

การศึกษาวิจัยการออกแบบสร้างแบบพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภท PMOS  
STUDY RESEARCH ON DESIGNING, FABRICATION  
AND DEVELOPMENT OF PMOS

นายสำราญ หวังสีศิริเพชร  
SUMRAN WUNGRISIRIPECH

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.สมเกียรติ ศุภเดช  
อ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

ADVISOR  
ASSOC. PROF. SOMKIAT SUPADECH  
WISUT TITIROONGRUANG

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2529

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
คำนำ	III
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1
1.1 ความก้าวหน้าและการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภท PMOS	1
1.2 โครงสร้างของ MOSFET	1
1.3 ข้อดีของ MOSFET เมื่อเปรียบเทียบกับ Bipolar Transistor	3
1.4 คุณสมบัติการทำงานของ MOSFET	6
1.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่าง MOSFET กับ Bipolar Transistor	7
บทที่ 2 ทฤษฎีการทำงานของ MOSFET	9
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_D$ ) กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟต	9
1 ในช่วงเชิงเส้น (linear)	9
2 ในช่วงอิ่มตัว (saturate)	10
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟต	11
2.3 วิธีการสำหรับวัดค่าแรงดันวิกฤติ	13
2.4 ซอส-เดรน คอนคักเตนต์ ( $g_{sd}$ )	16
2.5 ทรานคอนคักเตนต์ ( $g_m$ )	19
2.6 การตอบสนองความถี่ ( $f_o$ )	20
2.7 Subthreshold current ( $I_{sub}$ )	20
2.8 Avalanche breakdown	21

บทที่ 3	การสร้างมอสเฟตแบบพีแซนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โทมค	23
3.1	วัตถุประสงค์	23
3.2	ขั้นตอนการสร้าง	23
1.	การทำความสะดวกผิวหน้าของแผ่นผลึก	23
2.	ออกซิเดชัน (Oxidation) สร้างชั้น $\text{SiO}_2$	23
3.	การเปิดช่องออกไซด์ สำหรับแพรสสารเจือโบรอน	23
4.	การแพรสสารเจือโบรอน	24
5.	การสร้างชั้นเกทออกไซด์เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวน	24
6.	การเปิดช่องออกไซด์ทำขั้วโลหะ	25
7.	การสร้างขั้วโลหะ	25
8.	การขึ้นเตอร์ริง	25
9.	การเก็บบรรจุ	25
3.3	สรุป	26
บทที่ 4	การศึกษาพารามิเตอร์ทางโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ (Large Geometry dependence)	29
4.1	วัตถุประสงค์	29
4.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	31
4.3	การทดลองและผลการทดลอง	31
4.3.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_D$ กับ $L$	31
4.3.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_D$ กับ $W$	33
4.3.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_D$ กับ $W/L$	36
4.3.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_T$ กับ $L$	36
4.3.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_T$ กับ $W$	39
4.3.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_T$ กับ $W/L$	40
4.4	สรุป	40

บทที่ 5	ความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้โดยใช้แรงดันควบคุม [Voltage Control Resistance (VCR)]	43
5.1	วัตถุประสงค์	43
5.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	46
5.3	การทดลอง และผลการทดลอง	46
5.4	สรุปผลการทดลอง	59
บทที่ 6	การสร้างวงจรรวมพื้นฐาน (Basic Integrated Circuit)	67
6.1	วัตถุประสงค์	67
6.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	73
6.3	การทดลอง และผลการทดลอง	73
6.3.1	การวัดผลการทดลองการส่งผ่านสัญญาณของมอสันเวอรเตอร์ แบบต่าง ๆ	73
6.3.1.1	มอสันเวอรเตอร์แบบ PELS	73
6.3.1.2	มอสันเวอรเตอร์แบบ PELT	73
6.3.1.3	มอสันเวอรเตอร์แบบ PELR	73
6.3.1.4	การเปรียบเทียบกันระหว่างมอสันเวอรเตอร์ แบบ PELS/PELT/PELR	74
6.3.2	การวัดผลการทดลองการตอบสนองทรานเซียนท์ (Transient response)	74
6.3.2.1	มอสันเวอรเตอร์แบบ PELS	78
6.3.2.2	การเปรียบเทียบผลการทดลองตอบสนองทรานเซียนท์ ระหว่างมอสันเวอรเตอร์แบบ PELS/PELT/PELR	78
6.4	สรุปผลการทดลอง	79
บทที่ 7	ผลของขนาดความยาวแชนแนล (Channel length effect)	80
7.1	วัตถุประสงค์	80

7.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	85
7.3	การทดลองและผลการทดลอง	88
7.3.1	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_D$ ) กับความยาวแขนแนล (L)	88
7.3.2	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_{PT}$ ) กับความยาวแขนแนล (L)	91
7.3.3	การวัดค่าความยาวแขนแนลจริง (L-effective : $L_{eff}$ )	93
7.4	สรุปผลการทดลอง	93
บทที่ 8	ผลของขนาดความกว้างแขนแนล (Channel width effect)	96
8.1	วัตถุประสงค์	96
8.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	98
8.3	การทดลองและผลการทดลอง	101
8.3.1	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_D$ ) กับความยาวแขนแนล (w)	101
8.3.2	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_{PT}$ ) กับความกว้างแขนแนล (w)	101
8.4	สรุปผลการทดลอง	104
บทที่ 9	ผลของระยะห่าง MOSFET 2 ตัวใกล้กัน (Space leakage)	107
9.1	วัตถุประสงค์	107
9.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	109
9.3	การทดลองและผลการทดลอง	109
9.3.1	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับความยาวของระยะห่าง (L)	109

