ ซึ่งพบว่าให้ผลเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้ เพื่อเป็นมาตรฐานของกระบวนการออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ มอส ของห้องปฏิบัติการโซลิตสเทท ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ได้เป็นอย่างดี

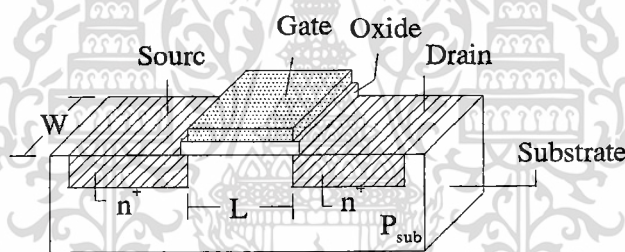
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### ทฤษฎีการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์

#### 1.1 โครงสร้างของมอส

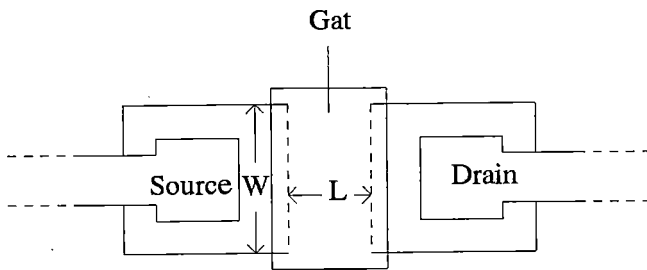
มอส (MOS) เป็นชื่อที่ได้จากการประกอบกันของเกตโลหะ (Metal gate) ที่อยู่บนชั้นของอ็อกไซด์ (Oxide :  $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งอยู่บนฐานรองซิลิกอน (Silicon)  $\text{SiO}_2$  คือซิลิกอนไดอ็อกไซด์ (Silicondioxide) ซึ่งจะเป็นฉนวนที่อยู่ระหว่างชั้นของเกตโลหะและซิลิกอน



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของมอสทรานซิสเตอร์ที่มีช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น

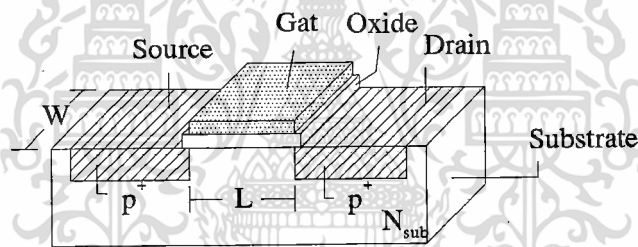
รูปที่ 1.1 แสดงถึงโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ ที่มีช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น (ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นมอส) ส่วนของฐานรองจะเป็นแผ่นซิลิกอน (silicon wafer) ที่ได้จากการเติมสารเจือชนิดพี ส่วนของซอส (Source:S) และเดรน (Drain:D) จะเป็นชั้นที่ได้จากการแพร่สารเจือชนิด  $n^+$  ( $n^+$  หมายถึงสารเจือชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงๆ) กับขั้วโลหะ(ปกติจะเป็นอลูมิเนียม) ทำให้บริเวณนี้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นชั้นในฐานรอง ขั้วเกต(Gate:G) เป็นส่วนที่ทำให้ขั้วโลหะแยกตัวออกจากผิวซิลิกอน โดยเป็นชั้นบางๆของซิลิกอนไดอ็อกไซด์ ความหนาของชั้นซิลิกอนไดอ็อกไซด์นี้โดยทั่วไปจะหนาประมาณ  $1000 \text{ \AA}$  (อังสตรอม)หรือ  $0.1 \text{ \mu m}$  เนื่องจากความเป็นฉนวนนี้เอง จึงทำให้ค่าความต้านทานขาเข้าที่ส่วนเกตมีค่าสูง  $W$  คือความกว้างของช่องทางเดินกระแส (channel width) ซึ่งเป็นความกว้างของบริเวณสารเจือที่ขั้วเดรนหรือซอส(ปกติขั้วเดรนหรือซอสจะมีขนาดเท่ากัน) ส่วน  $L$  คือความยาวช่องทางเดินกระแส (channel length) ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างส่วนเดรนและซอส ดังรูปที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 แสดงภาพด้านบนของมอสทรานซิสเตอร์ เพื่อให้เห็นความกว้าง  $W$  และความยาว  $L$  ของช่องทางเดินกระแส

ในลักษณะเดียวกันมอสทรานซิสเตอร์ที่มีช่องทางเดินกระแสชนิดพี (ทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็มอส) จะมีฐานรองซิลิกอนที่เติมสารเจือชนิดเอ็น บริเวณส่วนของเดรนและซอสจะถูกรั่วด้วยสารเจือชนิดพี อย่างเข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็มอส

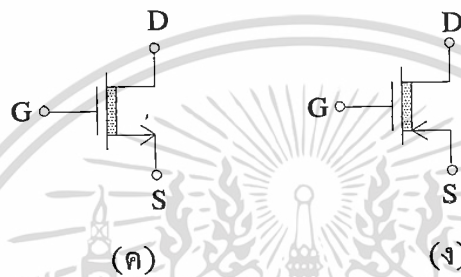
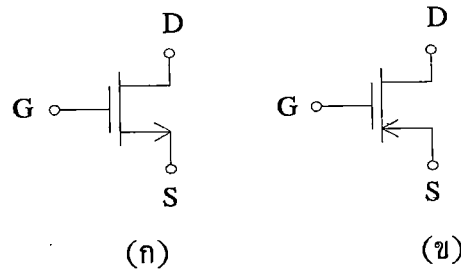
## 1.2 สัญลัษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์

สัญลัษณ์ทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ตามความนิยม ดังนี้

สัญลัษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ แบบ 3 ขั้ว

สัญลัษณ์แบบนี้จะหมายถึง มอสทรานซิสเตอร์ที่ทำการลัดวงจร (short) ส่วนของขั้วซอสเข้ากับเนื้อสาร (bulk) กรณีนี้จะใช้เมื่อไม่ต้องการใช้ศักดาที่ส่วนฐานรอง ( $V_{SB} = 0$ ) ตัวอย่างสัญลัษณ์ที่ใช้จะแสดงดังรูปที่ 1.4

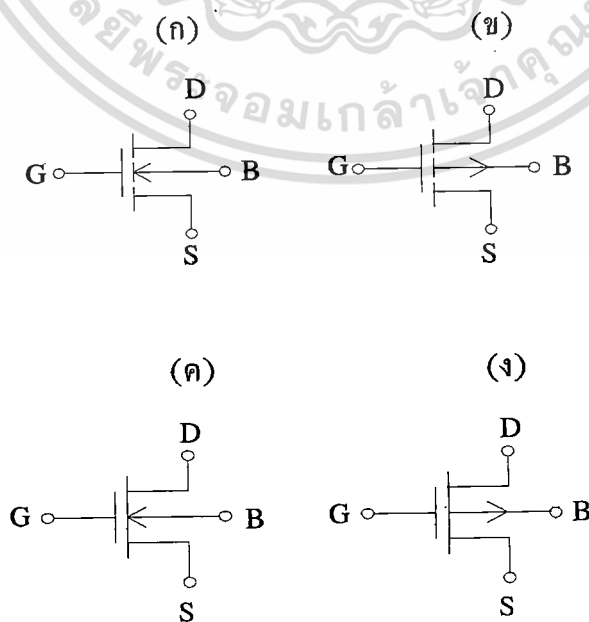
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ แบบ 3 ขั้วโดย  $V_{SB} = 0$  (ก) เอ็นฮานซ์-เมนต์เอ็นมอส (ข) เอ็นฮานซ์เมนต์พีมอส (ค) ดีพลีชั่นเอ็นมอส (ง) ดีพลีชั่นพีมอส

สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ แบบ 4 ขั้ว

สัญลักษณ์แบบนี้หมายถึง มอสทรานซิสเตอร์ที่ขั้วของซอสไม่ลัดวงจรกับเนื้อสาร กรณีนี้จะใช้เมื่อต้องการที่จะให้ศักดาที่ฐานรอง ( $V_{SB} \neq 0$ ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 1.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.5 แสดงตัวอย่างสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แบบ 4 ชั้น โดย  $V_{SB} \neq 0$  (ก) เอ็นฮานซ์-เมนท์เอ็นมอส (ข) เอ็นฮานซ์เมนท์พีมอส (ค) ดีพลีชันเอ็นมอส (ง) ดีพลีชันพีมอส

### 1.3 ชนิดของมอสทรานซิสเตอร์

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีอิเล็กตรอนหรือประจุลบ เป็นประจุพาหะส่วนมาก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีโฮลเป็นประจุพาหะส่วนมาก ดังนั้นมอสทรานซิสเตอร์เมื่อแบ่งตามชนิดของประจุพาหะที่บริเวณช่องทางเดินกระแสในขณะที่เกิดกระแสทรินท์ จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. เอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ (N-channel MOS transistor : NMOS) หมายถึง มอสทรานซิสเตอร์ ที่มีอิเล็กตรอนหรือประจุลบเป็นพาหะส่วนมาก ที่ทำให้เกิดกระแสทรินท์ และมีส่วนเดรนและส่วนซอส เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N type semiconductor)

2. พี-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ (P-channel MOS transistor : PMOS) หมายถึง มอสทรานซิสเตอร์ ที่มีโฮลหรือประจุบวก เป็นพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสทรินท์ และมีส่วนเดรนและส่วนซอส เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P type semiconductor)

ในสภาวะปกติก่อนการให้ไบอัส (bias) กับทรานซิสเตอร์ บริเวณช่องทางเดินกระแสของมอสทรานซิสเตอร์ อาจจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันกับส่วนเดรนและส่วนซอส หรือต่างชนิดกันก็ได้ ทำให้สามารถแบ่งประเภทของสารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสได้ดังนี้

1. ดีพลีชัน (depletion) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสที่เป็นชนิดเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำของส่วนเดรนและส่วนซอส

2. เอ็นฮานซ์เมนท์ (enhancement) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสที่ต่างชนิดกันกับสารกึ่งตัวนำของส่วนเดรนและส่วนซอส

ดังนั้น มอสทรานซิสเตอร์ เมื่อแบ่งตามลักษณะการควบคุมปริมาณประจุพาหะในช่องทางเดินกระแส จะแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังนี้

1. เอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนท์โหมด มอสทรานซิสเตอร์ (N-channel enhancement mode MOS transistor) หมายถึง เอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ที่ในสภาวะปกติก่อนการให้ไบอัสที่เกต จะมีบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และเมื่อขณะใช้งาน โดยการให้ศักดาที่เกตจะเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง จะทำให้บริเวณช่องทางเดินกระแสที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ถูกเหนี่ยวนำให้เปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

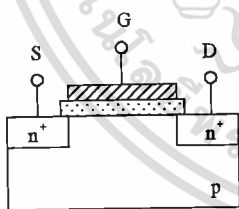
2. พี-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนท์โหมด มอสทรานซิสเตอร์ (P-channel enhancement mode MOS transistor) หมายถึง พี-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ที่ในสภาวะปกติก่อนการให้ไบอัสที่เกต จะมีบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และเมื่อขณะใช้งาน โดยการให้ศักดาที่เกตจะเป็นลบเมื่อเทียบกับฐานรอง จะทำให้บริเวณช่องทางเดินกระแสที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ถูกเหนี่ยวนำให้เปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

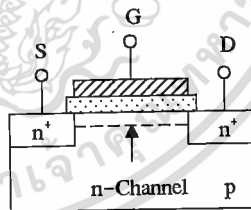
3. เอ็น-แชนแนล ดีพลีชันโหมด มอสทรานซิสเตอร์ (N-channel depletion mode MOS transistor) หมายถึง เอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ที่ในสภาวะปกติก่อนการให้ไบอัสที่เกต จะมีบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ทำให้เกิดการเชื่อมต่อเนื้อสารกึ่งตัวนำระหว่างส่วนเดรนและส่วนซอสเข้าด้วยกัน เป็นผลให้เกิดกระแสทรานซิสต์ที่ที่มีความต่างศักย์ระหว่างส่วนเดรนและส่วนซอส ในการควบคุมปริมาณกระแสทรานซิสต์นี้สามารถทำให้ปริมาณกระแสทรานซิสต์เพิ่มขึ้นได้ โดยการให้ศักย์ที่เกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง และทำให้ปริมาณกระแสทรานซิสต์ (drift current) ลดลงได้ โดยการให้ศักย์ที่เกตเป็นลบเมื่อเทียบกับฐานรอง

4. พี-แชนแนล ดีพลีชันโหมด มอสทรานซิสเตอร์ (P-channel depletion mode MOS transistor) หมายถึง พี-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ที่ในสภาวะปกติก่อนการให้ไบอัสที่เกต จะมีบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้เกิดการเชื่อมต่อเนื้อสารกึ่งตัวนำระหว่างส่วนเดรนและส่วนซอสเข้าด้วยกัน เป็นผลให้เกิดกระแสทรานซิสต์ที่ที่มีความต่างศักย์ระหว่างส่วนเดรนและส่วนซอส ในการควบคุมปริมาณกระแสทรานซิสต์นี้สามารถทำให้กระแสทรานซิสต์เพิ่มขึ้นได้ โดยการให้ศักย์ที่เกตเป็นลบเมื่อเทียบกับฐานรอง และทำให้ปริมาณกระแสทรานซิสต์ลดลงได้ โดยการให้ศักย์ที่เกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง

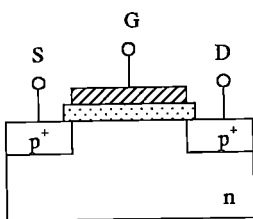
รูปที่ 1.6 แสดงโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่างๆ จะเห็นว่าในลักษณะ ของเอ็น ฮานซ์เมนต์โหมด จะไม่มีช่องทางเดินกระแสเกิดขึ้นก่อนการให้ไบอัสที่เกต ส่วนลักษณะของ ดีพลีชัน โหมด จะมีช่องทางเดินกระแสเชื่อมต่อระหว่างส่วนของเดรนและส่วนซอส



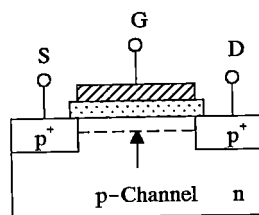
(ก)



(ข)



(ค)



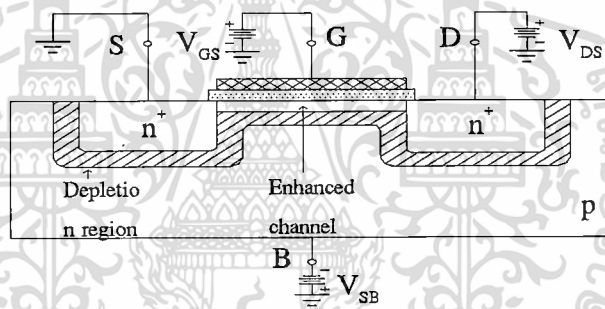
(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.6 แสดงลักษณะโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ (ก) เอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (ข) เอ็น-แชนแนล ดีพลีชันโหมด (ค) พี-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (ง) พี-แชนแนล ดีพลีชันโหมด

#### 1.4 หลักการทำงานของมอส

โครงสร้างของเอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ในรูป 1.7 แสดงให้เห็นถึงการให้ไบอัสแก่มอสทรานซิสเตอร์ โดยที่แรงดันเดรน-ซอส  $V_{DS} = (V_D - V_S)$  แรงดันเกต-ซอส  $V_{GS} = (V_G - V_S)$  และแรงดันซอส-ฐานรอง  $V_{SB} = (V_S - V_B)$



รูปที่ 1.7 แสดงการให้ไบอัสแก่มอสทรานซิสเตอร์

ส่วนของซอสและฐานรองจะถูกต่อลงกราวด์ (ground)  $V_S = 0 = V_B = V_{SB}$  แรงดันเกต-ซอส  $V_{GS}$  จะถูกใช้เพื่อการเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนในชั้นกลับ (inversion layer) ภายใต้ชั้นเกตออกไซด์ ซึ่งปกติแล้วแรงดันที่เกตจะเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง และเมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอส ก็จะทำให้กระแสเดรน (drain current :  $I_D$ ) ไหลได้ทันที ดังนั้น กระแสเดรนที่ไหลจะมากน้อยเพียงใด จึงขึ้นอยู่กับแรงดันเกต-ซอส และแรงดันที่ขั้วเดรน-ซอส นั้นเอง

เมื่อพิจารณาการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ จะพิจารณาเป็นช่วง ๆ ได้ดังนี้

1. ช่วงคัทออฟ (cut-off region) สำหรับกรณีนี้ แรงดันเกต-ซอส มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม สมบูรณ์, เมื่อแรงดัน  $V_{GS}$  ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดชั้นกลับ ทำให้ช่องทางเดินกระแสไม่เกิดขึ้น ดังนั้น แม้ว่าแรงดันเดรน-ซอส  $V_{DS}$  จะถูกให้เข้าไป ( $V_{DS} \neq 0$ ) ก็จะไม่มีการไหล ( $I_D \neq 0$ )

รูปที่ 1.8 (ก) แสดงถึงช่วงคัทออฟของมอสทรานซิสเตอร์

2. ช่วงเชิงเส้น (linear region) หรืออาจเรียกว่า ช่วงการทำงานไม่อิ่มตัว (nonsaturated) เมื่อแรงดันเกต-ซอส เพิ่มขึ้น กระทั่ง  $V_{GS} > V_{TO}$  กระแสเดรนจะเริ่มไหล ซึ่งเป็นผลมาจาก (1) มีอิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นชั้นกลับภายใต้ชั้นเกตออกไซด์ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง ชั้นกลับที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า ช่องทางเดินกระแส (channel) ซึ่งจะเชื่อมต่อสารกึ่งตัวนำส่วนเดรนและส่วนซอสเข้าด้วยกัน และ (2) มีสนามไฟฟ้าในแนวอนภายในช่องทางเดินกระแส เนื่องจากความแตกต่างของศักดา  $V_{DS}$  จึงทำให้กระแสเดรนเกิดขึ้น เมื่อกระแสเดรนในมอสทรานซิสเตอร์ไหล จะเรียกว่า การทำงานในโหมดแอกทีฟ (active mode) ในช่องแอกทีฟโหมด จะแสดงคุณสมบัติของกระแสที่แตกต่างกัน 2 แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับ ความสัมพันธ์ของค่า  $V_{DS}$  กับ  $(V_{GS} - V_{TO})$  เมื่อ  $V_{DS}$  มีค่าต่ำหรือ  $V_{DS} < (V_{GS} - V_{TO})$  ช่องทางเดินกระแสจะเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.8 (ข) โดยมอสทรานซิสเตอร์ช่วงนี้เรียกว่า อยู่ในช่วงการทำงานแอกทีฟของโหมดการทำงานไม่อิ่มตัว (nonsaturated mode) สังเกตได้ว่า ที่แรงดันเดรน-ซอส ค่าต่ำๆ ขนาดของช่องทางเดินกระแสจะมีลักษณะปลายเรียวเล็กลงทางด้านเดรนเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันช่องทางเดินกระแส  $V$  ที่คงอยู่ในชั้นกลับ เนื่องจาก  $V_{DS}$  แรงดันช่องทางเดินกระแสจะสมมติว่ามีค่ามากที่สุด  $V = V_{DS}$  ที่บริเวณเดรน  $n^+$  และลดลงที่  $V_S = 0$  ที่ซอส จนกระทั่งเมื่อให้แรงดันเกต-ซอสเข้าไป ทำให้เกิดเป็นชั้นกลับขึ้น ดังนั้น ช่องทางเดินจึงให้เกิดการเชื่อมต่อจากซอสไปยังเดรน

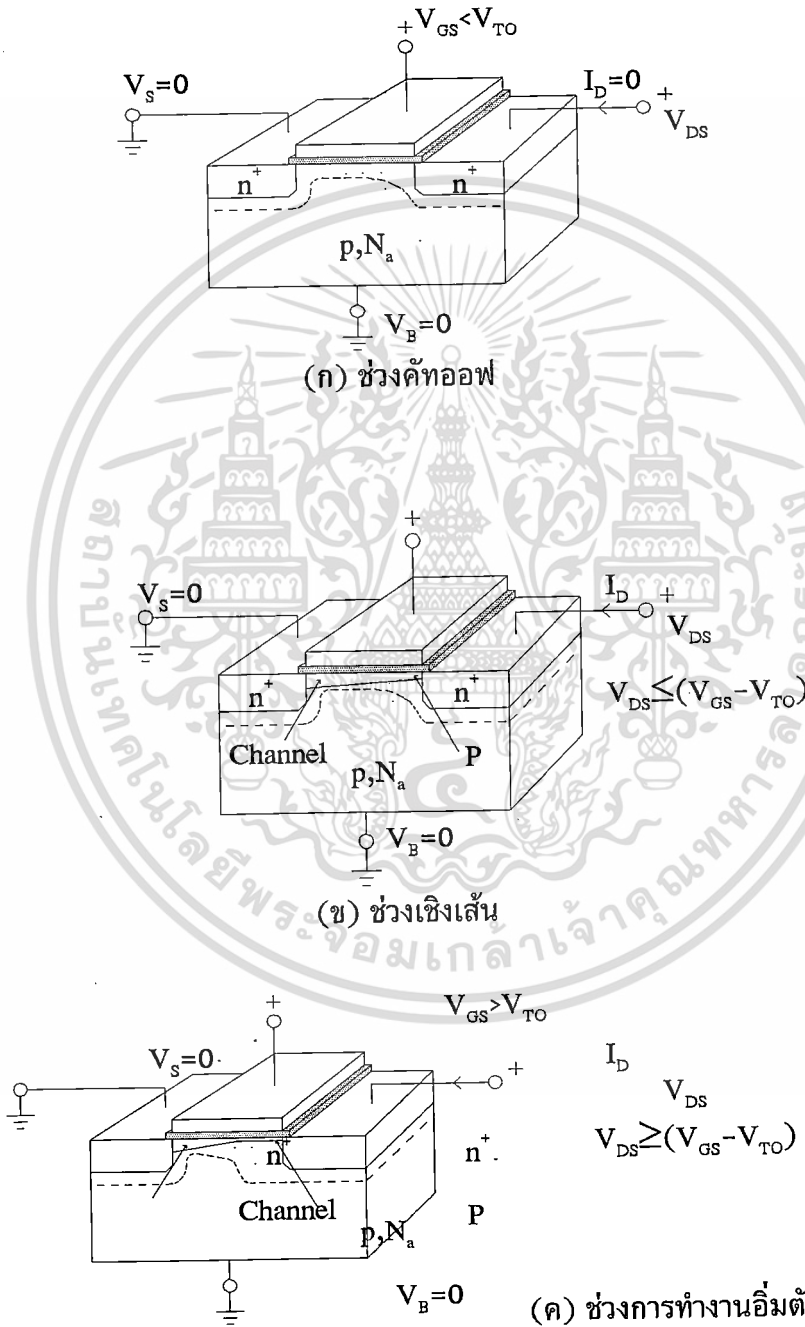
3. ช่วงการทำงานอิ่มตัว (saturated region) ถ้าให้ไบอัสทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นจนกระทั่ง  $V_{DS} > (V_{GS} - V_{TO})$  จะทำให้มอสทรานซิสเตอร์อยู่ในช่วงการทำงานอิ่มตัว ดังแสดงในรูปที่ 1.8 (ค) ช่วงการทำงานอิ่มตัว จะทำให้เกิดช่องทางเดินกระแสชนิดพินช์-ออฟ (pinch-off) ขึ้น ซึ่งความหนาของช่องทางเดินจะลดลงและจะแคบที่สุดเมื่อไปถึงบริเวณเดรน  $n^+$

เมื่อพิจารณาถึงหลักการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์จะเห็นได้ว่าที่  $V_{GS} < V_{TO}$  ไม่มีการเหนี่ยวนำช่องทางเดินระหว่างชั้นซอสและเดรน ต่อมาเมื่อให้แรงดันค่าบวก  $V_{GS1}$  ที่มากกว่าค่า  $V_{TO}$  เข้าที่ขั้วเกต ช่องทางเดินก็จะถูกเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างขั้วซอสและขั้วเดรน และเมื่อมีการให้แรงดันค่าบวกน้อยๆ  $V_{DS}$  ที่ขั้วเดรนกระแสก็จะเริ่มไหล อย่างไรก็ตามที่  $V_{DS}$  ค่าน้อยๆ จะทำให้ไม่เกิดความแตกต่างของศักดาที่ผิว บริเวณส่วนเดรนและส่วนซอส ดังนั้น ความเข้มข้นอิเล็กตรอนตลอดช่องทางเดินกระแสจะยังคงเท่ากัน ดังรูปที่ 1.8 (ก) ด้วยเหตุนี้เองทำให้ช่องทางเดินกระแสมีพฤติกรรมคล้ายตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทาน  $R$  ดังสมการ

$$R = \frac{L}{\mu_n W Q_n} \quad (1.1)$$

โดย  $W$  และ  $L$  คือ ความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส,  $\mu_n$  เป็นค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน และ  $Q_n$  เป็นประจุอิเล็กตรอนต่อหน่วยพื้นที่ของชั้นกลับ

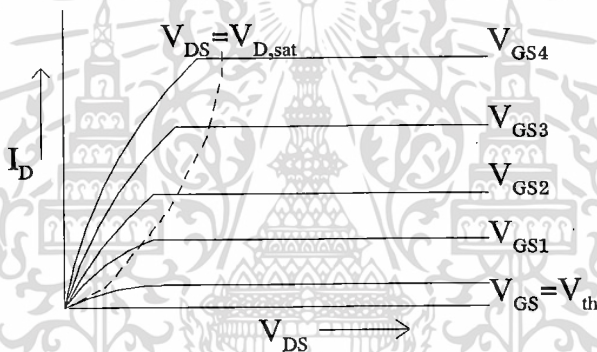
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.8 แสดงช่วงการทำงานพื้นฐานของมอสทรานซิสเตอร์ในภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้ค่าของ  $V_{DS}$  เพิ่มขึ้น จะทำให้ศักดาที่ตกคร่อมช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้นด้วย จึงเป็นสาเหตุให้แรงดันระหว่างเกตและชั้นกลับใกล้ๆ ขั้วเดรนลดลง เป็นผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในช่องทางเดินกระแสใกล้ๆ ขั้วเดรนมีค่าลดลง ซึ่งจะลดลงเป็นจำนวน  $Q_n$  และ ทำให้ค่าความต้านทานช่องทางเดินกระแส  $R$  เพิ่มขึ้น ดังนั้นกราฟของ I-V จึงเริ่มโค้งลงจากเส้นค่าตัวต้านทานเริ่มต้น (initial resistor line) ดังแสดงในรูปที่ 1.9 เมื่อเพิ่มค่า  $V_{DS}$  ต่อไปอีก แรงดันตกคร่อมอ็อกไซด์บริเวณใกล้ๆ ชั้นเดรนก็จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าต่ำกว่าที่ชั้นกลับจะคงอยู่ได้ ทำให้ช่องทางเดินกระแสบริเวณใกล้ๆ ขั้วเดรนเกิดปรากฏการณ์พินช์-ออฟขึ้น และสารกึ่งตัวนำส่วนเดรนก็จะถูกแยกออกจากช่องทางเดินกระแสโดยบริเวณของดีพลีชัน (depletion region) ดังแสดงในรูปที่ 1.8 (ข) ดังนั้นกระแสเดรนจึงอิมิตัวที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 1.9 แสดงกราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เม้นท์โหมด

การเริ่ม  $V_{DS}$  จนเกินกว่าค่าแรงดันอิมิตัว (saturation voltage :  $V_{DSat}$ ) จะเป็นสาเหตุให้จุดพินช์-ออฟ (P) เคลื่อนที่เข้าใกล้ขั้วซอร์ส และความยาวช่องทางเดินกระแสที่แท้จริง (effective channel length) จะลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 1.8 (ค) อย่างไรก็ตาม ศักดาที่  $V_{DSat}$  และแรงดันที่เกินมาของ  $V_{DSat}$  ก็จะตกคร่อมบริเวณดีพลีชัน ดังนั้นกระแสเดรนจึงเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อ  $V_{DS}$  ถูกเพิ่มให้มากกว่า  $V_{DSat}$

เมื่อให้ไบอัสที่เกตเพิ่มขึ้นเป็น  $V_{GS2}$  จะเป็นผลให้ประจุชั้นกลับ  $Q_n$  เพิ่มขึ้น ดังนั้นความต้านทานช่องทางเดิน  $R$  จะลดลง จึงเป็นเหตุให้กระแสเดรนเพิ่มขึ้น ดังที่ปรากฏในกราฟคุณสมบัติ I-V ของรูปที่ 1.9

### 1.5 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์

พิจารณาเอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น  $W$  และ  $L$  ตามลำดับ จากรูปที่ 1.10 จะเห็นได้ว่า ส่วนเล็กๆของความยาวช่องทางเดินกระแส  $dx$  ที่ระยะ  $x$  จากขั้วซอส มีความต้านทาน  $dR$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dR = -\frac{dx}{Q_n(x)\mu_n W} \quad (1.2)$$

ประจุรวม  $Q_S(x)$  ถูกเหนี่ยวนำในสารกึ่งตัวนำเป็น

$$Q_S(x) = Q_n(x) + Q_B(x) \quad (1.3)$$

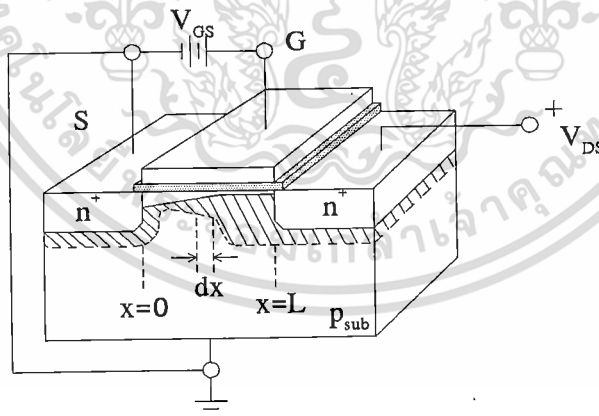
เมื่อ  $Q_B(x)$  เป็นประจุบริเวณปลอดพาหะต่อหน่วยพื้นที่ และจากสมการตัวเก็บ ประจุมอส

(MOS capacitor) ที่ตำแหน่งใดๆ ของ  $x$  จะมีค่า  $Q_S$  ที่อยู่ในเทอมของ  $V_{GS}$ ,  $V_{FB}$  และศักดาผิว (surface potential :  $\Phi_S$ ) เป็น

$$V_{GS} - V_{FB} = -\frac{Q_S(x)}{C_{ox}} + \Phi_S(x) \quad (1.4)$$

โดย  $V_{GS}$  เป็นแรงดันที่ให้แก่วัสดุ,  $V_{FB}$  เป็นแรงดันแฟลต-แบนด์ (flat-band voltage)  $C_{ox}$  เป็นค่าเก็บประจุออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่ (oxide capacitance) กำจัด  $Q_S(x)$  ระหว่างสมการ (1.3) และ (1.4) จะได้ว่า

$$Q_n(x) = C_{ox} [\Phi_S(x) - (V_{GS} - V_{FB})] - Q_B(x) \quad (1.5)$$



รูปที่ 1.10 แสดงภาคตัดขวางของเอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งในส่วนเล็กๆ  $dx$  มีค่าความต้านทาน  $dR$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่า  $\Phi_S$  และ  $Q_B(x)$  ภายใต้เงื่อนไขการเกิดชั้นกลับอย่างเต็มที่ (strong inversion) ตลอดทั้งช่องทางเดินกระแส สมมติว่าฐานรองถูกต่อเข้ากับขั้วซอส จะเห็นได้ว่าขณะนี้กระแสเดรนจะยังไม่ไหล ดังนั้น ทรานซิสเตอร์ขณะนี้จะอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) และ ณ จุดวิกฤตของการกลับอย่างเต็มที่หรือ  $\Phi_S = 2\Phi_F$  ภายใต้เงื่อนไขการทำงานจริงบริเวณที่มีประจุไฟฟ้า (space-charge region) ในมอสทรานซิสเตอร์ จะไม่อยู่ในสภาวะสมดุลความร้อน เมื่อขั้วซอสและฐานรองถูกต่อลงกราวด์ และขั้วเดรนถูกไบอัสด้วยค่าบวก ศักดาผิวจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของระยะ  $x$  ดังนั้น จึงเกิดค่าไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) น้อย ๆ คร่อมระหว่างรอยต่อฐานรองกับช่องทางเดินกระแส ถ้าให้  $V(x)$  คือศักดา (channel potential) ที่ตำแหน่ง  $x$  ในช่องทางเดินกระแส การประมาณค่าศักดาผิวสำหรับการเกิดชั้นกลับอย่างเต็มที่ จะได้เป็น

$$\Phi_S(x) = 2\Phi_F + V(x) \quad (1.6)$$

ด้วยการใช้การประมาณค่าแบบดีพลีชัน (depletion approximation) จะสามารถเขียนความหนาแน่นประจุ  $Q_B(x)$  ที่จุดวิกฤตของการกลับอย่างเต็มที่ ได้ดังนี้

$$Q_B(x) = -\sqrt{2qN_a\epsilon_s[2\Phi_F + V(x)]} \quad (1.7)$$

เมื่อ  $V(x)$  เพิ่มขึ้นตามระยะ  $x$  ประจุ  $Q_B(x)$  ก็จะเพิ่มขึ้นจากตำแหน่งปลายขั้วซอสไปจนถึงปลายขั้วเดรน แทนค่าของ  $\Phi_S(x)$  จากสมการ (1.7) ลงในสมการ (1.5) จะได้

$$Q_n(x) = C_{ox}[2\Phi_F + V(x) - (V_{GS} - V_{FB})] + \sqrt{2q\epsilon_s N_a[2\Phi_F + V(x)]} \quad (1.8)$$

สำหรับกระแสเดรน  $I_D$ , แรงดันที่ตกคร่อมค่าความต้านทานส่วนย่อย คือ

$$dV = I_D dR$$

และแทนค่า  $dR$  ด้วยสมการ (1.2) จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$I_D dx = -\mu_n W Q_n(x) dV \quad (1.9)$$

แทนค่า  $Q_n(x)$  จากสมการ (1.8) ในสมการ (1.9) และทำการอินทิเกรตจาก  $x = 0$  ถึง  $x = L$  ทำให้ได้  $I_D$  เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{L} \left\{ \left[ V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS} - \frac{2}{3} \gamma \left[ (2\Phi_F + V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (2\Phi_F)^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \quad (1.10)$$

โดยที่

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_a}}{C_{ox}} \quad (1.11)$$

ซึ่งค่า  $\gamma$  เรียกว่า บอดี้แฟคเตอร์ (body factor) สมการ (1.10) นี้จะใช้ได้เฉพาะก่อนช่วงอิ่มตัวเท่านั้น ซึ่งเมื่อเข้าสู่ภาวะ pinch off แล้ว กระแสเดรนจะมีค่าคงที่ ( $I_{DS}$ ) จะไม่เปลี่ยนแปลงกับ  $V_{DS}$  อีกต่อไป สมการ (1.10) อาจแยกพิจารณาได้เป็นสองกรณี คือ

(ก) บริเวณเชิงเส้น (linear region)

สำหรับค่า  $V_{DS}$  น้อยๆ เช่น  $V_{DS} \ll (V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F)$  และ  $V_{DS} \ll 2\Phi_F$  เทอมของ  $V_{DS}$  ของสมการ (1.10) ก็จะสามารถตัดออกได้ และสมการก็จะเปลี่ยนใหม่เป็น

$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{L} \left[ V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F - \gamma (2\Phi_F)^{\frac{1}{2}} \right] V_{DS} \quad (1.12)$$

สมการนี้จะแสดงได้ดังในกราฟคุณสมบัติ I-V ที่บริเวณช่วงเชิงเส้น ที่  $V_{DS}$  ค่าต่ำๆ และ

$$\gamma (2\Phi_F)^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{4q\epsilon_s N_a \Phi_F}}{C_{ox}} = -\frac{Q_B}{C_{ox}} \quad (1.13)$$

สมการ (1.12) จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{L} (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} \quad (1.14)$$

โดย

$$V_{th} = V_{FB} - \frac{Q_B}{C_{ox}} + 2\Phi_F \quad (1.15)$$

สำหรับเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์ ของมอสทรานซิสเตอร์,  $V_{FB}$  จะมีค่าเป็นลบเล็กน้อย ส่วนอีก 2 เทอมในสมการ (1.15) จะเป็นค่าบวก ดังนั้น  $V_{th}$  จึงเป็นปริมาณบวกและแสดงถึงแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิด (turn-on voltage) ของทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตาม ในมอสทรานซิสเตอร์ชนิดดีพลีชั่น ค่าลบของ  $V_{FB}$  จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับอีก 2 เทอม ทำให้ได้ค่า  $V_{th}$  เป็นลบ

(ข) บริเวณช่วงอิ่มตัว (saturation region)

เมื่อช่องทางเดินกระแสเกิดเป็นพินช์-ออฟ ที่บริเวณใกล้ขั้วเดรนทำให้การประมาณค่าช่องทางเดินกระแสเป็นแบบลาด (gradual channel approximation) ใช้ไม่ได้อีกต่อไป แรงดัน  $V_{Dsat}$  ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอิ่มตัวของกระแส  $I_D$  ซึ่งได้จากเงื่อนไขว่า ที่แรงดันนี้ ความหนาแน่นประจุในชั้นกลับใกล้ขั้วเดรนจะกลายเป็นศูนย์ ดังนั้นจะแทนค่า  $V(x)$  ด้วย  $V_{Dsat}$  ( $V(x) = V_{Dsat}$ ) ซึ่งจะทำให้  $Qn(x) = 0$  ในสมการ (1.8) และจากการหาผลลัพท์ของสมการ  $V_{Dsat}$  จะได้ว่า

$$V_{Dsat} = V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F + \frac{\gamma^2}{2} - \gamma \left( V_{GS} - V_{FB} + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.16)$$

กระแสเดรนในช่วงอิ่มตัวจะได้ภายหลังการแทน  $V_D = V_{Dsat}$  จากสมการ (1.16) ลงในสมการ (1.10) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากสมการ (1.16) เมื่อความเข้มข้นสารเจือ  $N_a$  มีค่าต่ำ และชั้นออกไซด์บางๆ จะเป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อมออกไซด์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $2\Phi_F$  ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ทำให้ค่าบอดี้แฟคเตอร์  $\gamma$  มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ดังนั้น

$$V_{Dsat} = V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F - \gamma (V_{GS} - V_{FB})^{\frac{1}{2}} \quad (1.17)$$

สมมติว่าแรงดันตกคร่อมออกไซด์มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับศักดาผิวที่เกิดขึ้นกลับอย่างเต็มที่ และค่า  $V_{GS} - V_{FB} \approx 2\Phi_F$  ดังนั้นจากสมการ (1.17) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$V_{Dsat} = V_{GS} - \left[ V_{FB} + 2\Phi_F + \gamma (2\Phi_F)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1.18)$$

และ 
$$V_{Dsat} = V_{GS} - V_{th} \quad (1.19)$$

เมื่อนำสมการ (1.13) และ (1.15) แทนในสมการ (1.18) จะได้  $V_{Dsat}$  ตั้งสมการ (1.19) และในตอนี้ กระแสเดรนอิ่มตัว จะได้ จากการแทนสมการ (1.19) ลงในสมการ (1.10) ดังนั้น

$$I_{Dsat} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{L} \left\{ [V_{GS} - V_{FB} - 2\Phi_F] (V_{GS} - V_{th}) - \frac{(V_{GS} - V_{th})^2}{2} - \frac{2}{3} \gamma \left[ (2\Phi_F + V_{GS} - V_{th})^{\frac{3}{2}} - (2\Phi_F)^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \quad (1.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเดรนอิมิตัวนี้จะขึ้นอยู่กับค่า  $V_D$  ดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 1.9 ภายใต้เงื่อนไข เมื่อ  $\gamma \ll 1$  และ  $V_{th} \approx V_{FB} + 2\Phi_F$  ดังนั้น สมการ (1.20) จะลดรูปได้เป็น

$$I_{Dsat} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (1.21)$$

กระแสเดรนอิมิตัว  $I_D$  จะขึ้นอยู่กับแรงดันเกต ซึ่งจะใช้ได้กับทุกๆ ค่าของ  $V_{DS}$  ( $V_{GS} - V_{th}$ )