9.3.2	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับความแตกต่างของแรงดันระหว่างทีโวล์ 2 ตัว ( $V_{DS}$ )	111
9.4	สรุปผลการทดลอง	113
บทที่ 10	กระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส (Subthreshold current)	119
10.1	วัตถุประสงค์	119
10.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	122
10.3	การทดลองและผลการทดลอง	123
10.3.2	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) กับความยาวแชนแนล ( $L$ )	123
10.3.2	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันที่เกต ( $V_G$ )	125
10.3.3	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับแรงดัน ( $V_{DS}$ )	130
10.4	สรุปผลการทดลอง	130
บทที่ 11	ปรากฏการณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แฝงใน PMOS (Parasitic MOS transistor phenomena in PMOS)	133
11.1	วัตถุประสงค์	133
11.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	135
11.3	การทดลองและผลการทดลอง	135
11.3.1	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_D$ ) กับความยาวแชนแนล ( $L$ )	135
11.3.2	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความยาวแชนแนล ( $L$ )	143
11.4	สรุปผลการทดลอง	143

บทที่ 12	แรงดันสูงสุดที่ทนได้ (Sustain voltage)	146
12.1	วัตถุประสงค์	146
12.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	148
12.3	การทดลองและผลการทดลอง	148
12.3.1	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพังทะลาย ( $V_B$ ) กับความยาวแขนแนล (L)	148
12.3.2	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพังทะลาย ( $V_B$ ) กับแรงดันเกต ( $V_G$ )	148
12.4	สรุปผลการทดลอง	151
บทที่ 13	ผลของแบ็คเกตไบอัส (Back gate bias effect)	155
13.1	วัตถุประสงค์	155
13.2	ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง	158
13.3	การทดลองและผลการทดลอง	158
13.3.1	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความยาวแขนแนล (L) เมื่อได้รับผลจากแรงดันไบอัส ย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )	158
13.3.2	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความกว้างแขนแนล (W) เมื่อได้รับผลจากแรงดันไบอัส ย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )	161
13.3.3	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )	161
13.3.4	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับระยะห่างระหว่างมอส 2 ตัว (L) เมื่อได้รับผลจาก แรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )	163

13.3.5	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับ ความแตกต่างของแรงดันระหว่างทีไวซ์ 2 ตัว ( $V_{DS}$ ) เมื่อได้รับผลจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )	168
13.3.6	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลจนถึง จุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันเคอร์เรนชอส ( $V_{DS}$ ) เมื่อได้รับผลจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )	173
13.4	สรุปผลการทดลอง	175
บทที่ 14	สรุปผลข้อมูลที่ได้อจากการทดลอง	176
กิตติกรรมประกาศ		180
เอกสารอ้างอิง		181
Appendix A	SI letter Symbols Derived from pioneers	185
Appendix B	Multiplier-Prefix-Abbreviation table	186
Appendix C	Conversion table	187
Appendix D	Physical Constants	189
Appendix E	Physical Constants	191
Appendix F	List of Symbols	192
Appendix G	Controlling of Threshold voltage	196
Appendix H	PMOS IC design	205
Appendix I	NMOS IC design	227

## บทคัดย่อ

ในการศึกษาวิจัยการออกแบบคิไวซ์ประเภท PMOS เพื่อการพัฒนาไปสู่การสร้างวงจรรวม (IC) พบว่ามอดูลคิไวซ์ประเภทไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์หลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขนาดพหุเททเทกัน PMOS คิไวซ์ จะถูกสร้างใ้มีจำนวนมากกว่าไบโพลาร์ คิไวซ์ หากแต่การสร้าง PMOS ใหม่ขนาดเล็กลง ๆ นั้น มีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดความยาวและความกว้างของ แชนแนล ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MOSFET เปลี่ยนไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้อธิบายครอบคลุม เนื้อหาตั้งแต่ทฤษฎีการทำงานของ MOSFET ขั้นตอนการสร้างแบบแพร่ด้วยความร้อน (Thermal diffusion process) ที่เหมาะสมของห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. การลดขนาดของคิไวซ์(Scaling) โดยทำการศึกษาผลของความยาว แชนแนลที่สั้นมาก ๆ ความกว้าง แชนแนลที่แคบ ๆ ตลอดจนผลเสียจากปรากฏการณ์อื่น ๆ และได้ทำการวิเคราะห์หาวิธีป้องกันโดยการสร้างการครึงล้อมรอบคิไวซ์ การให้ไบอัสย้อนกลับ (back gate bias) เพื่อที่จะหาขนาดของคิไวซ์ที่เล็กที่สุด เพื่อสร้างเป็นวงจรรวมบนชิพเดียวกันแบบ (Monolithic ICs) ให้สามารถทำงานได้ตามต้องการ พร้อมกันนี้ยังได้เสนอการออกแบบวงจรรวม พร้อมทั้งขอมูลการทดลองที่ใช้ขนาดของ P-ch MOSFET ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีขนาดความยาว แชนแนล (L) 20  $\mu\text{m}$  ความกว้าง แชนแนล (W) 40  $\mu\text{m}$  และความหนาของชั้นแกทออกไซด์ ( $T_{\text{ox}}$ ) 700 $^{\circ}\text{A}$

## Abstract

Studying and researching in PMOS devices develop to go forward in Metal-oxide semiconductor integrated circuits (MOS ICs) which is widely used both digital and analog circuits. It has more advantageously than bipolar transistor by the function of density. But, as MOS devices are scaled down to near a micrometer dimensions, geometry effects resulting from this scaling can produce variation in devices performance.

In this Master thesis, basic theoretical fabrication techniques in thermal process at Electronics Research Center of KMITL and scaling down the dimensions of MOSFET are reported by studying about the short channel effect, narrow channel effect throughout another undesirable effect. Unless, the preventible method of this effect can be analyzed and considered by guard-ring protection and back gate bias. Finally, integrated circuit designing and data measurement of available smallest size of P-ch MOSFET can be fabricated on Monolithic ICs which have channel length  $20\ \mu\text{m}$ , channel width  $40\ \mu\text{m}$  and gate oxide thickness  $700\ \text{\AA}$  are showed together.

## คำนำ

การศึกษาและทดลองวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีของ MOS ที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเน้นหนักไปในทางคิไวซ์ ประเภท PMOS ซึ่งครอบคลุมถึงเนื้อหาต่าง ๆ ตั้งแต่ทฤษฎีพื้นฐานการทำงาน (บทที่ 1 ถึง บทที่ 2) ขั้นตอนการสร้างที่เหมาะสม (บทที่ 3) การออกแบบทดลองสร้างคิไวซ์ตัวเดียว ๆ (บทที่ 4 ถึงบทที่ 5) และจนกระทั่งเป็นวงจรรวมพื้นฐาน ดังเช่น อินเวอร์เตอร์ (บทที่ 6) โดยที่ขนาดของโครงสร้างมีขนาดใหญ่ สำหรับการพัฒนาเพื่อนำไปสู่วงจรรวมที่มีจำนวนคิไวซ์ที่หนาแน่นมาก บนขนาดพื้นที่  $0.1" \times 0.1"$  เช่นมีจำนวนคิไวซ์ ตั้งแต่ 2 - 12 ตัว (SSI) หรือ 12 - 100 ตัว (MSI) หรือมากกว่า 100 ตัว (LSI) [31] จนกระทั่งมีคิไวซ์เป็นแสนตัว (VLSI) ซึ่งจำเป็นต้องลดขนาดของ MOS ให้มีขนาดเล็กลงมาก ๆ แต่การลดขนาดก็มีขอบเขตจำกัดเพราะจะมีผลเสียเกิดขึ้นคั้งจะได้อกล่าวถึงในบทที่ 7 ถึงบทที่ 12 ซึ่งจะมีวิธีป้องกันหลายวิธีเช่นการใช้แรงดันไบอัสย้อนกลับ (back gate bias) บทที่ 13 เพื่อควบคุมแรงดันวิกฤตก็เป็นวิธีหนึ่ง สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม บทที่ 14 เพื่อที่จะได้สร้างวงจรรวมที่มีจำนวนคิไวซ์หนาแน่นมาก ๆ (ภาคผนวก) คั้งนั้นรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พอสรุปย่อ ๆ ได้คั้งนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงเทคโนโลยีทั่ว ๆ ไปของ MOS และเน้นถึงความสำคัญของวงจรรวม

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น  $I_D$ ,  $V_T$

ฯลฯ

บทที่ 3 จะเป็นขั้นตอนการสร้างที่เป็นขั้นตอนมาตรฐานในการที่จะดำเนินการสร้าง MOSFET และ MOS IC ในห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

บทที่ 4 จะเป็น P-ch MOSFET ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งได้ทำการศึกษาวเคราะห์หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ

บทที่ 5 เป็นการประยุกต์เอาคุณสมบัติของ MOSFET ไปทดลองสร้างเป็น VCR เพื่อที่จะนำไปใช้งาน

บทที่ 6 เป็นการออกแบบสร้างวงจรรวมพื้นฐาน อันได้แก่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีโครงสร้างขนาดใหญ่ และได้ทำการวิเคราะห์รูปแบบที่เหมาะสมด้วย

บทที่ 7 กล่าวถึงผลกระทบ เกี่ยวกับความยาวแชนแนล(L) เมื่อลดขนาดความยาวของ ดีไวซ์ลง

บทที่ 8 จะเป็นผลกระทบของความกว้างแชนแนล (W) ของดีไวซ์ที่มีขนาดเล็กลงมาก

บทที่ 9 เป็นผลกระทบของกระแสรั่วไหลหากดีไวซ์ข้างเคียง

บทที่ 10 เป็นการทดลองหาค่ากระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส

บทที่ 11 เป็นผลกระทบของมอสทรานซิสเตอร์เผ่งที่ไม่ต้องการ อันจะทำให้การทำงานของวงจรรวมผิดพลาดไปได้

บทที่ 12 ศึกษาถึงขนาดของแรงดันสูงสุดที่ทนได้และผลของสนามไฟฟ้าที่เกตที่มีต่อแรงดันสูงสุดที่ทนได้นั้น

บทที่ 13 เป็นการศึกษาวิธีป้องกันการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันวิกฤติ  $V_T$  โดยให้แรงดันไบอัสย้อนกลับระหว่างขอสกัฐานรอง

บทที่ 14 เป็นการสรุปรวบรวมข้อมูลทั้งหมดเพื่อนำมาวิเคราะห์หาขนาดความกว้าง ความยาวของแชนแนลและความหนาของชั้นเกตออกไซด์ ตลอดจนค่าสูงสุดต่ำสุดของผลกระทบต่าง ๆ ที่จะนำไปใช้ในการออกแบบสร้างวงจรรวม ให้สามารถทำงานได้ตามต้องการ โดยให้มีขนาดของดีไวซ์ที่เล็กที่สุด

ส่วนภาคผนวกจะได้แสดงหน่วยมตรฐานต่าง ๆ การแปลงค่าระหว่างหน่วยที่ไม่เหมือนกัน การเลือกชนิดของแผ่นผลึกซิลิกอนที่นำมาใช้เป็นฐานรองสร้าง MOSFET ใหม่แรงดันวิกฤติ ตามต้องการ โดยการเลือกค่าพิกัดความต้านทาน  $\rho$ , Orientation, Type ฯลฯ ที่เหมาะสมและแสดงการออกแบบสร้างวงจรรวมต่าง ๆ เช่น เกตต่าง ๆ วงจรรวมฟังก์ชันพิเศษ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปออกแบบสร้างวงจรรวมประเภทอื่น ๆ ตามต้องการต่อไป