## 1.6 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage)

แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{th}$ ) คือ ค่าต่ำสุดของแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ที่ใช้เพื่อเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสที่รอยต่อซิลิกอน-ซิลิกอนไดออกไซด์ สำหรับมอสที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และให้ไบอัสขอสถึงเดรนมีค่าน้อยๆ แรงดันขีดเริ่มจะได้จากประจุที่ถูกให้กับบริเวณที่ถูกล้อมรอบด้วยขั้วเกต (gate electrode) และเนื้อสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

$$Q_g + (Q_f + Q_{ot} + Q_m) + Q_{it} - (Q_n - Q_B) = 0 \quad (1.22)$$

โดยที่

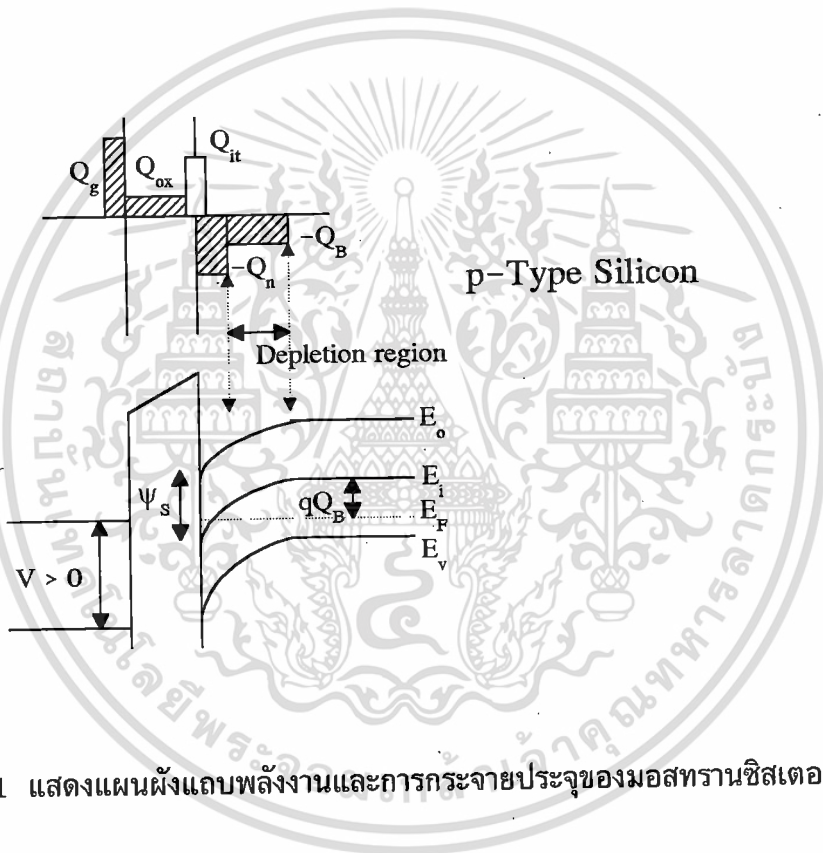
- $Q_g$  เป็นประจุในขั้วเกต
- $Q_f$  เป็นประจุออกไซด์ที่ถูกตรึงไว้
- $Q_{ot}$  เป็นความหนาแน่นประจุที่ถูกออกไซด์จับไว้
- $Q_m$  เป็นความหนาแน่นประจุอิเล็กตรอนที่ภายในออกไซด์
- $Q_{it}$  เป็นความหนาแน่นประจุที่รอยต่อ
- $Q_n$  เป็นประจุภายในชั้นกลับ
- $Q_B$  เป็นประจุภายในชั้นปลอดพาหะ

การกระจายของประจุเหล่านี้ และแผนผังแถบพลังงานของเอ็น-แชนแนลมอสทรานซิสเตอร์ในการกลับ (inversion) จะแสดงในรูปที่ 1.11 เมื่อแถบพลังงาน (energy band) ของโลหะเรียบ (flat) จนถึงรอยต่อซิลิกอน-ซิลิกอนไดออกไซด์ จะทำให้เกิดแรงดันแฟลตแบนด์  $V_{FB}$  ขึ้นบนเกต ดังนี้

$$V_{FB} + \Phi_{ms} = \frac{Q_g}{C_{ox}} = -\frac{1}{C_{ox}} \left( Q_{it} + \frac{\bar{T}_f}{T_{ox}} \cdot Q_f + \frac{\bar{T}_{ot}}{T_{ox}} \cdot Q_{ot} + \frac{\bar{T}_m}{T_{ox}} \cdot Q_m \right) \quad (1.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่
- $\Phi_{ms}$  เป็นความแตกต่างฟังก์ชันงานระหว่างเกตโลหะกับซิลิกอนชนิดพี
  - $C_{ox}$  เป็นค่าเก็บประจุรวม
  - $T_{ox}$  เป็นความหนาชั้นออกไซด์
  - $\bar{T}_f$  เป็นศูนย์กลางการกระจายประจุที่ถูกตรึงไว้ในออกไซด์
  - $\bar{T}_{ot}$  เป็นศูนย์กลางการกระจายประจุที่ถูกออกไซด์จับไว้
  - $\bar{T}_m$  เป็นศูนย์กลางการกระจายประจุเคลื่อนที่



รูปที่ 1.11 แสดงแผนผังแถบพลังงานและการกระจายประจุของมอสทรานซิสเตอร์

ในกระบวนการสมัยใหม่ต่างๆไป พจน์ที่มีความสำคัญมากคือ ความหนาแน่นประจุที่รอยต่อ  $Q_{it}$  ซึ่งบ่อยครั้งที่ประจุออกไซด์จะถูกรวมเข้าหรือตัดออก เรียกว่า ประจุรอยต่อที่แท้จริง (effective interface charge),  $Q_{SS}$  สมการ (1.23) จะกลายเป็น

$$V_{FB} = -\frac{Q_{SS}}{C_{ox}} - \Phi_{ms} \tag{1.24}$$

ศักดาผิว  $\Phi_S$  ที่จุดวิกฤตของการกลับอย่างเต็มที่ บ่อยครั้งจะถือว่าเป็น  $2\Phi_F$  เมื่อ  $\Phi_F$  เป็น ศักดาเฟอร์มิ (fermi potential) สำหรับเนื้อซิลิกอน ณ จุดนี้ ถ้าสมมติว่า ประจุชั้นกลับ (inversion charge) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับประจุเนื้อสาร (bulk charge) ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_{th} = V_{FB} + 2\Phi_F + \frac{Q_B}{C_{ox}} \quad (1.25)$$

โดยที่  $V_{th}$  เป็นแรงดันขีดเริ่ม สำหรับวัสดุที่ถูกเจือสารอย่างสม่ำเสมอ  $Q_B$  จะได้เป็น

$$Q_B = q \cdot N_a \cdot W_c \quad (1.26)$$

โดยที่  $N_a$  เป็นความเข้มข้นอะตอมสารเจือผู้รับ  
 $W_c$  เป็นความกว้างวิกฤตของชั้นปลอดพาหะในช่องทางเดินที่จุดวิกฤตของการกลับอย่างเต็มที่

ความกว้างของชั้นปลอดพาหะมากที่สุดที่จุดวิกฤตของการกลับอย่างเต็มที่จะเป็นดังนี้

$$W_c = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S(2\Phi_F + V_{SB})}{qN_a}} \quad (1.27)$$

โดยที่  $\varepsilon_S$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน  
 $V_{SB}$  เป็นแรงดันระหว่างขั้วข้อกับฐานรอง

แทนค่าสมการ (1.26) และ (1.27) ลงใน (1.25) จะได้

$$V_{th} = V_{FB} + 2\Phi_F + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{(2q\varepsilon_S N_a (2\Phi_F + V_{SB}))} \quad (1.28)$$

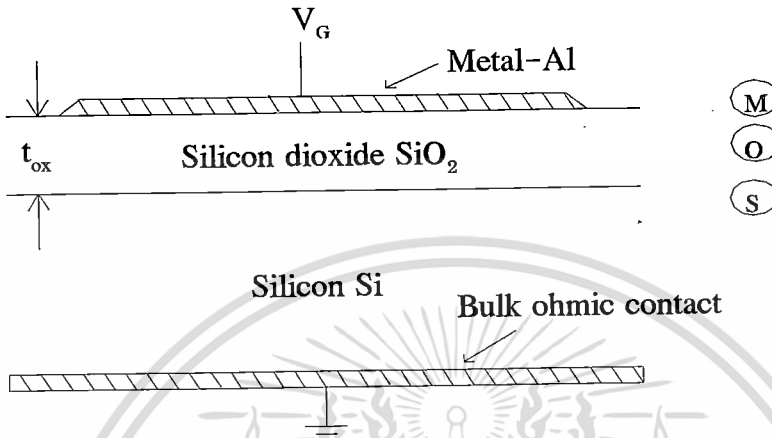
หรือ

$$V_{th} = V_{FB} + 2\Phi_F + \frac{Q_B}{C_{ox}} \quad (1.29)$$

เมื่อ

$$Q_B = \sqrt{(2q\varepsilon_S N_a (2\Phi_F + V_{SB}))} \quad (1.30)$$

1.7 ตัวเก็บประจุแบบมอส(MOS Capacitor)



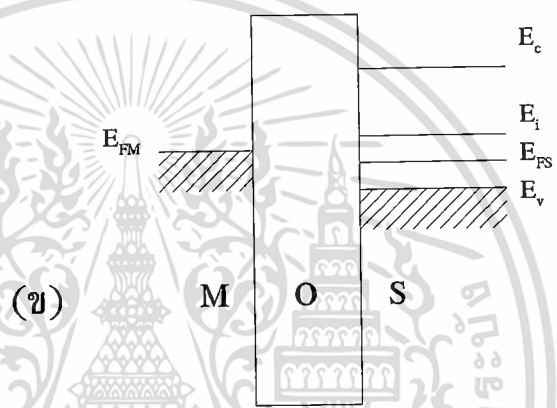
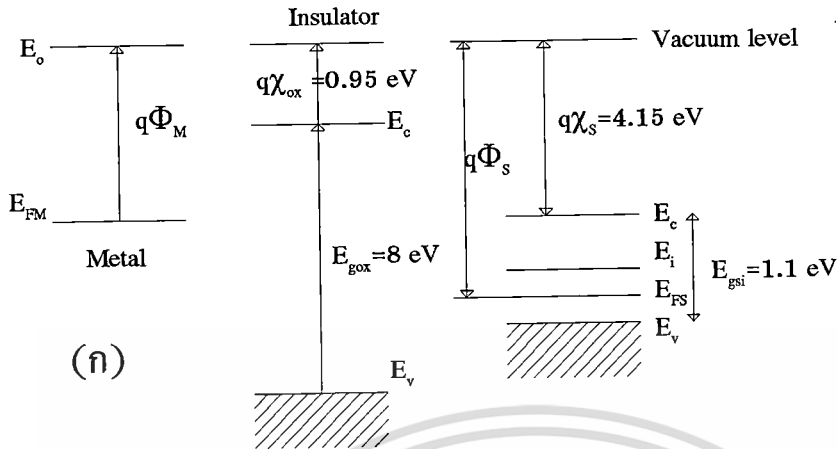
รูปที่ 1.12 แสดงภาคตัดขวางของมอส (Metal-Oxide-Semiconductor : MOS)

ในรูปที่ 1.12 แสดงถึงภาคตัดขวางของตัวเก็บประจุแบบมอส ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวนที่มีความหนา  $T_{ox}$  ชั้นโลหะจะใช้อลูมิเนียม (ดังรูป) แรงดัน  $V_G$  จะถูกให้แก่ชั้นซิลิกอนนี้ซึ่งเรียกว่า "เกต" ชั้นของเกตจะเป็นโลหะ ซึ่งจะระเหยไปเกาะที่แผ่นซิลิกอน และถูกทำให้เป็นโอห์มมิกคอนแทกซ์ (ohmic contact) ชั้นฉนวนในกรณีนี้คือ  $SiO_2$

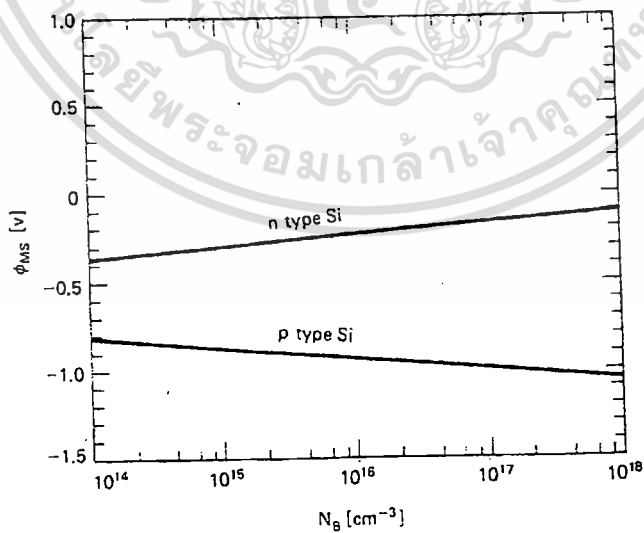
ในสภาวะทางอุดมคติ เมื่อนำวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ โลหะ ฉนวนและสารกึ่งตัวนำ มาเชื่อมต่อกันจะสามารถแสดงถึงแผนผังแถบพลังงานได้ ดังรูปที่ 1.12 ระดับสูญญากาศ (vacuum level) จะเป็นระดับพลังงานอ้างอิง (ดังรูป 1.13 (ก)) ซึ่งเป็นพลังงาน ที่อิเล็กตรอนเป็นอิสระ จากสนามของโครงร่างผลึก (crystal lattice) ในรูป 1.13 (ข) ระดับเฟอร์มิ (fermi level) ของโลหะ EFM และของสารกึ่งตัวนำ EFS จะมีระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นความแตกต่าง ของฟังก์ชันงานโลหะและสารกึ่งตัวนำ  $\Phi_{ms}$  สำหรับค่าของอลูมิเนียม-ซิลิกอน จะแสดงดังรูป 1.14

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันนี้เป็นความแตกต่างของซิลิกอนชนิด n และ p ซึ่งที่ผ่านมาเมื่อแรงดันตกคร่อมสารกึ่งตัวนำ การโค้งงอของแถบพลังงาน (band bending) ก็จะมีปรากฏขึ้น ความแตกต่างของฟังก์ชันงานจะแสดงให้เห็นถึงแรงดันตกคร่อมโครงสร้างขณะที่อยู่ในภาวะไม่มีไบอัส สิ่งนี้เป็นสาเหตุให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานอ็อกไซด์และซิลิกอน แรงดันตกคร่อมอ็อกไซด์จะเป็นเชิงเส้น แต่เนื่องจากความหนาแน่นประจุในซิลิกอนเป็นฟังก์ชันของศักดา แรงดันที่ตกคร่อมในสารกึ่งตัวนำถึงไม่เป็นเส้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.15 ความต่างศักย์  $\Phi_{ms}$  เป็นค่าลบเนื่องจากการสะสม (accumulation) ของพาหะส่วนมาก (majority carriers) (ซึ่งในกรณีนี้คือโฮล) ที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.13 แสดงแผนผังแถบพลังงาน : (ก) ก่อนการเชื่อมต่อของเนื้อสาร (ข) ภายหลังที่เนื้อสาร ถูกเชื่อมกันเป็นระบบมอส สำหรับอลูมิเนียมมีฟังก์ชันงานเป็น  $q\Phi_m = 4.1 \text{ eV}$  ซิลิกอน  $q\Phi_{sc} = 4.7 \text{ eV}$

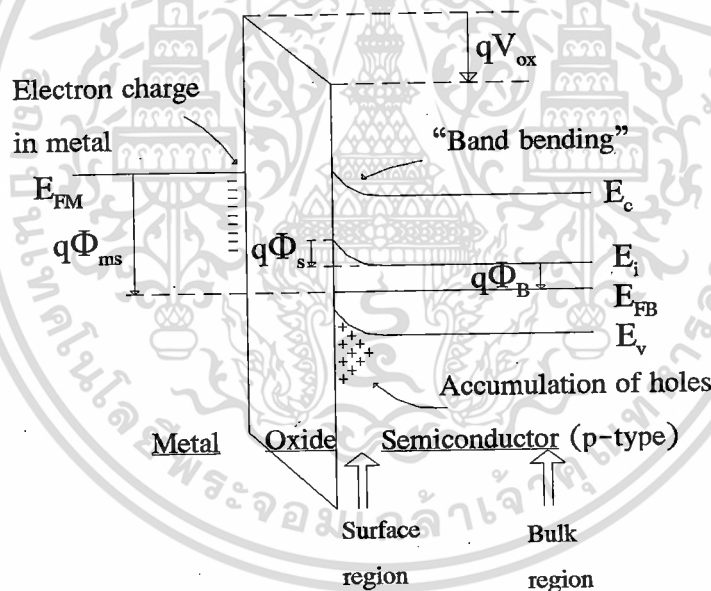


รูปที่ 1.14 แสดงความแตกต่างฟังก์ชันงานของอลูมิเนียม-ซิลิกอน ขณะที่ฟังก์ชันของความเข้มข้น สารเจือของซิลิกอนชนิด n และ p ที่ 300 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าฟังก์ชันนี้เป็นความแตกต่างของซิลิกอนชนิด n และ p ซึ่งที่ผ่านมาเมื่อแรงดันตกคร่อมสารกึ่งตัวนำ การโค้งของแถบพลังงาน (band bending) ก็จะปรากฏขึ้น ความแตกต่างของฟังก์ชันงานจะแสดงให้เห็นถึงแรงดันตกคร่อมโครงสร้างขณะที่อยู่ในภาวะไม่มีไบอัส สิ่งนี้เป็นสาเหตุให้เกิดการโค้งเบนของแถบพลังงานอ็อกไซด์และซิลิกอน แรงดันตกคร่อมอ็อกไซด์จะเป็นเชิงเส้น แต่เนื่องจากความหนาแน่นประจุในซิลิกอนเป็นฟังก์ชันของศักดา แรงดันที่ตกคร่อมในสารกึ่งตัวนำถึงไม่เป็นเส้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.15 ความต่างศักย์  $\Phi_{ms}$  เป็นค่าลบเนื่องจากการสะสม (accumulation) ของพาหะส่วนมาก (majority carriers) (ซึ่งในกรณีนี้คือโฮล) ที่ผิว

สุดท้ายนี้จะเป็นการนิยามและแสดงถึงความสำคัญของศักดาผิว (surface potential) ระดับพลังงานแท้จริง (intrinsic energy level) ซึ่งอยู่ที่ครึ่งหนึ่งของช่องว่างพลังงาน (energy gap) ตามการโค้งเบนของแถบความนำ (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valance band) เมื่อใช้ระดับพลังแท้จริงของเนื้อสารเป็นระดับอ้างอิง ศักดาแต่ละจุดของสารกึ่งตัวนำก็จะวัดได้ ดังนั้น ศักดาที่ผิว  $\Phi_s$  จะเป็นความแตกต่างของระดับเฟอร์มีแท้จริง (intrinsic fermi level) ที่ผิวเมื่อเทียบกับเนื้อสาร



รูปที่ 1.15 แสดงโครงสร้างตัวเก็บประจุออสในการสะสมประจุซึ่งแสดงให้เห็นการโค้งที่ผิวเนื่องจากความแตกต่างฟังก์ชันของโลหะและสารกึ่งตัวนำขณะไม่มีไบอัส

### ตัวเก็บประจุภายใต้การไบอัส

เมื่อให้แรงดันภายนอกกับเกท ซึ่งเป็นการเพิ่มความต่างศักดาระหว่างระดับเฟอร์มีโลหะ (metal fermi level) และระดับเฟอร์มีเนื้อสาร (bulk fermi level) แรงดันนี้จะแสดงได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_Q + \Phi_{ms} = V_{ox} + \Phi_s + \Phi_F \quad (1.31)$$