บทที่ 1

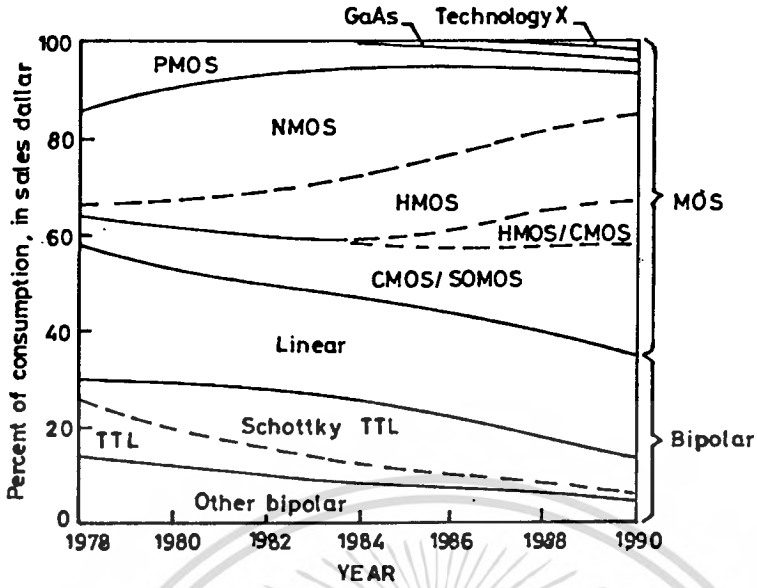
บทนำ (Introduction)

1.1 ความก้าวหน้าและการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภท MOSFET

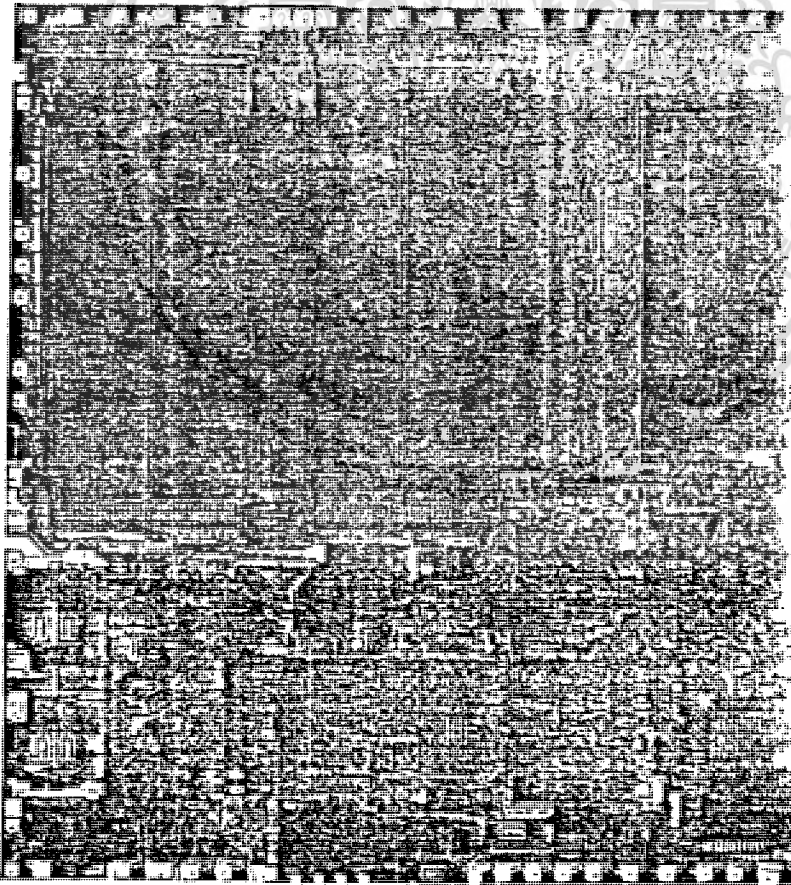
ในัจจุบันนี้การพัฒนาลิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นไปอย่างรวดเร็วมาก โดยเฉพาะประเภท Metal-Oxide Semiconductor (MOS) มีการนำไปใช้ในการสร้างเป็นวงจรรวม (IC) อย่างแพร่หลายเพราะมีข้อดีกว่า bipolar transistor หลายประการ ดูากรูปที่ 1.1 ซึ่งแสดงการแบ่งส่วนตลาดจะเห็นว่าในแบบ MOS มีส่วนแบ่งตลาดมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเป็นคี่วซ์ที่มีโครงสร้างแบบง่าย่าจึงสร้างให้มีจำนวนตัวคี่วซ์ได้มากถึงแสนตัว/ชิพ ในรูปที่ 1.2 เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ขนาด 32 bit ของ CMOS IC นอกจากวงจรรวมของคี่วซ์ประเภท MOS แล้ว คี่วซ์ประเภทตัวเดี่ยว ๆ (discret) ก็ยังเริ่มเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายอีกด้วย และมีแนวโน้มว่าจะเป็นที่นิยมกันมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพราะการปรับปรุงโครงสร้าง MOS ให้ทนกำลังสูง ๆ ได้ (Power Transistor) เช่นโครงสร้างแบบ VMOS, UMOS เป็นต้น และยังปรับปรุงให้มีการตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้น เช่นการนำไปสร้างเป็น RF mixer

1.2 โครงสร้างของ MOSFET

โครงสร้างของ MOSFET แสดงได้ในรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็น PMOS ประกอบด้วยส่วนฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (N-type) ความหนาของเกทออกไซด์ประมาณ  $250\text{Å} - 1000\text{Å}$  ส่วนที่เป็นโลหะเคลือบซ้อนทับบนเกทออกไซด์บางที่ซึ่งเรียกว่า IGFET (Insulated Gate Field Effect Transistor) แต่นิยมเรียกว่า MOSFET มากกว่า การแพร่สารเจือชนิด P ลงไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอสซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกันและสามารถทดแทนกันได้นั่นทำให้ได้ MOSFET ชนิด P-channel หรือเรียกว่า PMOS โดยที่ส่วนของทางเดินกระแสเกิดจากการให้แรงดันไบอัสลบที่เกท ซึ่งถ้าเป็นชนิด N-ch ก็จะไบอัสให้มิ้ขั้วไฟฟ้าตรงข้ามกับของ P-ch ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงแต่ชนิด P-ch ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าลบ แต่ไม่ได้ใส่เครื่องหมายแรงดันลบหรือกระแสลบไว้เพื่อสะดวกแก่การเขียนและอธิบายความหมายทั้งยัง สามารถนำไปใช้อธิบายได้กับแบบ N-ch อีกด้วย