กรณีของตัวเก็บประจุผสมอุดมคติที่มีฐานรองซิลิกอนชนิด p เมื่อให้ไบอัสที่เกทจากค่าลบจนถึงค่าบวก มีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน 4 อย่างของการกระจายประจุและศักดา ดังนี้

(ก) ช่วงการสะสม (Accumulation) เมื่อไบอัสค่าลบ โวลต์จำนวนมากจะอยู่ที่ผิวในเนื้อสาร เงื่อนไขนี้เป็นช่วงการสะสมโดยพาหะ ส่วนมากจะสะสมที่ผิว ดังนั้นศักดาที่ผิวจะเป็นค่าลบ จำนวนพาหะส่วนน้อยที่รอยต่อจะลดลงเนื่องจากประจุลบที่เกทจะผลักให้อิเล็กตรอนออกไป ซึ่งขณะนี้จะไม่มีกระแสไหล

ในรูปที่ 1.16 (ก) จะแสดงตัวเก็บประจุผสมภายใต้การสะสมและแผนผังแถบพลังงานจะแสดงการสะสมของโฮลในแถบวาเลนซ์ที่ผิว ดังนั้นการโค้งเบนของแถบพลังงานอ็อกไซด์ (oxide energy band) และทิศทางของการเลื่อนของระดับเฟอร์มิโลหะจะเป็นบวก แม้ว่าแรงดันเกทเป็นค่าลบ ภาพด้านล่างเป็นกราฟของความหนาแน่นประจุ  $\rho(x)$  ที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งโดยทั่วไป  $\rho(x)$  จะแสดงได้เป็น

$$\rho(x) = e[p(x) + n(x) + N_a(x) + N_d(x)] \quad (1.32)$$

ในกรณีนี้จะแสดงเฉพาะโฮลเท่านั้น ซึ่งจะเคลื่อนที่และถูกกีดขวางด้วยรอยต่อซิลิกอน-อ็อกไซด์ ในส่วนเกทจะมีประจุลบ (อิเล็กตรอน) ที่รอยต่อโลหะอ็อกไซด์ ประจุรวมทั้งสองเหล่านี้  $Q_g$  และ  $Q_p$  จะมีจำนวนเท่ากันและมีเครื่องหมายตรงกันข้าม

(ข) ช่วงแฟลตแบนด์ (Flatband) เมื่อแรงดันเกทเปลี่ยนจากค่าลบเป็นศูนย์ ซึ่งกรณีนี้จะหมายถึงระดับเฟอร์มิของโลหะและซิลิกอนอยู่ในระดับเดียวกัน จะไม่มีประจุอยู่ในแต่ละด้านของอ็อกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 1.16 (ข)

(ค) ช่วงปลอดพาหะ (Depletion) ณ จุดนี้ แรงดันที่ใส่เข้าไปจะเป็นสาเหตุให้พาหะส่วนมากเคลื่อนที่ออกห่างจากผิว (ไบอัสค่าบวก) ซึ่งกรณีนี้พาหะส่วนมากที่เป็นโฮลจะลดลงจากผิว

ขบวนการช่วงปลอดพาหะนี้ พาหะส่วนมากจะถูกปัดออกจากผิว เพื่อให้แรงดัน ความลึกของชั้นปลอดพาหะ จะถูกควบคุมโดยแรงดันที่ใส่, ความเข้มข้นสารเจือและคุณสมบัติของซิลิกอน

$$W_c = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 \Phi_s}{qN_a}} \quad (1.33)$$

รูปที่ 1.16 (ค) แสดงการโค้งเบนแถบพลังงานและชั้นปลอดโลหะของประจุ ส่วนมากกราฟประจุกับความลึก แสดงให้เห็นประจุขั้วบวกที่ถูกสะสม ( $Q_g$ ) เนื่องจากไบอัสค่าบวกและอิออนลบ  $Q_d$  ซึ่งกระจายอยู่นอกความกว้างชั้นปลอดพาหะ (Depletion width :  $W_c$ )

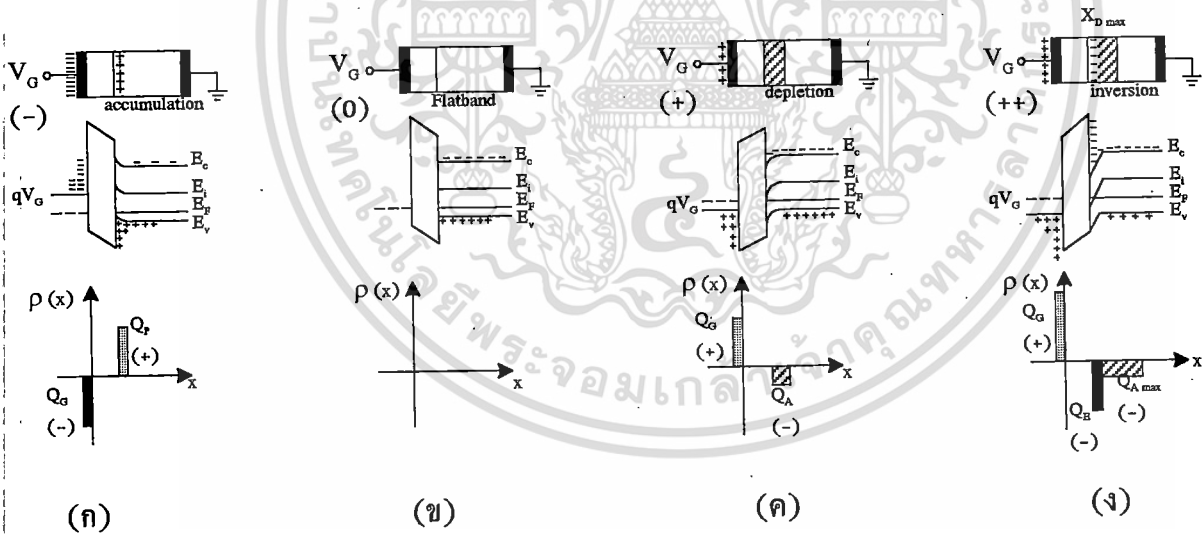
(ง) ช่วงการกลับ (Inversion) เมื่อให้ไบอัสค่าบวกมากๆ จำนวนของพาหะส่วนน้อยจะรวมกันที่ผิวเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นนี้ จะสัมพันธ์กับศักดาในลักษณะ เอ็กโปเนนเชียล ดังนั้นศักดาจะเปลี่ยน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นพาหะจำนวนมาก เมื่อศักดาผิวไปถึงระดับ  $\Phi_s = 2\Phi_F$  ดังนั้น ความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยที่ผิวจะเท่ากับความเข้มข้นสารเจือ ที่จุดนี้การกระจายประจุในซิลิกอนจะเด่นชัดด้วยการสะสมพาหะส่วนน้อยที่ผิว ซึ่งขณะที่ผิวสารกึ่งตัวนำจากพาหะส่วนน้อยจะเปลี่ยนเป็นพาหะส่วนมาก ดังนั้น ผิวจึงถูกกลับ (inverted) หรือมีชนิดพาหะตรงข้ามกันของเนื้อสาร เมื่อชั้นกลับ (inversion layer) เกิดขึ้น ชั้นปลอดพาหะก็จะไม่ขยายอีกต่อไป หลังจากจุดนี้การเพิ่มไบอัสค่าบวกกับเกต จะเป็นผลให้เพิ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ผิว ค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะมากที่สุดจะเป็น

$$W_{c,max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0(2\Phi_F)}{qN_a}} \tag{1.34}$$

ในรูปที่ 1.16 (ง) แผนผังพลังงานจะแสดงให้เห็นชั้นกลับที่ความถี่ต่ำ ดังนั้นความหนาแน่นประจุจะแสดงด้วยประจุอิเล็กตรอน  $Q_n$  ซึ่งจะมากกว่าประจุโฮลรวม  $Q_A$  โดยผลรวมที่ได้จะสมดุลกับประจุค่าบวกที่เกต  $Q_g$



รูปที่ 1.16 แสดงตัวเก็บประจุออสภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงไบอัส แผนผังจะแสดงชนิดและขั้วของประจุที่ผิว, การโค้งเบนแถบพลังงานผิวและประจุที่รอยต่อ

สนามและค่าพังทลาย (fields and breakdown)

ทั้งกรณีการสะสมประจุและชั้นกลับ ศักดาตกคร่อมสารกึ่งตัวนำจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันที่ตกคร่อมฉนวน แรงดันผิวสูงสุด ตกคร่อมที่ภาวะสูงสุดของทั้งคู่จะประมาณได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\Phi_{S_{\max}} &= 0.55V - \Phi_F && \text{ช่วงการสะสมประจุ} \\ &0.55V + \Phi_F && \text{ช่วงการกลับ}\end{aligned}\quad (1.35)$$

แรงดันออกไซด์จะหาได้จากสมการ

$$V_{ox} = V_{GS} + \Phi_{ms} - \Phi_{S_{\max}} - \Phi_F$$

สนามที่คร่อมออกไซด์จะได้

$$\begin{aligned}E_{ox} &= -V_{ox}/T_{ox} \\ E_{ox} &= -[V_{GS} + \Phi_{ms} - \Phi_{S_{\max}} - \Phi_F]/T_{ox}\end{aligned}\quad (1.36)$$

**ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดัน**

การวัดคุณสมบัติค่าเก็บประจุและแรงดัน (C-V) ของตัวเก็บประจุแบบมอส ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์และตรวจสอบขบวนการสร้างวงจรรวมและยังช่วยให้เข้าใจคุณสมบัติของอุปกรณ์อีกมากมาย พารามิเตอร์จากขบวนการสร้างเช่น แรงดันแฟลตแบนด์, ความหนาออกไซด์และความเข้มข้นฐานรอง จะวัดได้อย่างถูกต้องจากกราฟ C-V

**ค่าความจุไฟฟ้าภายใต้สถานะให้ไบอัส**

สำหรับตัวเก็บประจุแบบมอส ในช่วงสะสมประจุความหนาแน่นของพาหะ ส่วนมากจะสูงเนื่องจากซิลิกอนมีคุณสมบัติของโลหะ ดังนั้น จะได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เกทเป็น

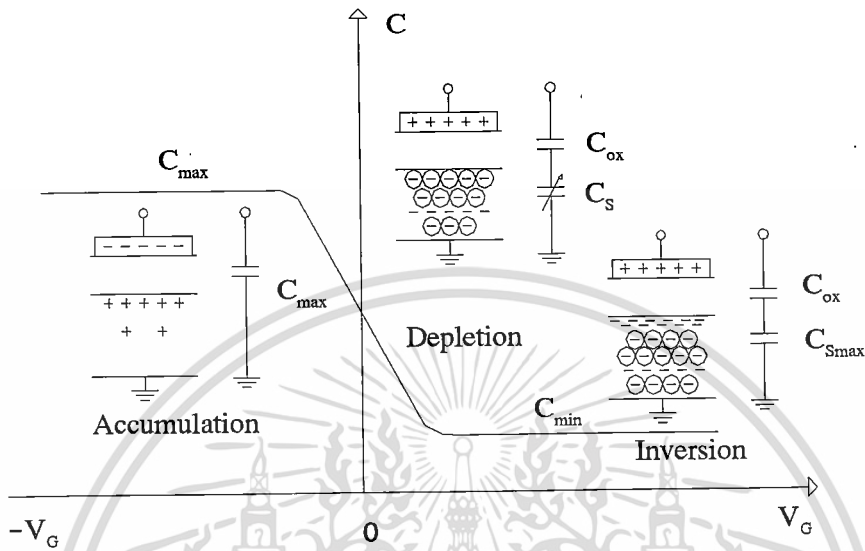
$$C_{ox} = \epsilon_{ox}\epsilon_0 A/T_{ox}\quad (1.37)$$

เมื่อ  $\epsilon_{ox}$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์  $A$  เป็นพื้นที่ของตัวเก็บประจุและ  $T_{ox}$  เป็นความหนาออกไซด์ กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า  $C_{ox}$  เป็นค่าเก็บประจุของตัวเก็บประจุแนวระนาบสมดุลย์ จะเห็นได้ว่า ถ้าสามารถวัดว่า  $C_{ox}$  และรู้ค่าพื้นที่ และชนิดของฉนวนแล้ว ความหนา  $T_{ox}$  ก็จะสามารถหาได้ถูกต้อง บ่อยครั้งที่ปริมาณ  $C_{ox}$  จะถูกหาในรูป  $C_{\max}$  เนื่องจากมันเป็นค่าเก็บประจุสูงสุดที่วัดได้

ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าเก็บประจุในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงของประจุที่ถด ถ่อต่อแรงดันเกทที่เปลี่ยนไปจะได้

$$C = \Delta Q_s / \Delta V_G\quad (1.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.17 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติตัวเก็บประจุ-แรงดัน ของตัวเก็บประจุ MOS ชนิดพี ที่ความถี่สูง

ต่อมาในช่วงปลอดพาหะแรงดันจากเกตจะเป็นผลให้พาหะส่วนมากถูกผลักออกไป ทำให้เกิดเป็นชั้นปลอดพาหะขึ้น (depletion layer) จึงเกิดเป็นตัวประจุที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 1.17. ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซิลิกอน  $C_s$  จะเป็นฟังก์ชันของแรงดัน

$$C_s = \epsilon_s \epsilon_0 A / W_c \tag{1.39}$$

ซึ่ง  $W_c$  เป็นความกว้างชั้นปลอดพาหะที่ขึ้นกับแรงดัน

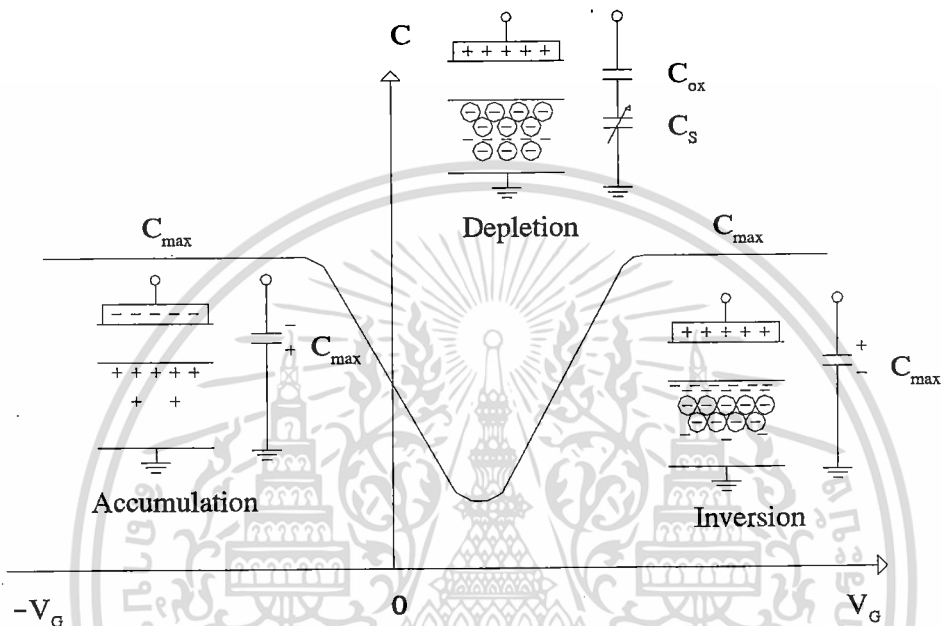
การรวมแบบอนุกรมของ  $C_{ox}$  กับ  $C_s$  เป็นสาเหตุให้ค่าเก็บประจุรวมในชั้นปลอดพาหะลดลง

$$C_T = C_s C_{ox} / (C_s + C_{ox}) \tag{1.40}$$

ที่สภาวะการกลับจะพบว่า ชั้นปลอดพาหะจะมีความกว้างสูงสุดและค่าเก็บประจุก็จะมีค่าต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 1.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{\min} = C_{S\max} C_{ox} / (C_{S\max} + C_{ox}) \quad (1.41)$$



รูปที่ 1.18 กราฟแสดงคุณสมบัติตัวเก็บประจุ-แรงดัน ของตัวเก็บประจุ MOS ชนิดพี ที่ความถี่ต่ำ

จัดรูปใหม่ในรูปค่าเก็บประจุภาวะปกติ (normalized capacitance) ได้เป็น

$$\frac{C_{\min}}{C_{ox}} = \frac{1}{1 + \frac{C_{ox}}{C_{S\max}}} \quad (1.42)$$

ความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าเก็บประจุนิยมแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความถี่ต่ำ (low frequency) จะอยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 เฮิร์ต และช่วงความถี่สูง (high frequency) ปกติจะใช้ช่วงมากกว่า 1 เมกกะเฮิร์ตที่ความถี่ต่ำ ถ้าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเกตช้าเพียงพอที่พาหะส่วนน้อยในชั้นกลับจะสามารถตอบสนองกับสัญญาณได้ทัน โดยพาหะส่วนน้อยเหล่านี้จะทะลุผ่านชั้นปลอดพาหะไปยังเนื้อสาร ทำให้ประจุที่เกตสมดุลกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ผิว ดังนั้น ช่วงการกลับที่ความถี่ต่ำ จึงมีลักษณะคล้ายช่วงการสะสม เมื่อวัดค่าเก็บประจรรวมจึงมีค่าเท่ากับค่าเก็บประจุออกไซด์ดังรูปที่ 1.18 ส่วนที่ความถี่อิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่เกตซึ่งมีความถี่สูงกว่า 1 เมกกะเฮิร์ตได้ ทำให้ค่าเก็บประจรรวมในช่วงการกลับของกรณีนี้มีค่าเป็น  $C_{\min}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### การจำลองแบบอุปกรณ์มอส

#### 2.1 แบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์ใน PSPICE

คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ช่วยในการจำลองแบบวงจร ทั้งในด้านการวิเคราะห์ และการออกแบบวงจรต่างๆ PSPICE เป็นโปรแกรมหนึ่งที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยโปรแกรม PSPICE มีแบบจำลอง 3 ระดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับแบบจำลอง ว่ามีความละเอียดมากน้อยเพียงใด

โปรแกรม PSPICE มีแบบจำลองของ มอสทรานซิสเตอร์ 3 ระดับด้วยกัน ซึ่งมีสูตรคุณสมบัติ I-V ที่แตกต่างกัน แบบจำลองระดับ 1 จะเป็นแบบที่ง่ายที่สุด โดยงานวิจัยนี้ จะใช้แบบจำลองระดับที่ 1 เป็นหลัก เนื่องจากมอสทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบจะเป็นโครงสร้างอย่างง่าย ไม่ซับซ้อน และมีขนาดช่องทางเดินกระแสขนาดใหญ่ ดังนั้น ในการจำลองแบบด้วยระดับ 1 ก็เพียงพอที่จะใช้ตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวงจรที่ประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์อย่างถูกต้องได้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าตรงของมอสทรานซิสเตอร์จะถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ของตัวอุปกรณ์ เช่น VTO, KP, LAMBDA, PHI และ GAMMA เป็นต้น โดยชื่อพารามิเตอร์และสัญลักษณ์ที่ใช้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจะถูกคำนวณเมื่อกำหนดค่า พารามิเตอร์ทางกระบวนการ (process parameters) เช่น NSUB, TOX เป็นต้น สำหรับค่าเฉพาะผู้ใช้งานจะต้องเป็นผู้กำหนดเอง

ค่า VTO จะเป็นค่าบวกสำหรับเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด และเป็นค่าลบสำหรับเอ็น-แชนแนล ดีพลีชันโหมด กรณีเป็นพี-แชนแนล ก็จะได้ค่า VTO เป็นค่าลบ สำหรับ เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดและเป็นค่าบวกสำหรับดีพลีชันโหมด

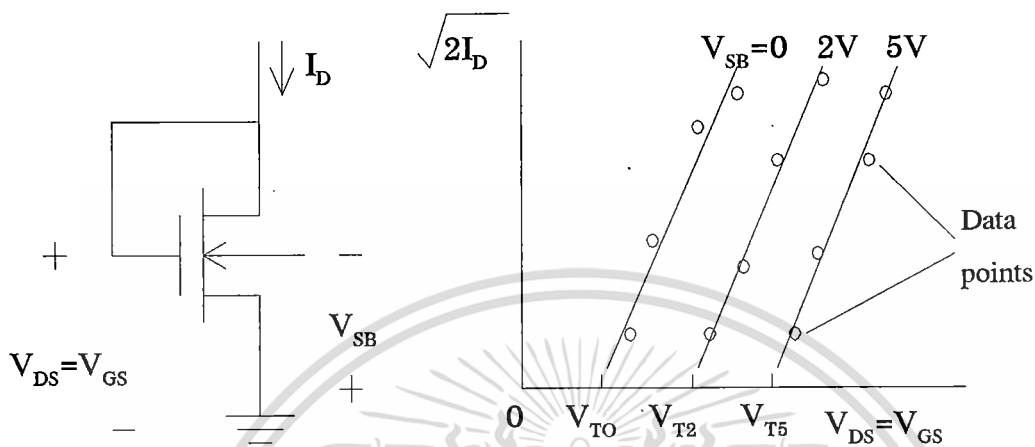
ตัวเก็บประจุในส่วนต่างๆ จะถูกจำลองแบบเพื่อให้คำนวณได้ง่ายจากลวดลายวงจร ตัวเก็บประจุคนที่ 3 ส่วนได้แก่ CGSO, CGDO และ CGBO จะหมายถึง ค่าเก็บประจุส่วนที่ซ้อนกัน (overlap) ของเกต-ซอส เกต-เดรน และเกต-เนื้อสาร ตามลำดับ ตัวเก็บประจุชั้นปลอดภัย ทั้งทางด้านล่างและด้านข้าง ได้แก่ รอยต่อพี-เอ็น ซอส-เนื้อสาร และเดรน-เนื้อสาร โดยค่าตัวเก็บประจุเหล่านี้จะถูกคำนวณด้วยพารามิเตอร์ CBD, CBS, CJ และ PB

เพื่อให้ได้ผลเป็นที่น่าพอใจในการออกแบบและวิเคราะห์วงจร จึงควรจัดข้อมูลตัวอย่างของมอสทรานซิสเตอร์ให้ครอบคลุมช่วงการทำงานของกระแสและแรงดันตั้งหัวข้อที่จะกล่าวต่อไป

ตาราง 1.8.1-1 แสดงค่าตัวแปรในการจำลองแบบโปรแกรม PSPICE

Symbol	Name	Parameter	Units	Default	Example
	LEVEL	Model index		1	
$V_{TO}$	VTO	Zero-bias threshold voltage	V	0.0	1.0
$k$	KP	Transconductance parameter	$A/V^2$	2.0E-5	3.1E-5
$\gamma$	GAMMA	Bulk threshold parameter	$V^{1/2}$	0.0	0.37
$2 \Phi $	PHI	Surface potential	V	0.6	0.65
$\lambda$	LAMBDA	Channel-length modulation	$V^{-1}$	0.0	0.02
$C_{db}$	CBD	Zero-bias B-D junction capacitance	F	0.0	2.0E-14
$C_{sb}$	CBS	Zero-bias B-S junction capacitance	F	0.0	2.0E-14
	CGSO	Gate-source overlap capacitance per meter channel width	F/m	0.0	4.0E-11
	CGDO	Gate-drain overlap capacitance per meter channel width	F/m	0.0	4.0E-11
	CGBO	Gate-bulk overlap capacitance per meter channel width	F/m	0.0	2.0E-10
$\Phi_0$	PB	Bulk junction potential	V	0.8	0.87
$C_{jo}$	CJ	Zero-bias bulk junction bottom capacitance per square meter of junction area	$F/m^2$	0.0	2.0E-4
$t_{ox}$	TOX	Oxide thickness	m	1.0E-7	1.0E-7
$N_a, N_d$	NSUB	Substrate doping	$cm^{-3}$	0.0	4.0E15
$Q_{SS}/q$	NSS	Surface state density	$cm^{-2}$	0.0	1.0E10
$X_j$	XJ	Metallurgical junction depth	m	0.0	1.0E-6
$L_D$	LD	Lateral diffusion	m	0.0	0.8E-6
$\mu$	UO	Surface mobility	$cm^2/V.s$	600	700

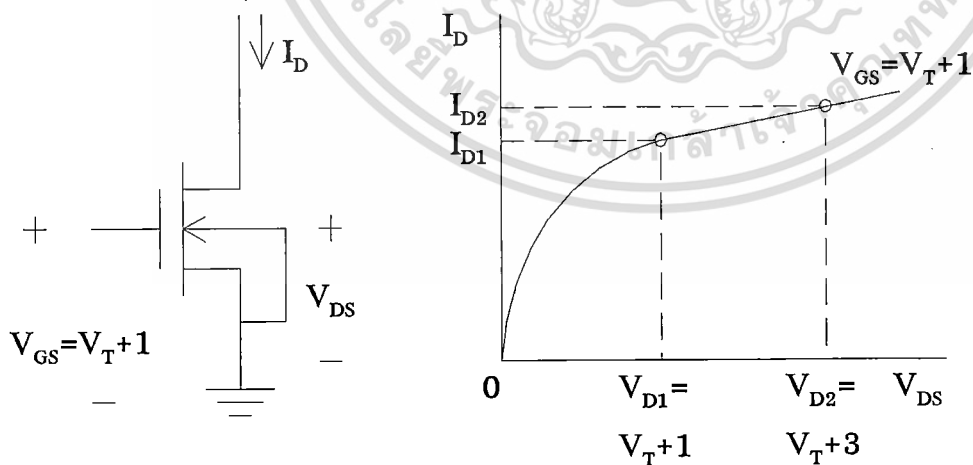
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (1)  $V_{TO}$  ทหจากจุดตัดแกน

(2)  $k = k' \frac{W}{L}$  ทหจากเส้นความชัน:  $\sqrt{k} = \frac{\sqrt{2I_D}}{V_{GS} - V_T}$

(3)  $\gamma = \frac{V_T(V_{SB}) - V_{TO}}{\sqrt{V_{SB} + 2\Phi_F} - \sqrt{2\Phi_F}}$  ;  $2\Phi_F \cong 0.6 \text{ V}$



(ข) (4)  $\lambda$  ทหจาก

$$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{1 + \lambda V_{DS2}}{1 + \lambda V_{DS1}}$$

รูปที่ 2.1 แสดงการวัดค่าพารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการรวบรวม เพื่อคำนวณค่า  $V_T$ ,  $\gamma$ ,  $K = K'(W/L)$  และ  $\lambda$  แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ทดสอบ และกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดัน โดยแรงดันขีดเริ่ม  $V_T$  ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ของอุปกรณ์  $K$  (device transconductance) และค่าสัมประสิทธิ์บอดี้เอฟเฟค  $\gamma$  ทั้งหมดนี้ ถูกคำนวณจากกลุ่มแรกของข้อมูล กลุ่มที่สองของการวัด จะถูกใช้เพื่อคำนวณค่าการมอดูเลชัน ความยาวช่องทางเดิน (channel-length modulation)  $\lambda$  แต่ในงานวิจัยนี้ ค่า  $\lambda$  กำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากความยาวช่องทางเดินกระแส ในมอสทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบมีขนาดเล็กสุด  $20 \mu\text{m}$  ซึ่งจะไม่มีผลต่อค่า  $\lambda$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 3.1 การทดลองเพื่อศึกษาการควบคุมค่าแรงดันขีดเริ่มของโครงสร้างมอส

แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{th}$ ) คือค่าต่ำสุดของแรงดันเกต ที่ทำให้เกิดช่องทางเดินกระแสที่รอยต่อซิลิกอน-ซิลิกอนไดออกไซด์ ของโครงสร้างมอส จากสมการของแรงดันขีดเริ่มจะเห็นได้ว่าแรงดันขีดเริ่มขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่าง ๆ เช่นค่าประจุที่สถานะผิว ( $Q_{ss}$ ) ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือของแผ่นผลึกฐานรองที่ใช้ ( $N_{sub}$ ) ความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกต ( $T_{ox}$ ) ค่าความแตกต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ดังนั้นในการทดลองนี้จะได้หาความสัมพันธ์ของค่า แรงดันขีดเริ่ม กับพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่กล่าวถึง โดยเริ่มจากการทดลองสร้างมอสเฟท ที่เราทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือของแผ่นผลึกฐานรองที่ใช้ ( $N_{sub}$ ) ความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกต ( $T_{ox}$ ) ค่าความแตกต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำซิลิกอน แล้วนำมาวัดคุณสมบัติ ค่าแรงดันขีดเริ่ม และคุณสมบัติความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในที่สุดจะสามารถวิเคราะห์หาค่าประจุที่สถานะผิว ( $Q_{ss}$ ) ได้ ค่าที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ป็นค่าคงที่ สำหรับห้องปฏิบัติการ และสำหรับกระบวนการสร้างมอสเฟทชนิดเกตโลหะต่อไป

นอกจากนี้ได้ทำการทดลอง จำลองแบบคุณสมบัติค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟท กับพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากมอสเฟทที่สร้างจริง ปรากฏว่ามีความแตกต่างเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้งานได้เป็นอย่างดี รายละเอียดของการทดลองและผลการทดลองจะได้กล่าวถึงต่อไป

#### 3.2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์หาค่าประจุที่สถานะผิว ( $Q_{ss}$ ) ของห้องปฏิบัติการ

ประจุที่สถานะผิว ( $Q_{ss}$ ) เป็นประจุที่เกิดขึ้นที่สถานะผิวในโครงสร้างมอส ซึ่งเกิดขึ้นจากประจุเคลื่อนที่ และประจุที่รอยต่อของซิลิกอน-ซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มดังสมการ

$$V_{to} = -0.6 - \Phi_F - \frac{1}{C_{ox}} \left( \sqrt{4q\epsilon_{si} N_{sub} |\phi_F|} + Q_{ss} \right); \text{ P-channel และ}$$

$$V_{to} = -0.6 + \Phi_F + \frac{1}{C_{ox}} \left( \sqrt{4q\epsilon_{si} N_{sub} |\phi_F|} - Q_{ss} \right); \text{ N-channel} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความหนาของชั้นออกไซด์ มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า ดังนี้

$$T_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} ; \epsilon_{ox} = 3.51 \text{ e-13 F/cm} \quad (3.2)$$

และค่าศักดาผิว มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือฐานรอง ดังนี้

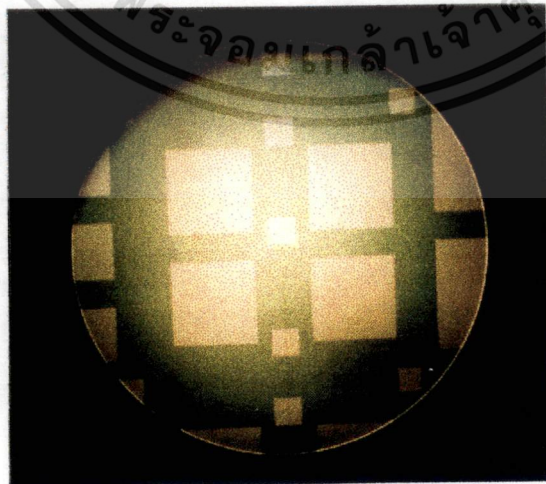
$$2\Phi_F = 2 \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{N}{n_i}\right) \quad (3.3)$$

กระบวนการสร้างในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงปริมาณของค่าประจุที่สถานะผิวที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้าง และจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค่าแรงดันขั้วตเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการต่อไป

#### การออกแบบและการสร้าง

ทำการออกแบบมอนิเตอร์รูปสี่เหลี่ยมขนาด  $3.60 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$  ในลักษณะเดียวกันกับการทดลองเรื่องค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างมอส

จากนั้นทำการสร้างโครงสร้างมอสการสร้าง โดยใช้แผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดเอ็น ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน  $4-6 \ \Omega \cdot \text{cm}$  ( $N_{\text{sub}} = 2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) และแผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดพี ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน  $1-2 \ \Omega \cdot \text{cm}$  ( $P_{\text{sub}} = 1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) ทำการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีความหนา  $1000 \ \text{\AA}$  จากนั้นทำการสร้างขั้วโลหะด้านบน ลักษณะของมอนิเตอร์โครงสร้างมอสที่สร้างได้แสดงดังในรูปที่ 3.1

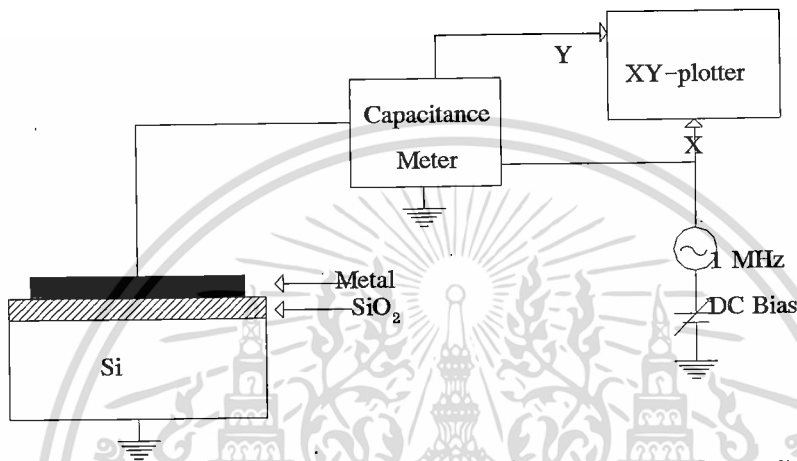


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

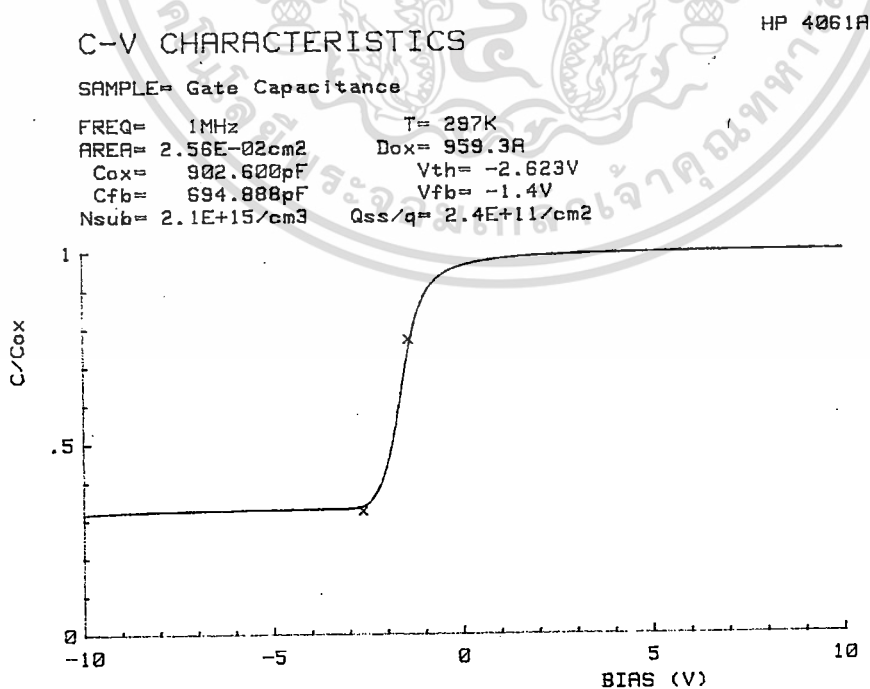
รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายด้านบนของมอนิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้าในโครงสร้างมอส

**การทดลองและผลการทดลอง**

มอนิเตอร์โครงสร้างมอสที่ได้จากกระบวนการสร้าง ถูกนำมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง HP4061A Semiconductor/component test system โดยมีวงจรสมมุทธ์การวัดดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรมุมุทธ์ในการวัดค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าในโครงสร้าง โดยการให้แรงดันไบอัสไฟตรงระหว่าง 10 โวลต์ถึง -10 โวลต์ พร้อมกับให้ความถี่ 1 MHz ผลของการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงกราฟคุณสมบัติของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของโครงสร้างมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

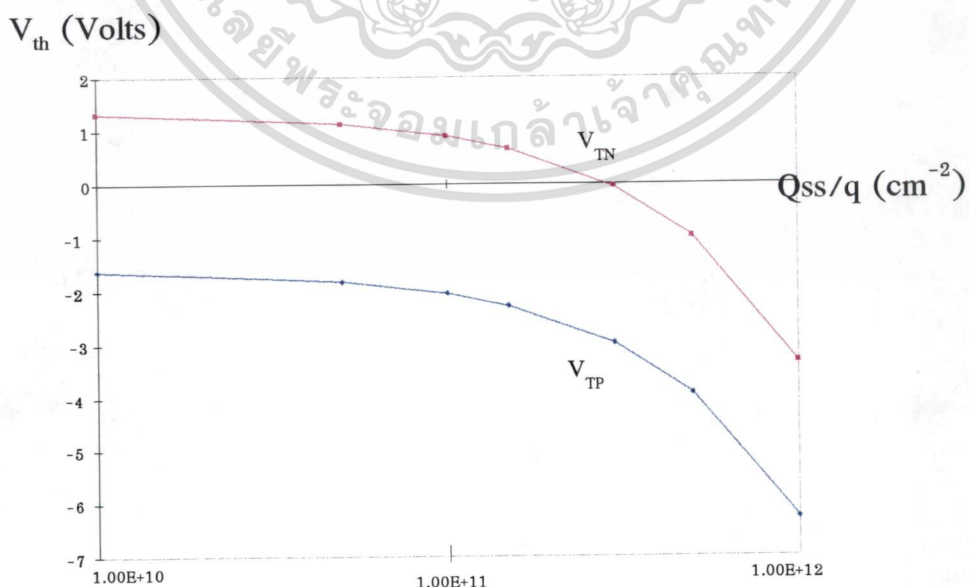
จากกราฟในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นโครงสร้างของมอสที่มีค่า  $N_{sub} = 2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_{ox} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{A}$  แสดงให้เห็นว่า  $Q_{ss}/q$  มีค่า  $2.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  และเมื่อทำการเปลี่ยนความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรอง เป็น  $1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และ  $8.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  พบว่า ค่า  $Q_{ss}/q$  ที่ได้จะอยู่ในช่วง  $2 \times 10^{11} - 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  ตามลำดับ และเมื่อทำการเฉลี่ยข้อมูลแล้ว จะสรุปได้ว่าค่า  $Q_{ss}/q$  ของห้องปฏิบัติการมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ  $5.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  ซึ่งโดยทั่วไปที่ใช้ในห้องปฏิบัติการอื่นๆจะมีค่าของ  $Q_{ss}/q$  เป็น  $4.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  และความจุไฟฟ้าที่เกต  $C_{ox} = 35.1 \text{ nF/cm}^2$  และที่ Field oxide =  $7.02 \text{ nF/cm}^2$

### 3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของประจุที่สถานะผิวที่มีต่อแรงดันขีดเริ่ม

จากสมการ 3.1 ที่กล่าวมาแล้วแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและประจุที่สถานะผิว ( $Q_{ss}$ ) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าประจุที่สถานะผิว จะมีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม ดังนั้นในการทดลองนี้ จะทำการศึกษาเพื่อให้ทราบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่ม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าประจุที่สถานะผิว จากสมการ 3.1 ถึง 3.3 เมื่อกำหนดค่าความหนาออกไซด์และค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือฐานรอง ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและประจุที่สถานะผิวได้ ดังการทดลองคำนวณได้ต่อไปนี้

**การทดลองและผลการทดลองจากการคำนวณ**

จากสมการ 3.1 กำหนดให้ค่า  $N_{sub} = 2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $P_{sub} = 1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และค่า  $T_{ox} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{A}$  จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $Q_{ss}/q$  จากช่วง  $1 \times 10^{10}$  ถึง  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  และเขียนกราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{th}$  และ  $Q_{ss}/q$  ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและค่าประจุที่สถานะผิว โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ เป็นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ค่า } N_{\text{sub}} = 2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, P_{\text{sub}} = 1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ และค่า } T_{\text{OX}} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{A}$$