รูปที่ 1.1 ส่วนแบ่งตลาดของ MOS คิวรี่



รูปที่ 1.2 ไมโครโปรเซสเซอร์ 32 บิต บนเนื้อที่  $320 \times 320 \text{ mils}^2$   
มี MOS ทรานซิสเตอร์ 110,000 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละไว้ในฐานที่เข้าใจ

การทำงานของ P-ch MOSFET ในรูปที่ 1.3 ขณะที่ไม่มีความแรงดันไบอัสที่เกต คือ ให้อยู่สภาวะ off ไม่นำกระแส แต่เมื่อให้แรงดัน  $V_G$  ที่เกต จะเกิดการเหนี่ยวนำโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในฐานรองชนิดเอ็น (N-type Substrate) เกิดเป็นแชนแนลขึ้น (หนา =  $50 \text{ \AA}$  ที่ผิว) เมื่อให้ไบอัสที่ขั้วเดรนเป็นลบ เทียบกับซอส กระแสโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากของซอสและเดรนสามารถไหลได้ (ผิดกับทรานซิสเตอร์กระแสที่ไหลระหว่างเบสกับคอลเล็กเตอร์เป็นพาหะส่วนน้อย จึงเกิดผลกระทบจากการเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) อัตราขยายของดีไวซ์ขึ้นกับความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าของแชนแนล เมื่อเปลี่ยนแรงดันไบอัสที่เกต โดยมีเกตออกไซด์ เป็นตัวป้องกันกระแส ดี.ซี. จากเกต

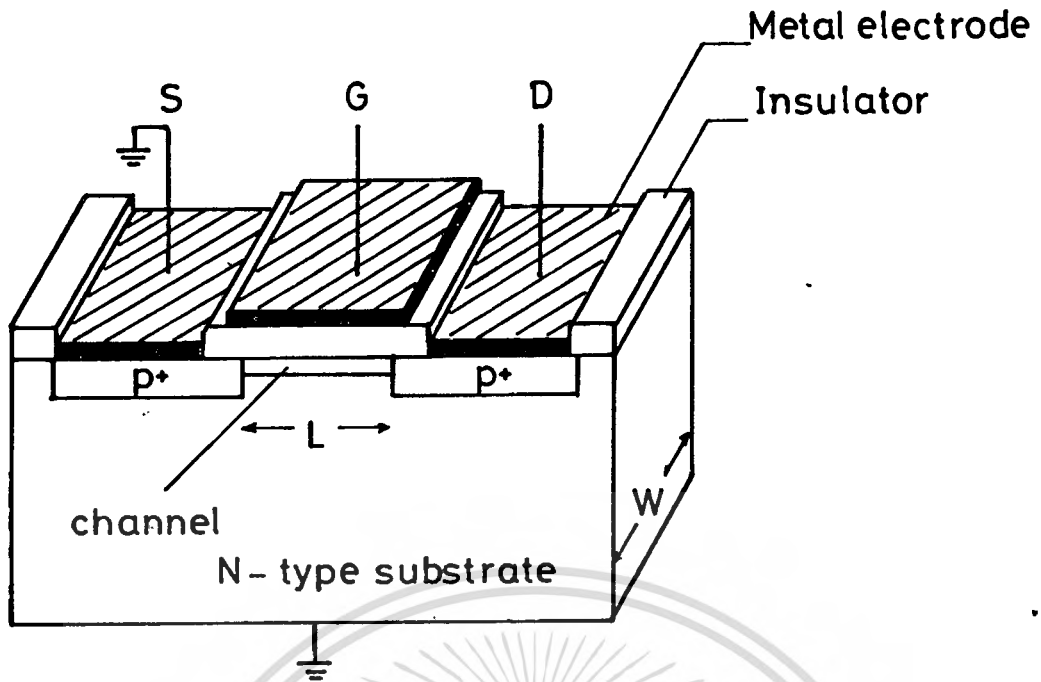
MOSFET แยกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการเกิดแชนแนลดังแสดงในรูป 1.4 (ก) ถ้าการเกิดแชนแนลถูกเหนี่ยวนำด้วยแรงดันลบที่เกตสำหรับ P-ch เราเรียกว่าแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (enhancement-mode) แต่ถ้าการเกิดแชนแนลเกิดจากสนามไฟฟ้าภายในที่ผิวสัมผัสของออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำ (จาก  $Q_{SS}$ ) หรือเกิดจากการแพร่สารเจือเข้าไปเป็นแชนแนล เราเรียกการเกิดแชนแนลแบบนี้ว่าแชนแนลดีเพลชัน-โหมด (depletion-mode) เราต้องให้แรงดันไบอัสที่เกตเป็นบวก เพื่อควบคุมการทำงานไม่ให้กระแสไหลได้

ทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 1.3 เป็นแบบ PMOS การทำงานของดีไวซ์ขึ้นกับการไหลของกระแสโฮล ถ้าเป็นแบบ NMOS การทำงานของดีไวซ์จะขึ้นกับการไหลของกระแสอิเล็กตรอน ซึ่งทั้งแบบเอ็นฮานซ์เมนต์-โหมด และ ดีเพลชัน-โหมด แสดงการทำงานได้ในรูปที่ 1.4 (ข) ซึ่งมักจะต่อขั้วซอสกับฐานรองเข้าด้วยกัน แต่ไม่จำเป็นเสมอไป ส่วนที่เหลือเป็นขั้วเกตและเดรน ถ้านำเอา NMOS กับ PMOS สร้างรวมกันบนฐานรองเดียวกัน เราเรียกว่า CMOS (complimentary MOS) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ค)

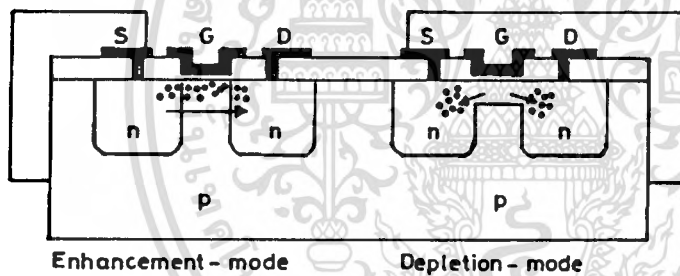
สัญลักษณ์ของ PMOS, NMOS และ CMOS แสดงได้ในรูปที่ 1.5 โดยเฉพาะรูปที่ 1.5 (ก) จะเป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

### 1.3 ข้อดีของ MOSFET เมื่อเปรียบเทียบกับ Bipolar Transistor

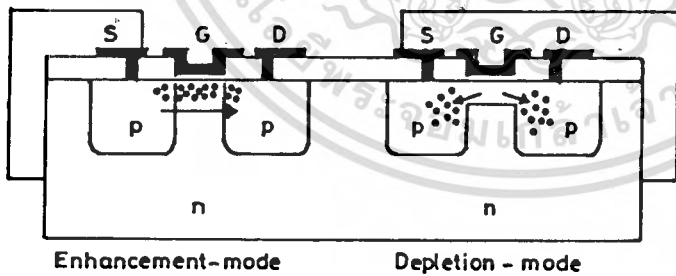
#### 1.3.1 ความสมมาตร (Bilaterally Symmetric) หมายความว่าทั้งทางด้านซอสและเดรน



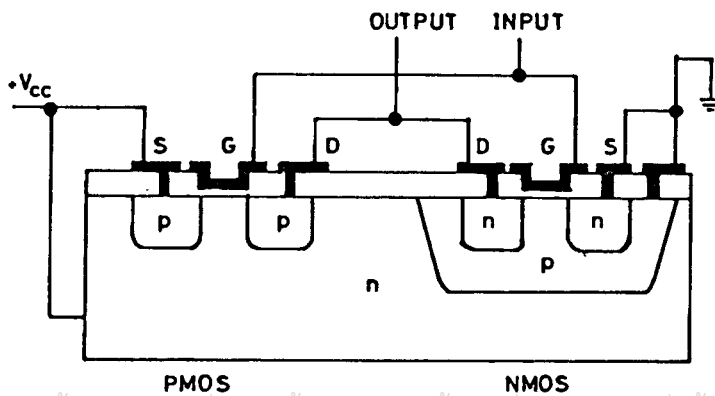
รูปที่ 1.3 โครงสร้างของ PMOS



1.4 (ก) NMOS

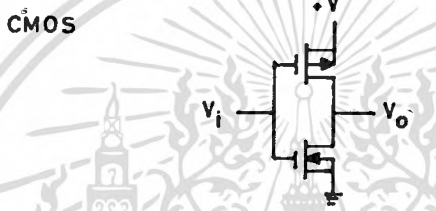
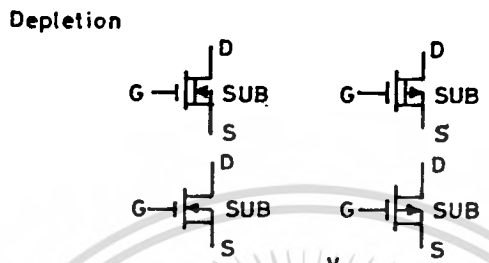
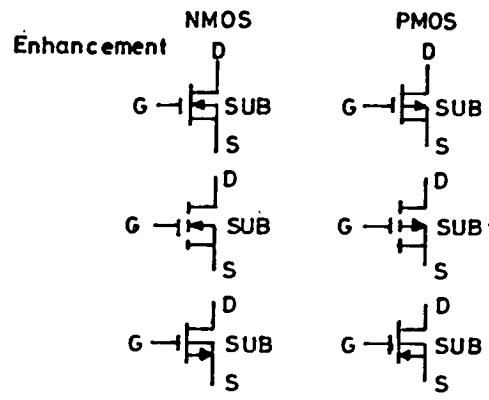


1.4 (ข) PMOS

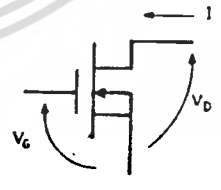
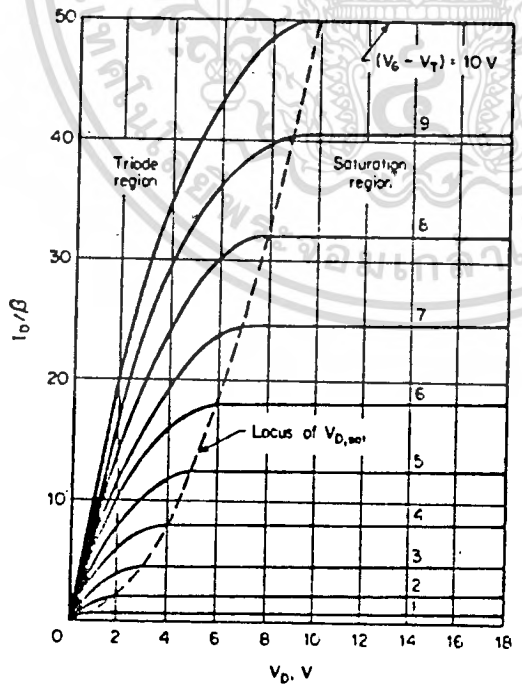


1.4 (ค) CMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. รับผิดชอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 1.4 มอสส์ทรานซิสเตอร์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 1.5 สัญลักษณ์ลักษณะแบบต่าง ๆ ของ NMOS, PMOS และ CMOS



รูปที่ 1.6 กราฟคุณสมบัติการทำงานของ MOSFET ระหว่าง  $I_D$  กับ  $V_{DS}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีคุณสมบัติเหมือนกันสามารถแทนกันได้ผลิตกับ bipolar transistor ถ้าสลับกันระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์แล้วอัตราขยายจะลดลงอย่างมาก ดังนั้นในทรานซิสเตอร์จึงไม่มีคุณสมบัติของความสมมาตร