จากรูปกราฟที่ 3.4 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและค่าประจุที่สถานะผิว ในลักษณะความสัมพันธ์แบบเอ็กโปเนนเชียล คือเมื่อค่าประจุที่สถานะผิวน้อย ค่าของแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าน้อย และเมื่อค่าประจุที่สถานะผิวมากขึ้น ค่าของแรงดันขีดเริ่มก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นตามความสัมพันธ์จากสมการ 3.1 โดยมีข้อสังเกตว่าฐานรองซิลิกอนชนิดพี ซึ่งใช้สร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ถ้ามีค่าประจุที่สถานะผิวมากกว่า  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  จะมีโอกาสทำงานในโหมดดีพลีชันได้ง่ายกว่าฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น

### 3.4 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มกับค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือในชั้นฐานรอง

จากสมการ 3.1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและความเข้มข้นอะตอมสารเจือในชั้นฐานรอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือมีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและความเข้มข้นอะตอมสารเจือในชั้นฐานรองได้ ดังการทดลองต่อไปนี้

#### การออกแบบและการสร้าง

ทำการออกแบบมอเนเตอร์รูปลี่เหลี่ยมขนาด  $3.60 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$  ในลักษณะเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อ 3.1

จากนั้นทำการสร้าง โดยใช้แผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดเอ็น ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 4-10  $\Omega \cdot \text{cm}$  และแผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดพี ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 1-4  $\Omega \cdot \text{cm}$  จากนั้นแผ่นมอเนเตอร์บางส่วนจะถูกทำการแพร่สารเจือชนิดเอ็นและสารเจือชนิดพี เพื่อให้ได้ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่สูงขึ้น ซึ่งจะได้อิเล็กตรอนที่มีอะตอมสารเจือในช่วง  $2 \times 10^{15}$  ถึง  $9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  หลังจากนั้นทำการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ  $1000 \text{ }^{\circ}\text{A}$  จากนั้นทำการสร้างขั้วโลหะด้านบน จึงนำไปวัดค่าแรงดันขีดเริ่มและความเข้มข้นอะตอมสารเจือในชั้นฐานรอง

#### การทดลองและผลการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง HP4061A Semiconductor/component test system นำมาเขียนสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและความเข้มข้นอะตอมสารเจือได้ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟรูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและความเข้มข้นอะตอมสารเจือชั้นฐานรองจากผลการทดลองสร้างจริงและการคำนวณจากแบบจำลอง ซึ่งใกล้เคียงกันมาก และต่างก็อยู่ในลักษณะความสัมพันธ์แบบเอ็กโปเนนเชียล คือเมื่อความเข้มข้นอะตอมสารเจือชั้นฐานรองน้อย ค่าของแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าน้อย และเมื่อความเข้มข้นอะตอมสารเจือชั้นฐานรองมากขึ้น ค่าของแรงดันขีดเริ่มก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือชั้นฐานรองที่มีค่าน้อยกว่า  $5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$  จะให้ค่าแรงดันขีดเริ่มเป็นค่าลบหรือเกิดเป็นดีพลีชันโหมตเอ็นมอส-ทรานซิสเตอร์ หรือก็คือ แผ่นผลึกฐานรองที่มีค่าพิคิตความต้านทานแผ่นซิลิกอนน้อยกว่า  $2.5 \Omega\text{-cm}$  จะทำให้ได้มอสเฟทเป็นดีพลีชันโหมตเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และค่าความหนาออกไซด์ต้องไม่น้อยกว่า  $1000 \text{ \AA}$  และกราฟรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นการคำนวณโดยการแทนค่า  $Q_{ss}/q$  และความหนาออกไซด์ ในสมการ 3.1 พบว่ามีผลใกล้เคียงกับที่ได้จากกระบวนการสร้าง

และเนื่องจากผลจากการทดลองที่ผ่านมาทำให้สรุปได้ว่าการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์บนฐานรองซิลิกอน มีโอกาสที่จะเป็นโหมตดีพลีชันสูงมาก ดังนั้นจึงต้องระมัดระวัง และเลือกแผ่นผลึกฐานรองให้ถูกต้อง

### 3.5 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มกับความหนาของเกตออกไซด์ (Tox)

ค่าแรงดันขีดเริ่มมีความสัมพันธ์กับความหนาของชั้นออกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปของค่าความจุไฟฟ้า ดังแสดงในสมการ 3.1 และ 3.2 ดังนั้น จึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและความหนาของชั้นออกไซด์ได้ ดังการทดลองต่อไปนี้

#### การออกแบบและการสร้าง

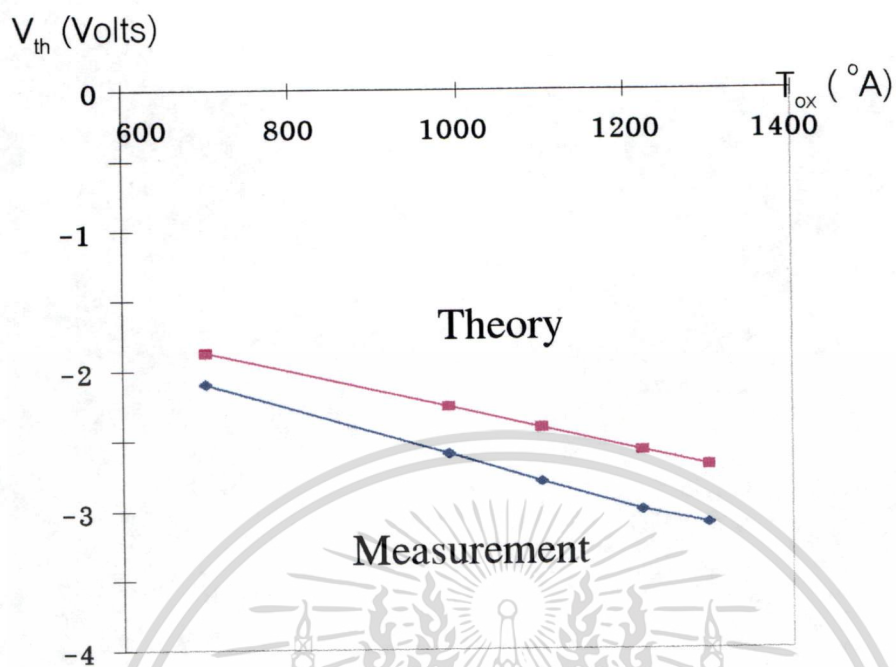
ทำการออกแบบมอนิเตอร์รูปสี่เหลี่ยมขนาด  $3.60 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$  ในลักษณะเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อ 3.2

จากนั้นทำการสร้าง โดยใช้แผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดเอ็น ระบาย (100) ( $N_{sub} = 2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $Q_{ss}/q = 2.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ) และแผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดพี ระบาย (100) ( $P_{sub} = 1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $Q_{ss}/q = 5.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  และ  $P_{sub} = 8.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $Q_{ss}/q = 7.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ) ทำการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีความหนาตามต้องการ จากนั้นทำการ สร้างขั้วโลหะด้านบน จึงนำไปวัดค่าแรงดันขีดเริ่มและความหนาของชั้นออกไซด์

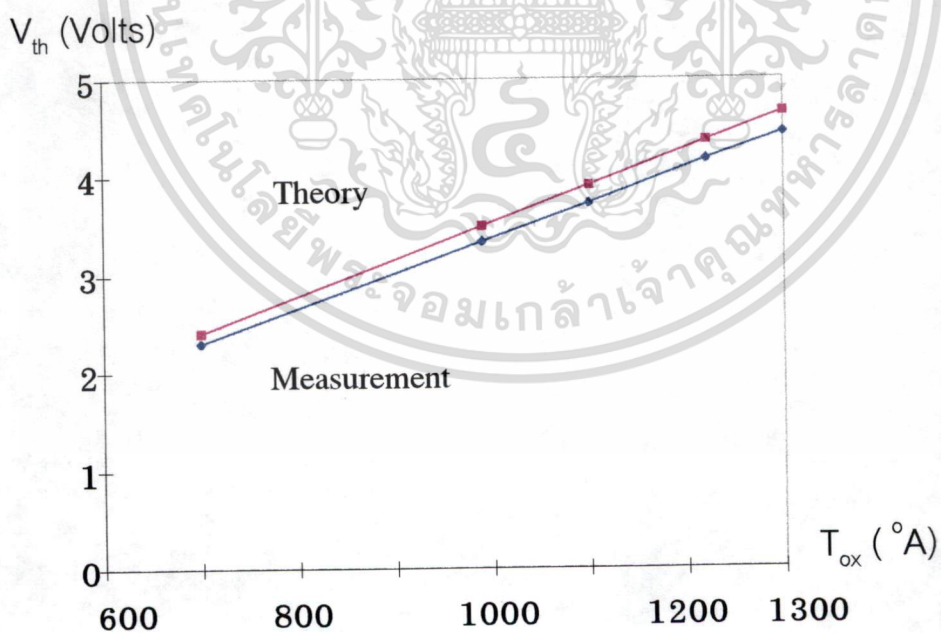
#### การทดลองและผลการทดลอง

มอนิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการสร้าง จะถูกวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง HP4061A Semiconductor/component test system และวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนาชั้นฟิล์ม (Ellipsometer-Gaertner) จากข้อมูลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

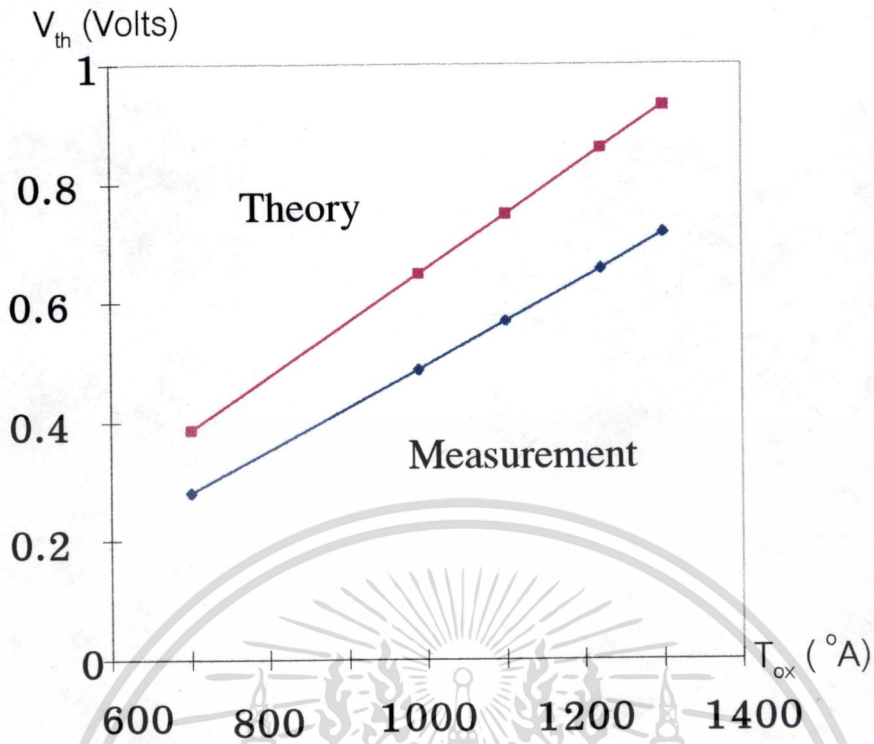


ก.  $N_{sub} = 2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , และ  $Q_{ss}/q = 2.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$



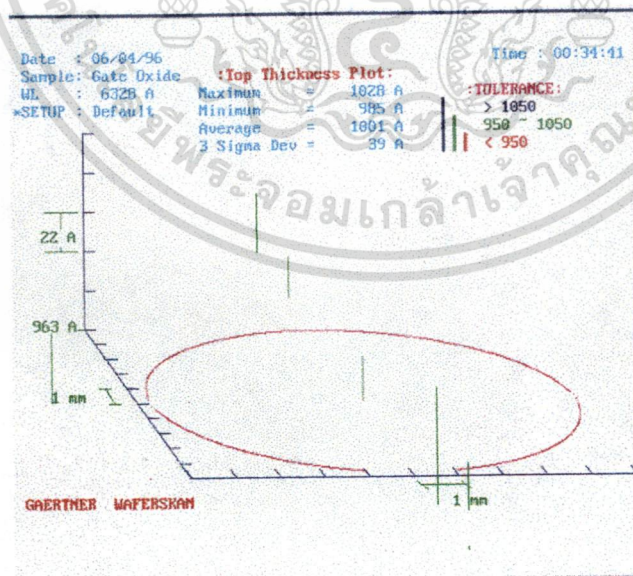
ข.  $P_{sub} = 8.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , และ  $Q_{ss}/q = 7.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค.  $P_{sub} = 1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , และ  $Q_{ss}/q = 5.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและความหนาชั้นออกไซด์ค่าต่างๆที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์ของ Ellipsometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

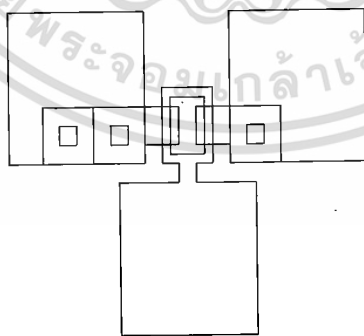
จากรูปกราฟที่ 3.7 (ก) - (ค) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและความหนาของชั้นออกไซด์ ในลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง คือเมื่อชั้นออกไซด์มีความหนาน้อย ค่าของแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าน้อย และเมื่อชั้นออกไซด์มีความหนาเพิ่มขึ้น ค่าของแรงดันขีดเริ่มก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นตามความสัมพันธ์จากสมการ 3.1 และ 3.2

### 3.6 การทดลองเพื่อศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์

แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ( $V_{th}$ ) คือค่าต่ำสุดของแรงดันเกต-ซอส ที่เหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสทรานซิสเตอร์ แรงดันขีดเริ่มมีค่าน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทางกายภาพต่างๆ ดังกล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา แต่พารามิเตอร์ที่สามารถใช้กำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มที่สำคัญได้แก่ ความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกตและความเข้มข้นของฐานรอง ดังนั้นในการควบคุมค่าแรงดันขีดเริ่มจึงสามารถควบคุมได้จากความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกต และความเข้มข้นของฐานรองที่ใช้

#### การออกแบบและการสร้าง

ค่าแรงดันขีดเริ่ม หาได้จากการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ดังนั้นการทดลองนี้ จึงหาได้จากการวัดมอสทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบไว้ โดยมอสทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบมีค่าขนาดช่องทางเดินกระแสค่าต่างๆ เช่น  $(W/L) = 40/10, 40/20, 40/30, 60/10, 60/20, 60/30, 100/10, 100/20$  และ  $100/30$  เป็นต้น โดยรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นลวดลายมาสก์ของมอสทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดช่องทางเดินกระแสเป็น  $(W/L) = (40/20)$



รูปที่ 3.9 แสดงลวดลายมาสก์ของมอสทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดช่องทางเดินกระแส

$$(W/L) = (40/20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นสร้างมอสทรานซิสเตอร์ โดยใช้แผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดเอ็น ระบาย(100) พิกัดความต้านทาน 4-6  $\Omega$ .cm เพื่อสร้างพื่มอสทรานซิสเตอร์ และแผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดพี ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 1-2  $\Omega$ .cm เพื่อสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ จากนั้นทำการแพร่สารเจือและสร้างชั้นออกไซด์ โดยกำหนดให้ชั้นออกไซด์ทั่วไปหนาประมาณ 5000  $\text{Å}$  และความหนาชั้นออกไซด์เกตหนา 1000  $\text{Å}$  จากนั้นสร้างขั้วโลหะด้านบน และนำไปวัดคุณสมบัติเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ต่อไป โดยรูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายสวดลายด้านบนของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ ภายหลังจากเสร็จจากกระบวนการสร้าง



ก. เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ( $W/L$ ) = (40/20)



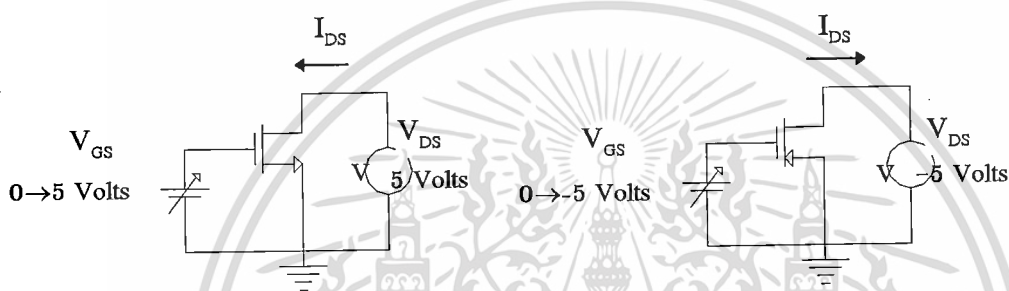
ข. พื่มอสทรานซิสเตอร์ ( $W/L$ ) = (40/20)

รูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายด้านบนของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ

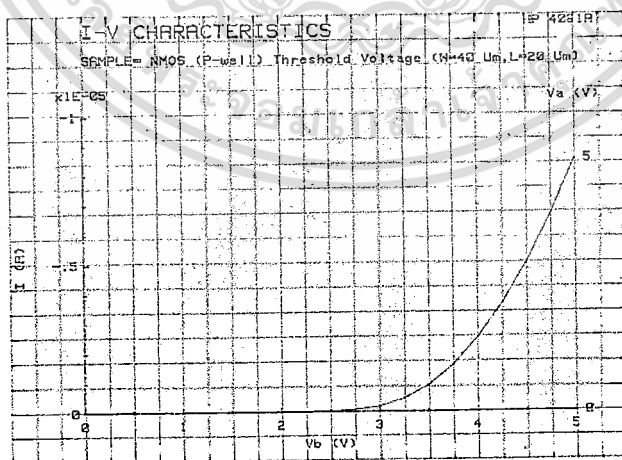
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การทดลองและผลการทดลอง**

มอสทรานซิสเตอร์ที่เสร็จจากกระบวนการสร้างแล้ว ถูกวัดคุณสมบัติเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยเครื่อง HP4061A Semiconductor/component test system โดยมีวงจรการวัดดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ถูกให้แรงดันไบอัสไฟตรงที่ขั้วเดรน-ซอส ( $V_{DS} = 5$  โวลต์) และเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงที่ขั้วเกทจาก 0 ถึง 5 โวลต์ ส่วนพีมอสทรานซิสเตอร์ให้แรงดันไฟตรงที่ขั้วซอส ( $V_{DS} = -5$  โวลต์) และเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงที่ขั้วเกทจาก 0 ถึง -5 โวลต์ ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 3.12

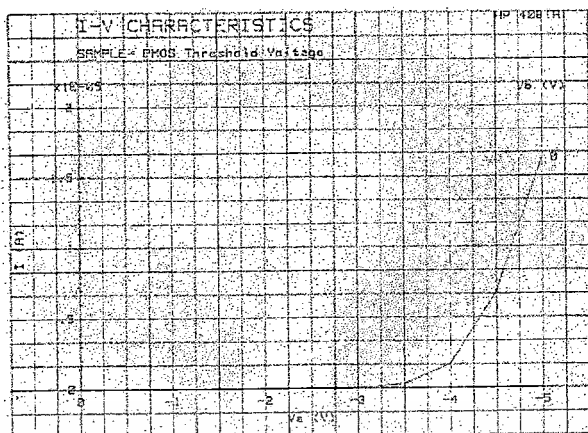


ก. เอ็นมอสทรานซิสเตอร์      ข. พีมอสทรานซิสเตอร์  
รูปที่ 3.11 แสดงวงจรการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์



ก. เอ็นมอสทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ข. พิมอสทรานซิสเตอร์

รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นชนิดต่าง ๆ

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

แรงดันขีดเริ่มเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญของมอสทรานซิสเตอร์ และเป็นค่าของแรงดันเกตที่จะทำให้กระแสเริ่มไหลระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอร์ส วิธีการหาค่าแรงดันขีดเริ่มมีหลายวิธีด้วยกัน แต่วิทยานิพนธ์นี้ ได้เสนอวิธีการหาจากความสัมพันธ์  $\sqrt{I_D}$  กับ  $V_{GS}$  โดยการหาจากกราฟที่สองของกระแสเดรนที่สัมพันธ์กับแรงดันเกต ลากเส้นตรงจากเส้นกราฟตัดที่แกน X จุดตัดที่ได้คือค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{th}$ ) อีกวิธีหนึ่งเพื่อให้มั่นใจว่ามอสทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัว โดยการลัดวงจรขั้วเกตเข้ากับขั้วเดรน วิธีการนี้พิจารณาได้จากการหารากที่สองของกระแสอิ่มตัวในสมการกระแสดังนี้