1.3.2 เป็นขั้วเดียว (Unipolar) กระแสเดรนที่ไหลใน MOSFET เป็นกระแสของพาหะตัวเดี่ยวนั้นคือเป็นโฮลสำหรับ PMOS หรือเป็นอิเล็กตรอนสำหรับ NMOS แต่ในทรานซิสเตอร์มีทั้งกระแสโฮล และกระแสอิเล็กตรอนไหลพร้อมกัน

1.3.3 ความต้านทานอินพุตมีค่าสูง (High-Input Impedance) เพราะว่าทางคานอินพุตมี  $SiO_2$  เป็นฉนวนกันกระแส ดี.ซี ความต้านทานจึงมีค่าสูงมาก  $> 10^4 \Omega$  ซึ่งในทรานซิสเตอร์กระแสอินพุตที่เบสเข้ามาารวมกันกับกระแสที่ไหลในวงจรด้วย จึงมีความต้านทานอินพุตต่ำ

1.3.4 ไซแรงคันทควบคุมการทำงาน (Voltage - Controlled) MOSFET อาศัยแรงดันไบอัสที่เกต ควบคุมการทำงาน โดยที่อินพุตมีความต้านทานสูงมาก ดังนั้น MOSFET จึงมีอัตราสูญเสียกำลังอินพุตต่ำมาก จึงสามารถขับ MOSFET ตัวอื่น ๆ ให้ทำงานได้จำนวนมาก (high fan-out) เมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์ ซึ่งใช้กระแสที่เบสควบคุมวงจการทำงาน (current-controlled)

1.3.5 มีการป้องกันในตัวเอง (Self-Isolation) เนื่องจาก MOSFET มี Self-Isolation จึงนำเอา MOSFET ไปสร้างเป็น MOS ICs ได้จำนวนมาก การมีชั้นแยกของตัวเอง เนื่องจากที่ซอสและเดรนเป็นไดโอด 2 ตัว ต่อกันหลังชนกัน ซึ่งในทรานซิสเตอร์ จำเป็นต้องมีชั้นแยกที่เล็กและกว้าง สำหรับเป็นชั้นป้องกันอีกส่วนหนึ่ง

#### 1.4 คุณสมบัติการทำงานของ MOSFET

ตัววงจรดังในรูป 1.6 แล้วพล็อตกราฟระหว่าง  $I_D$  กับ  $V_D$  เมื่อให้แรงดันไบอัสที่เกต  $= V_T$  ที่เดรนมีศักดาเป็นลบน้อย ๆ  $V_D < V_G - V_T$  กระแสเดรนไหลเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น บริเวณนี้เรียกว่า Triode region

ถ้าให้  $V_D \geq V_G - V_T$  แล้วกระแสเดรนจะเริ่มคงที่ บริเวณนี้เป็เบริเวณอิมิตัว

(Saturation region) แต่ทำให้แรงดันที่เกทสูง ๆ นั่นคือ  $V_G$  มีค่าสูงแล้วจะทำให้ กระแส เทรนอิมิตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เทรนกับแรงดันเทรนได้ดังนี้

ในช่วง Triode region

$$I_D = \beta \left[ (V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2} \right] \dots (1.1)$$

$$\beta = \text{ค่าคงที่}$$

ในช่วง Saturation region

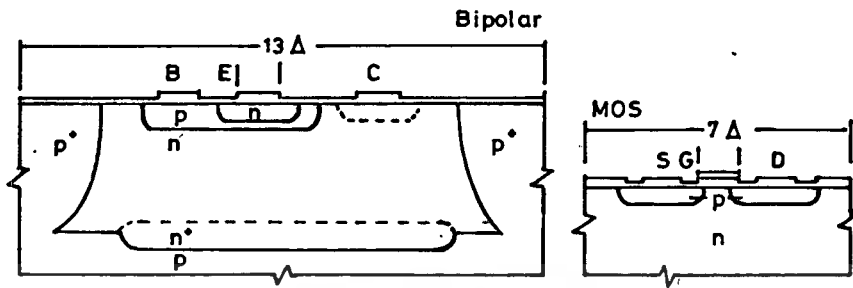
$$I_D = \frac{1}{2} \beta (V_G - V_T)^2 \dots (1.2)$$

จุดที่กระแสเทรนเริ่มอิมิตัว (pinch-off voltage)

$$V_P = V_{D \text{ sat}} = V_G - V_T \dots (1.3)$$

### 1.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่าง MOSFET กับ Bipolar Transistor

ในรูปที่ 1.7 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของ MOSFET กับทรานซิสเตอร์ เมื่อพิจารณาถึงขนาดแล้ว ถ้า  $\Delta$  แสดงความยาวของแชนแนล ในรูปจะเห็นว่าทรานซิสเตอร์ ใช้พื้นที่มากกว่า เพราะมี 3 ส่วนที่แยกจากกันคือ เบส อิมิตเตอร์ และ คอลเลคเตอร์ ส่วน MOS มีเพียง 2 ส่วนคือ ส่วนเทรนกับซอส แต่นอกจากส่วนต่าง ๆ เหล่านี้แล้ว ส่วนที่กินพื้นที่มากที่สุดของทรานซิสเตอร์คือ ส่วนที่สร้างชั้นแยก ในรูปโครงสร้างชั้นแยก  $P^+$  ใหญ่ถึง 70% ของความหนาแผ่นผลึก แต่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมก้าวหน้าไปมาก ชั้นแยกของทรานซิสเตอร์อาจทำขึ้นจาก  $SiO_2$  และถูกสร้างเป็นวงจรรวมประเภท Integrated Injection Logic ( $I^2L$ ) ได้หนาแน่นพอ ๆ กับ MOS แต่เมื่อพิจารณาค่าต้นทุนการผลิตแล้วการสร้าง  $I^2L$  จำเป็นต้องสร้างชั้นเบสก่อนแล้วจึงสร้างชั้นอิมิตเตอร์ เชียล สำหรับอิมิตเตอร์ ซึ่งต้องใช้ขั้นตอนการสร้างพิเศษ ส่วนขั้นตอนการสร้าง MOS นั้นสามารถสร้างส่วนเทรนและซอสในเวลาเดียวกันจึงใช้ขั้นตอนการสร้างที่น้อยกว่า จึงประหยัดกว่าพวก