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (3.4)$$

$$\text{และ } \sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{\beta}{2}} (V_{GS} - V_{th}) \quad (3.5)$$

เมื่อให้  $I_D = 0$  จะได้  $V_{GS} = V_{th}$  ซึ่งมีความชันกราฟเป็น

$$\frac{d\sqrt{I_D}}{dV_{GS}} = \sqrt{\frac{\beta}{2}} \quad (3.6)$$

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.12 สามารถหาค่าแรงดันขีดเริ่มได้ โดยการหารากที่สองของกระแสเดรน และเขียนกราฟความสัมพันธ์ของรากที่สองของกระแสเดรนกับแรงดันเกต จากนั้นหาจุดตัดแกนของแรงดันเกต เพื่ออ่านค่าแรงดันขีดเริ่ม และข้อมูลตัวอย่างอื่น ๆ สามารถสรุปค่าแรงดันขีดเริ่ม ได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น

ชนิด	ค่าแรงดันขีดเริ่ม (โวลต์)								
	40/10	40/20	40/30	60/10	60/20	60/30	100/10	100/20	100/30
NMOS	2.50	2.85	2.75	2.80	2.85	3.00	2.95	2.85	2.90
PMOS	-2.85	-2.80	-2.90	-2.85	-2.85	-2.80	-2.90	-3.00	-2.90

จากตารางที่ 3.1 สรุปได้ว่าที่อัตราส่วน ( $W/L$ ) ค่าต่าง ๆ จะมีค่าแรงดันขีดเริ่มอยู่ในกลุ่มเดียวกัน เนื่องจากค่าแรงดันขีดเริ่มไม่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน ( $W/L$ ) แต่ขึ้นกับค่าความหนาของชั้นออกไซด์และความเข้มข้นของฐานรองซิลิกอนเท่านั้น และสรุปได้ว่า ค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์มีค่าประมาณ 2.85 โวลต์ และพีมอสทรานซิสเตอร์มีค่าประมาณ -2.80 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันขีดเริ่มที่ได้เป็นค่าที่ใช้ได้เฉพาะกระบวนการสร้างนี้เท่านั้น เนื่องจากค่าแรงดันขีดเริ่มขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นด้วย ดังกล่าวมาแล้ว

### 3.7 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญอย่างหนึ่ง มอสทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นควรมีคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่ดี มีความเสถียรภาพ มีกระแสช่วงอิมิต์ที่ดี จึงจะทำให้วงจรรวมที่ประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ มีคุณสมบัติที่ดีได้

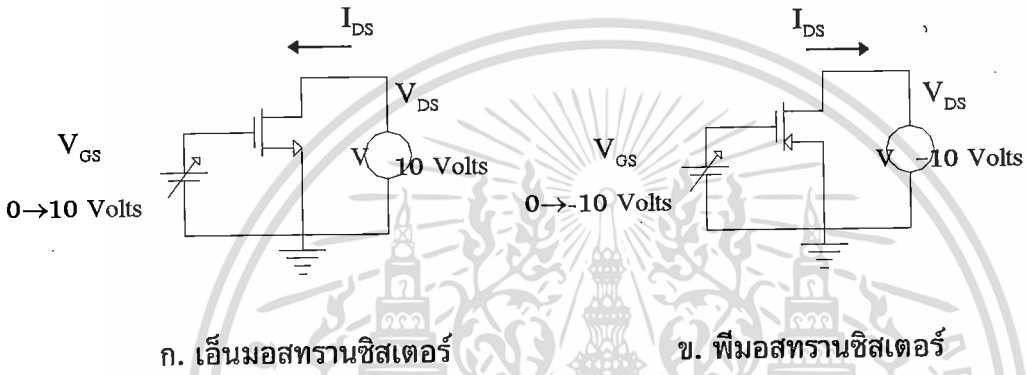
#### การออกแบบและการสร้าง

คุณสมบัติกระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ หาได้จากการวัดมอสทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบไว้ โดยมอสทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบจะมีค่าขนาดช่องทางเดินกระแสค่าต่าง ๆ เช่น  $(W/L) = 40/10, 40/20, 40/30, 60/10, 60/20, 60/30, 100/10, 100/20$  และ  $100/30$  เป็นต้น

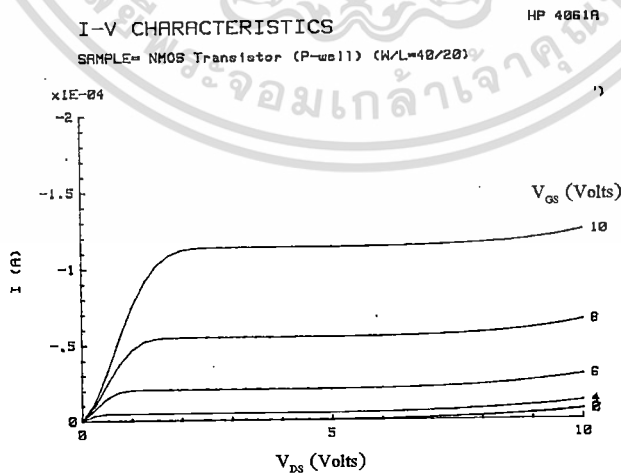
จากนั้นสร้างมอสทรานซิสเตอร์ โดยใช้แผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดเอ็น ระบาย(100) พิกัดความต้านทาน 4-6  $\Omega$ .cm เพื่อสร้างพีมอสทรานซิสเตอร์ และแผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดพี ระบาย(100) พิกัดความต้านทาน 1-2  $\Omega$ .cm เพื่อสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ จากนั้นทำการแพร์สารเจือและสร้างชั้นออกไซด์ โดยกำหนดให้ชั้นออกไซด์ทั่วไปหนาประมาณ 5000  $\text{\AA}$  และความหนาชั้นออกไซด์ที่เกตหนา 1000  $\text{\AA}$  จากนั้นสร้างขั้วโลหะด้านบน และนำไปวัดคุณสมบัติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน-ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ต่อไป

**การทดลองและผลการทดลอง**

มอสทรานซิสเตอร์ที่เสร็จจากกระบวนการสร้างแล้ว จะถูกวัดคุณสมบัติเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยเครื่อง HP4061A Semiconductor/component test system โดยมีวงจรการวัดดังรูปที่ 3.13 ซึ่งเอ็นมอสทรานซิสเตอร์จะถูกให้แรงดันไบอัสไฟตรงที่ขั้วเดรน-ซอส ( $V_{DS} = 10$  โวลต์) และเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงที่ขั้วเกทจาก 0 ถึง 10 โวลต์ ส่วนพีมอสทรานซิสเตอร์จะให้แรงดันไฟตรงที่ขั้วซอส ( $V_{DS} = -10$  โวลต์) และเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟตรงที่ขั้วเกทจาก 0 ถึง -10 โวลต์ ผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.14

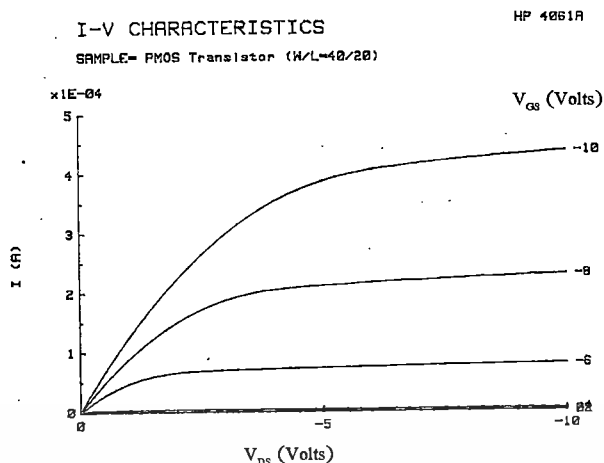


รูปที่ 3.13 แสดงวงจรการวัดค่ากระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์



ก. เอ็นมอสทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ข. พีมอสทรานซิสเตอร์

รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน และแรงดันเดรน-ซอสของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.14 เห็นได้ว่า มอสทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี ที่ได้จากกระบวนการสร้างมีคุณสมบัติทางทรานซิสเตอร์ที่ดี สามารถควบคุมแรงดันเกต เพื่อให้ได้ช่วงกระแสที่ดั่งที่ดั่งนั้นมอสทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี ที่ได้จากกระบวนการสร้างนี้ สามารถนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมได้ต่อไป

### 3.8 การทดลองเพื่อศึกษาค่าตัวแปรทางกายภาพและผลจากการจำลองแบบของมอสทรานซิสเตอร์

จากผลการทดลองคุณสมบัติต่างๆของมอสทรานซิสเตอร์ที่ผ่านมา สามารถนำไปหาค่าตัวแปรทางกายภาพและทางไฟฟ้าได้ ซึ่งจะใช้เป็นตัวแปรในการจำลองแบบมอสทรานซิสเตอร์ และใช้เป็นแบบจำลองมาตรฐานของกระบวนการสร้างและในการออกแบบวงจรในครั้งต่อไป

#### การทดลองและผลการทดลองจำลองแบบมอสเฟต

นำพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและจากการสร้างจริงมาเป็นตัวแปรในการจำลองแบบเช่น

- ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองชนิดเอ็น ( $N_{sub}, N_D$ ) =  $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
- ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองชนิดพี ( $P_{well}, N_A$ ) =  $8.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เกตอ็อกไซด์ มีค่า  $3.51 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$  และหาค่าความหนาของเกต  $T_{ox} = 997 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ มีค่า 2.85 โวลต์
  - แรงดันขีดเริ่มของพีมอสทรานซิสเตอร์ มีค่า -2.80 โวลต์
- สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการจำลองแบบที่สำคัญอื่นๆ มีดังนี้
- ค่าทรานคอนดักแตนซ์ของขบวนการสร้าง (K)สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ โดยค่า K จะเป็นความชันของเส้นกราฟ ซึ่งสรุปได้ว่า

-  $K_n$  ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ มีค่า  $1.82 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2$

-  $K_p$  ของพีมอสทรานซิสเตอร์ มีค่า  $3.4 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2$

บอดีแฟคเตอร์ ( $\gamma$ )

-  $\gamma_n$  ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ มีค่า  $4.83 \text{ V}^{1/2}$

-  $\gamma_p$  ของพีมอสทรานซิสเตอร์ มีค่า  $0.82 \text{ V}^{1/2}$

ศักดาผิว ( $\Phi_s$ )

- ศักดาผิวของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ มีค่า 0.80 โวลต์

- ศักดาผิวของพีมอสทรานซิสเตอร์ มีค่า 0.62 โวลต์

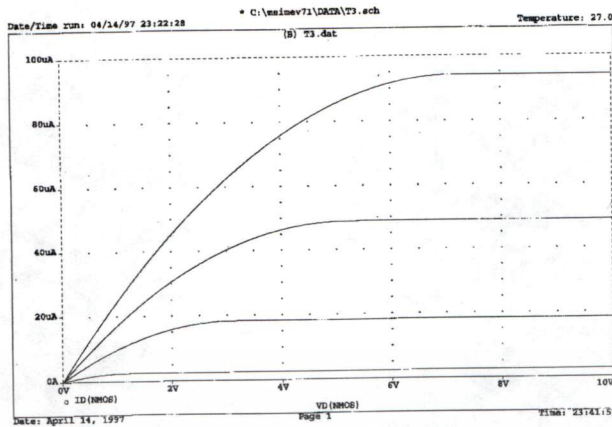
ซึ่งสามารถสรุปค่าตัวแปรสำหรับการจำลองแบบได้ดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตัวแปรสำหรับการจำลองแบบ

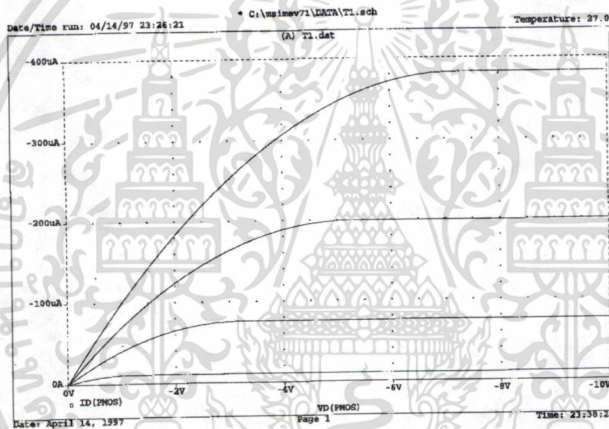
Name	Symbol	Unit	NMOS	PMOS
$N_A$ or $N_D$	NSUB	$\text{cm}^{-3}$	8.7e16	2.5e15
$t_{ox}$	TOX	m	1e-10	1e-10
$V_{TO}$	VTO	V	2.85	-2.8
K	KP	$\text{A/V}^2$	1.82e-6	3.4e-6
$\gamma$	GAMMA	$\text{V}^{1/2}$	4.8	0.82
$\Phi_s$	PHI	V	0.8	0.62

ตารางที่ 3.2 เป็นค่าตัวแปรของแบบจำลอง ซึ่งจะใช้เป็นตัวแปรในโปรแกรม PSICE ซึ่งเลือกใช้โปรแกรม Microsim 7.1 ในการสร้างแบบจำลองมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้กระบวนการสร้างโดยเทคโนโลยีการแพร่สร้างด้วยความร้อนในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของคุณวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทำการจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์ทั้งคุณสมบัติทางไฟตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.15 จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและการจำลองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

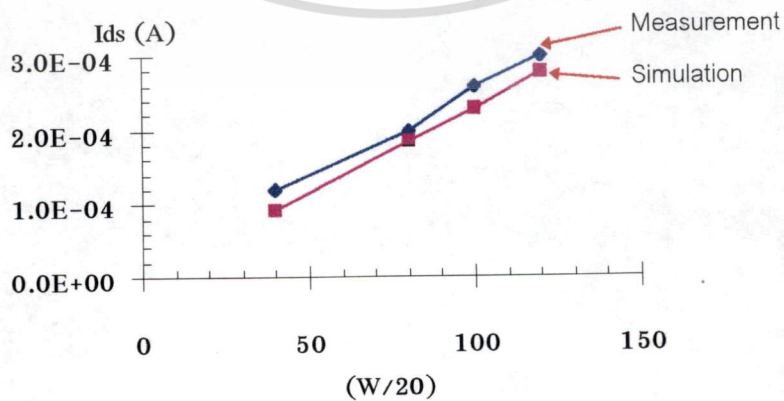


ก. เอ็นมอสทรานซิสเตอร์



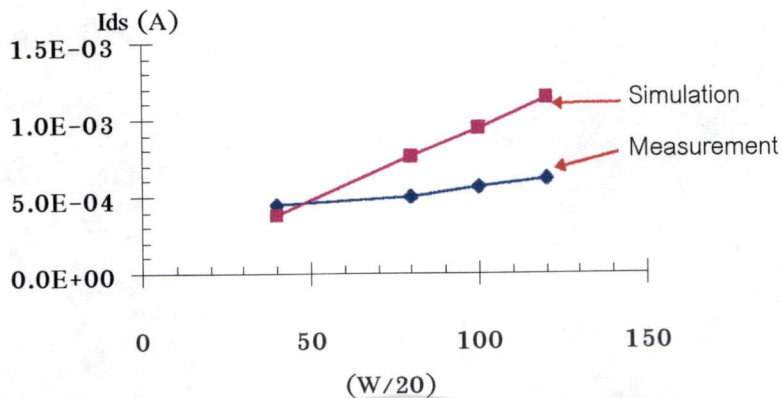
ข. พีมอสทรานซิสเตอร์

รูปที่ 3.15 แสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการจำลองแบบ



ก. เอ็นมอสทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ข. พิมอสทรานซิสเตอร์

รูปที่ 3.16 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากระแสอิ่มตัวของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดและการจำลองแบบ

จากผลการทดลอง สามารถหาค่าตัวแปรสำคัญต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์ที่ได้จากกระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบ ผลของคุณสมบัติที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากการจำลองแบบ จะได้ว่าผลของที่ได้จากการจำลองแบบจะต่างจากที่ได้จากการวัดเล็กน้อย ค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ยประมาณ 10 % ในเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ 20 % ในพิมอสทรานซิสเตอร์ ผลความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้น อาจเป็นผลจากแบบจำลองที่ใช้มีค่าตัวแปรที่ไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น ความคลาดเคลื่อนของการอ่านค่าข้อมูลที่ได้จากการวัดผลการทดลอง ความไม่ครบถ้วนของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่ได้นี้ ยังคงสามารถใช้ในการคาดหมายคุณสมบัติของอุปกรณ์มอส ก่อนที่จะดำเนินการสร้าง

## บทที่ 4

### สรุปและวิจารณ์

งานศึกษาและวิจัยนี้ มีความสำคัญต่อการพัฒนา ห้องปฏิบัติการโซลิตสเตท ศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง เพื่อให้เป็นห้องวิจัยที่เป็นมาตรฐาน ที่สามารถให้บริการแก่สถาบันการศึกษาอื่น ๆ ที่ไม่มีห้องปฏิบัติการนี้เป็นของตนเอง ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์มอสได้ ในการออกแบบและจำลองแบบที่เป็นระบบ จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ซึ่งในการทดลองนี้ ใช้โปรแกรม PSPICE และจำเป็นต้องมีข้อมูลของค่าคงที่ที่สำคัญบางตัวของห้องทดลอง เช่น ค่าประจุไฟฟ้าที่สถานะผิว หรือค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์มอส

ในรายงานนี้ได้นำเสนอการทดลองและผลการทดลองหาค่าประจุไฟฟ้าสถานะผิว ของห้องทดลอง พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อย โดยขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในแผ่นผลึกฐานรอง และมีค่า  $Q_{ss}/q$  โดยเฉลี่ยประมาณ  $5.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  เมื่อกำหนดให้ค่า  $Q_{ss}/q$  เป็นค่าคงที่แล้ว การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ก็สามารถทำได้ง่ายขึ้น รายงานนี้ได้เสนอผลการจำลองแบบและผลการทดลอง ในการควบคุมค่าแรงดันขีดเริ่ม โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือในแผ่นผลึกฐานรอง โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นออกไซด์ที่บริเวณเกตของโครงสร้างมอส ทั้งผลการจำลองแบบและผลการทดลอง มีความแตกต่างกันน้อยมาก

ในที่สุดผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปใช้ในการจำลองแบบ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองแบบและผลการทดลองมอสทรานซิสเตอร์ ใกล้เคียงกันมาก ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดและออกแบบอุปกรณ์มอส ที่มีโครงสร้างส่วนเกตเป็นโลหะ อะลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ดี เมื่อห้องปฏิบัติการโซลิตสเตท ได้รับการปรับปรุงให้เป็นห้องสะอาด และมีอุปกรณ์สำหรับกระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ที่มีโพสิซิลิกอน เป็นส่วนเกต ซึ่งเป็นโครงสร้างมาตรฐานของวงจรรวม ดังนั้นวิธีการและกระบวนการศึกษาวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นแบบอย่าง ในการหาพารามิเตอร์ สำหรับการออกแบบและจำลองแบบ ของอุปกรณ์มอสที่มีเกตเป็นโพสิซิลิกอนได้

## ภาคผนวก

### (ก) โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ pMOS.lib

```
.model p6020 PMOS
```

```
( NSUB=2.5e15
```

```
TOX=1e10
```

```
VTO=-2.8
```

```
KP=3.4e-6
```

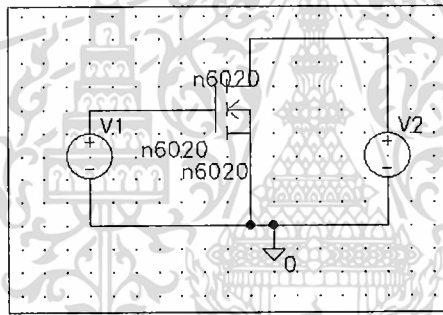
```
PHI=0.62
```

```
GAMMA=0.82
```

```
LEVEL=1)
```

สำหรับตัวอย่างรายละเอียดโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบมีดังนี้

### 1. \* NMOS I-V Characteristics Simulation \*



```
** Analysis setup **
```

```
.DC LIN V_V2 0 20 .5
```

```
+ LIN V_V1 0 20 2
```

```
.OP
```

```
* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:
```

```
.lib "D:\msimev71\lib\n6020.lib"
```

```
**** INCLUDING n6020.net ****
```

```
* Schematics Netlist *
```

```
V_V1 $N_0001 0
```

```
V_V2 $N_0002 0
```

```
M_n6020 $N_0002 $N_0001 0 0 n6020
```

```
+ L=20u
```

```
+ W=60u
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\* RESUMING n6020.cir \*\*\*\*

.INC "n6020.als"

\*\*\*\* INCLUDING n6020.als \*\*\*\*

\* Schematics Aliases \*

.ALIASES

V\_V1 V1(+= \$N\_0001 --=0 )

V\_V2 V2(+= \$N\_0002 --=0 )

M\_n6020 n6020(d=\$N\_0002 g=\$N\_0001 s=0 s=0 )

.ENDALIASES

\*\*\*\* RESUMING n6020.cir \*\*\*\*

.probe ID(n6020)

.END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

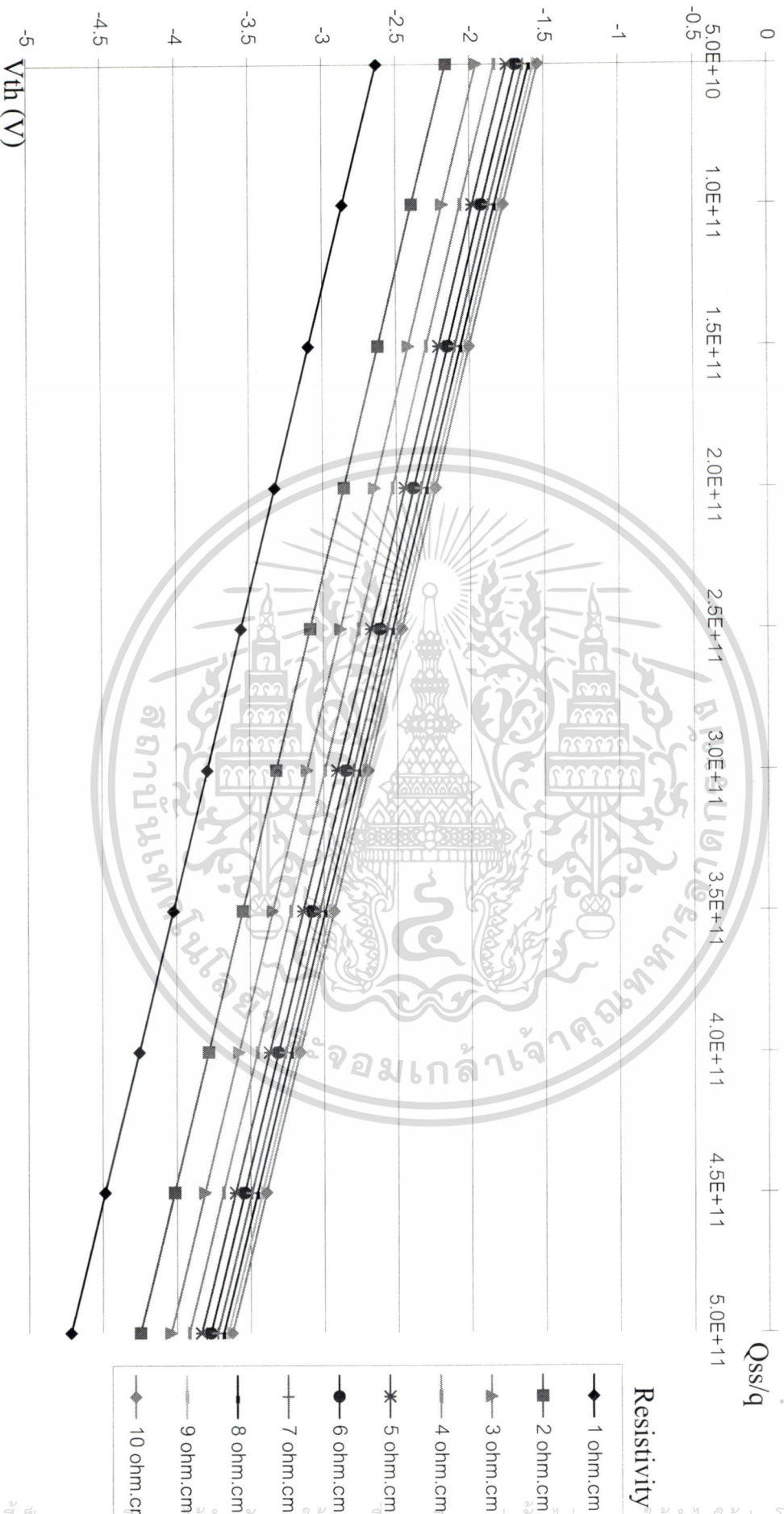
## ภาคผนวก

(ข) กราฟ  $V_{th}-Q_{ss}/q$  ที่  $N_{sub}$ ค่าต่างๆ



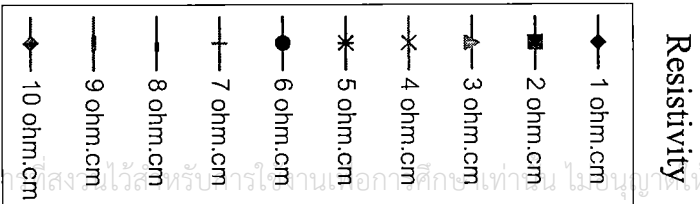
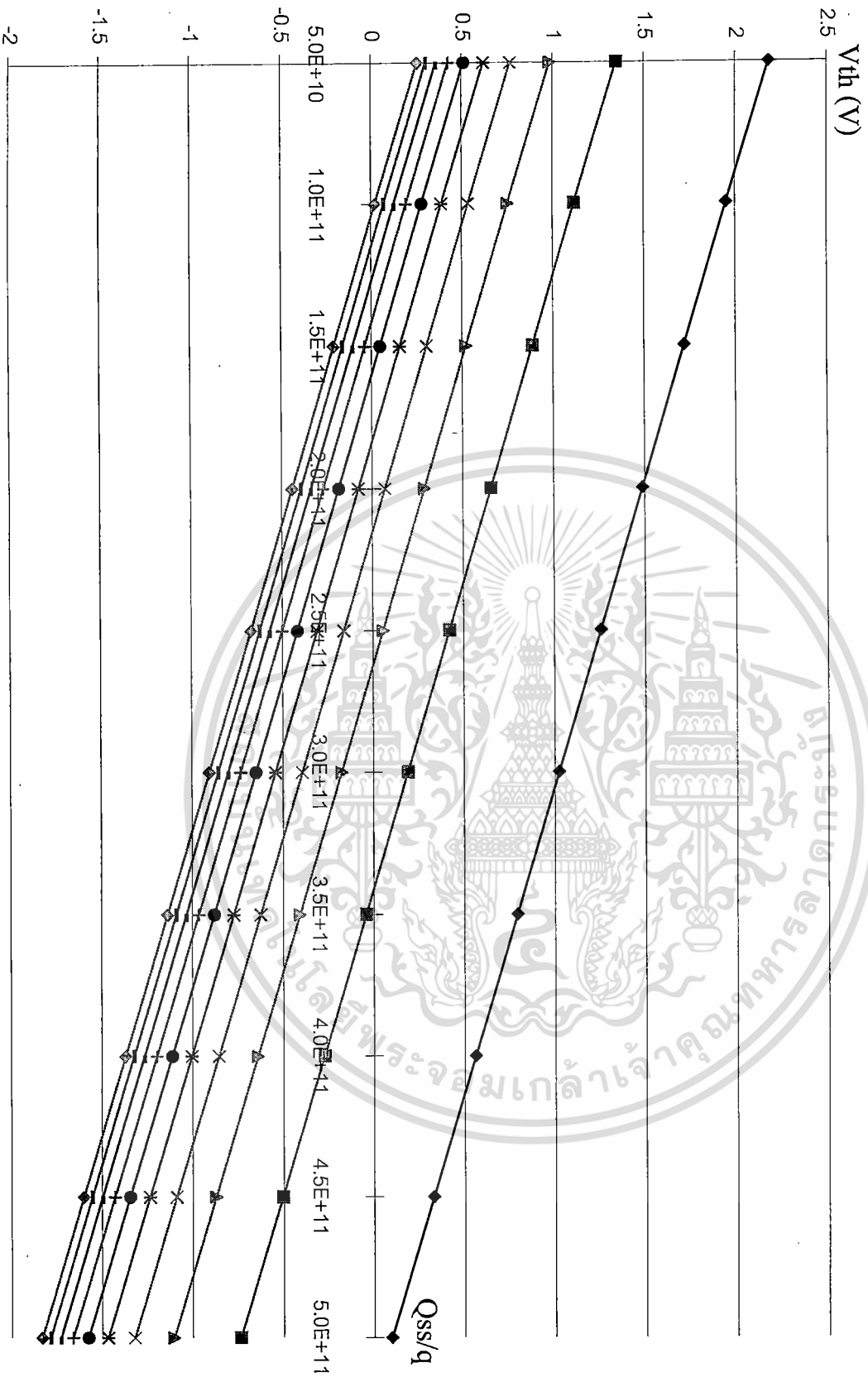
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{th} - Q_{ss}/q$  (N type Substrate,  $T_{ox} = 1000 \text{ } ^\circ\text{A}$ )



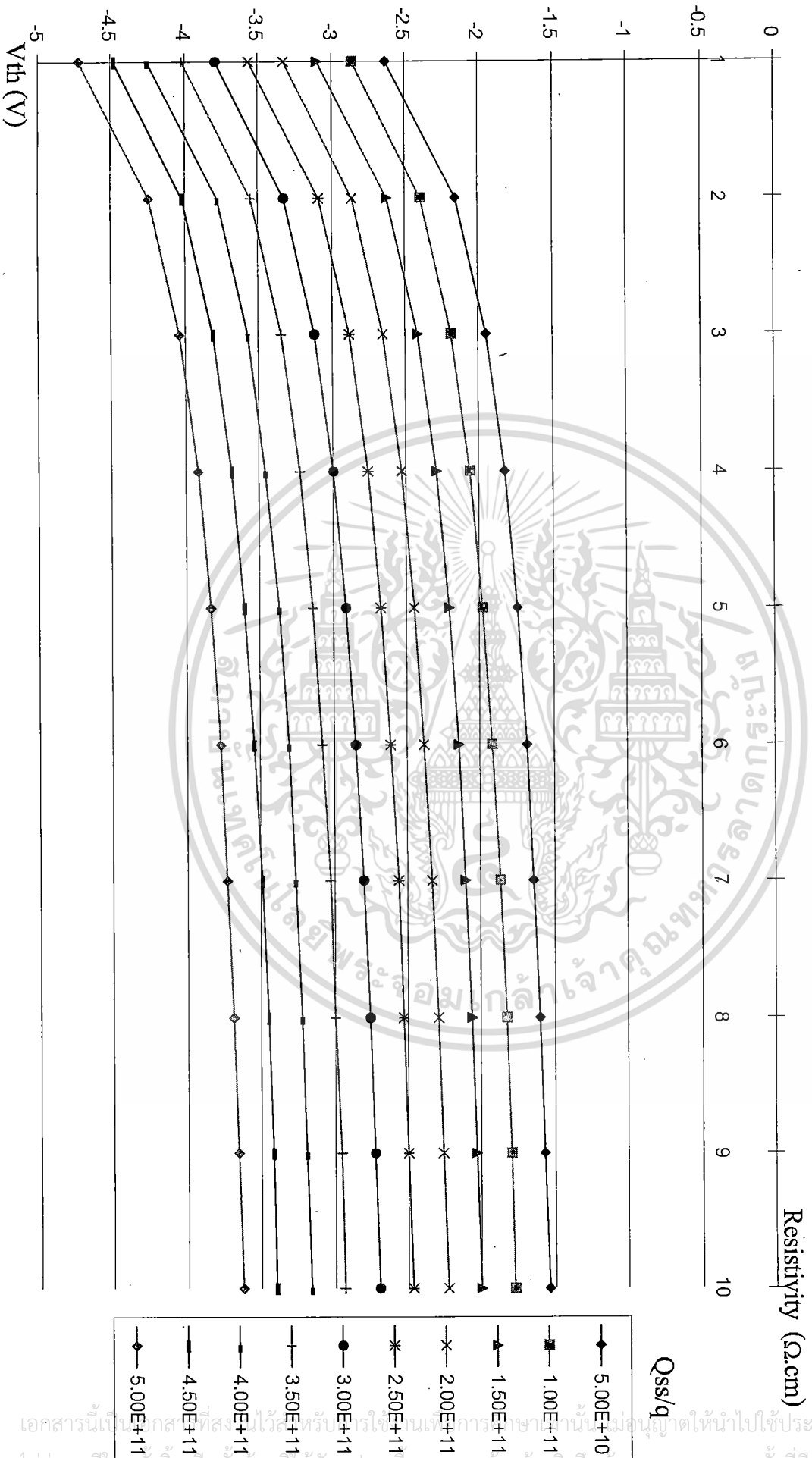
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{th}$  -  $Q_{ss}/q$  (P type Substrate,  $T_{ox} = 1000 \text{ } ^\circ\text{A}$ )

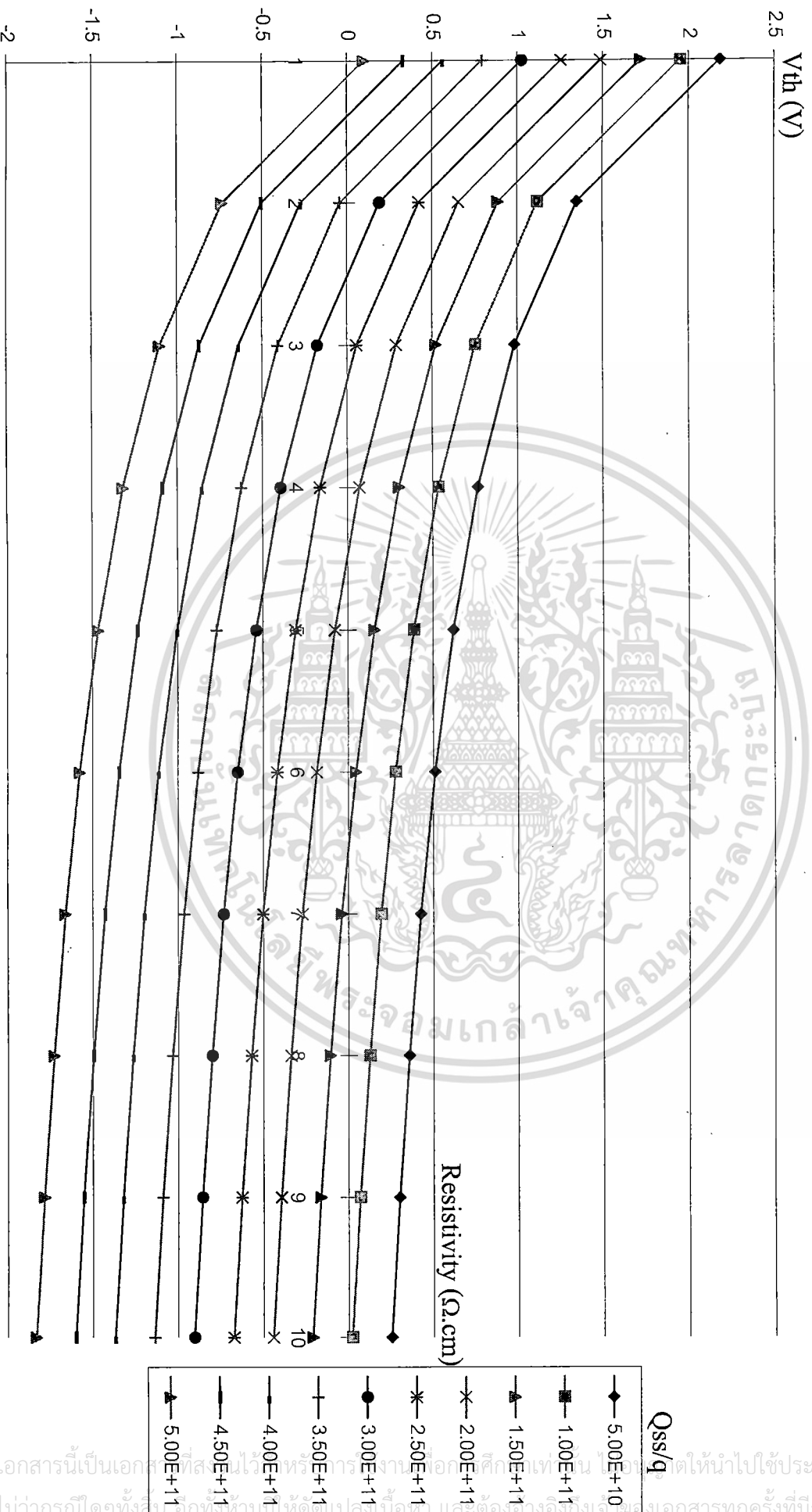


เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V<sub>th</sub> - Resistivity (N type Substrate, T<sub>ox</sub> = 1000 °A)



Vth - Resistivity (P type Substrate, Tox = 1000 °A)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่เห็นด้วยก่อนนำออกมาใช้ และต้องวางคืนให้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- Phillip E. Allen and Douglas R. Holberg. CMOS Analog Circuits Design. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1987.
- John P. Uyemura. Fundamentals of MOS Digital Integrated Circuits. Addison-Wesley, 1988.
- Randall L. Geiger, Phillip E. Allen and Noel R. Strader. VLSI Design Techniques for Analog and Digital Circuits. New York: McGraw-Hill, 1990.
- Eugene R. Hnatek. Application of Linear Integrated Circuits. John Wiley & Sons, 1975.
- Paul M. Chirlian. Analysis and Design of Integrated Electronic Circuits. New York: Harper & Row, 1987.
- Ramakant A. Gayakwad. Op-Amps and Linear Integrated Circuits. New Jersey: Prentice-Hall, 1988.
- Microsim. Pspice. Microsim Corporation, 1986.
- Marc E. Herniter. Schematic Capture with Pspice. New York: Macmillan College, 1994.
- Adel S. Sedra and Gordon W. Roberts. Spice for Microelectronic Circuits. Saunders College, 1992.
- Don Lancaster. CMOS Cookbook. Howard W. Sam & Co. 1977.
- Dewitt G. Ong. Modern MOS Technology. McGraw-Hill, 1976.
- David A. Hodges and Horace G. Jackson. Analysis and Design of Digital Integrated Circuits. McGraw-Hill, 1988.
- Mauro Zambuto. Semiconductor Devices. McGraw-Hill, 1989.
- S. M. Sze. Physics of Semiconductor Devices. John Wiley & Son, 1969.
- T. M. Sze. Semiconductor Devices Physics and Technology. John Wiley & Son, 1985.
- Oliver J. McCarthy. MOS Device and Circuit Design. Northern Ireland: John Wiley & Sons, 1982.
- Scot W. Ruska. Microelectronic Processing. McGraw-Hill, 1988.
- W. R. Runyan and K. E. Bean. Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology. Addison-Wesley, 1990.
- John Y. Chen. CMOS Devices and Technology for VLSI. New Jersey: Prentice-Hall, 1990.
- Edward S. Yang. Microelectronic Devices. McGraw-Hill, 1988.
- Yannis P. Tsividis. Operation and Modeling of the MOS Transistor. McGraw-Hill, 1988.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Malcolm R. Haskard and Ian C. May. Analog VLSI Design nMOS and CMOS. Prentice-Hall, 1988.

Mohammed Ismail and Terri Fiez. Analog VLSI Signal and Information Processing. McGraw-Hill, 1994.

สมเกียรติ ศุภเดช. ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ. อิเล็กทรอนิกส์เวิร์ลด์, 2525.

เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. การศึกษาออกแบบและสร้างวงจรรวมดิจิทัลพื้นฐานแบบซีมอส. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535.

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. การศึกษาออกแบบสร้างและพัฒนาโมสเฟตกำลัง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้