รูปที่ 1.7 เปรียบเทียบโครงสร้างระหว่าง ทรานซิสเตอร์ กับ MOS

ทรานซิสเตอร์ แต่ในขณะเดียวกันในงานบางประเภทที่ต้องการความเร็วสูง (high speed) หรือทนกำลังสูง ๆ (high power) ยังคงต้องใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

บทที่ 2

ทฤษฎีการทำงานของ MOSFET

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแครน ( $I_D$ ) กับพารามิเตอร์ต่างๆของมอสเฟต

คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแครน ( $I_D$ ) กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟตแบบพีแชนแนล เอ็นฮานซ์เม้นท์โหมด แสดงได้ตามสมการ. (2.1)

$$I_D = \mu_{PS} \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_o}{T_{ox}} \cdot \frac{W}{L} [(V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2}] \dots\dots(2.1)$$

โดยที่

$I_D$  = กระแสแครน (A)

$V_D$  = แรงดันไฟระหว่าง แครนซอส (V)

$V_G$  = แรงดันไฟฟ้าที่เกต (V)

$V_T$  = แรงดันวิกฤติ (V)

$W$  = ความกว้างของแชนแนล (cm)

$L$  = ความยาวของแชนแนล (cm)

$T_{ox}$  = ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ (cm)

$\mu_{PS}$  = ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวมีค่าประมาณ  $130 \text{ cm}^2/\text{v}\cdot\text{sec}$

$\epsilon_{ox}$  = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 4

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

ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ อธิบายพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือ

1. ในช่วงเชิงเส้น (linear) ซึ่งพิจารณาในกรณีที่  $V_D < V_G - V_T$  จะเห็นว่าที่  $V_D$  มีค่าน้อยมาก ๆ เทอม  $\frac{V_D^2}{2}$  สามารถตัดทิ้งได้ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแครน ( $I_D$ ) กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ จึงอยู่ในรูปของเส้นตรง (Straight line) ซึ่งแสดงได้ตามสมการที่ (2.2) โดยในช่วงเส้นตรง (Straight line);  $V_D \ll V_G - V_T$

$$I_D = \mu_{PS} \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \cdot \frac{W}{L} [(V_G - V_T)V_D] \dots(2.2)$$

ในกรณีที่ให้แรงดัน  $V_D$  คงที่ เราสามารถนำไปใช้เป็นที่ไว้วางใจ VCR (Voltage Control Resistance) ได้ตามความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรงดังกล่าว โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างกระแสและแรงดันหรือก็คือค่าความต้านทานนั่นเอง ดังแสดงในสมการ (2.3)

$$\frac{V_D}{I_D} = R = \frac{T_{ox}}{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o} \cdot \frac{L}{W(V_G - V_T)} \dots(2.3)$$

จะเห็นว่าในช่วงเชิงเส้นนี้กระแสจะขึ้นกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางเรขาคณิตอันได้แก่ความยาวแชนแนล (L) ความกว้างแชนแนล (W) และความหนาของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) หรือเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$I_D \propto \frac{W}{L \cdot T_{ox}} \dots(2.4)$$

2. ในช่วงอิ่มตัว (Saturate) (ซึ่งพิจารณาในกรณีที่  $V_D \geq V_G - V_T$ ) เมื่อให้แรงดัน  $V_D > V_G - V_T$  ค่ากระแส  $I_D$  จะเริ่มอิ่มตัว (Saturate) มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับแรงดัน  $V_D$  เกิดปรากฏการณ์พินช์ออฟของแชนแนลขึ้น (channel pinch off) ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในกรณีนี้ได้โดยการแทนค่า  $V_D = V_G - V_T$  ลงในสมการ (2.1) ซึ่งจะได้เป็นสมการ (2.5)

$$I_{DSS} = \mu_{PS} \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{os}} \cdot \frac{W}{L} \left[ \left( \frac{V_G - V_T}{2} \right)^2 \right] \dots(2.5)$$

โดยที่  $I_{DSS}$  = กระแสแอมป์อิ่มตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับโครงสร้างทางเรขาคณิตยังเป็นไปตามสมการที่ (2.4) เช่นเดิม

## 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ของมอสเฟต

แรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) คือแรงดันที่ให้อิเล็กตรอนที่เกตเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับ (inversion layer) พอดี โดยแรงดันที่ป้อนให้ที่เกตนี้จะเพียงพอที่จะเอาชนะค่าฟังก์ชันของงาน (work function) ต่าง ๆ ได้ คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟต แบบพีเอ็นแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดแสดงได้ในสมการที่ (2.6)

$$V_T = \phi_{MS} - \frac{Q_{ss}}{C_o} - \frac{Q_{ox}}{C_o} + \phi_s - \frac{Q_B}{C_o} + \Delta V_{DT} \quad \dots(2.6)$$

โดยเมื่อพิจารณาที่ Flat band condition ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะได้

$$\phi_{MS} = \phi_M - \phi_S \quad \dots(2.7)$$

เมื่อ

$$\phi_{MS} = \text{work function ระหว่างเกตโลหะกับชั้น Si} \quad (V)$$

$$\phi_M = \text{ความต่างศักย์ระหว่างขอบกลางของแถบความนำ SiO}_2 \text{ กับระดับพลังงานเฟอร์มิของเกตโลหะ} \quad (V)$$

$$= \phi_{mO} = 3.2 \text{ V}$$

$$\phi_S = \text{ความต่างศักย์ระหว่างขอบกลางของแถบความนำ SiO}_2 \text{ กับระดับพลังงานเฟอร์มิในชั้น Si} \quad (V)$$

$$\phi_S = \phi_{so} + \left( \frac{E_g}{2} + \phi_f \right) \quad \dots(2.8)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \phi_{so} &= \text{ความต่างศักย์ระหว่างขอบของแถบความนำ SiO}_2 \text{ กับ ขอบของแถบความนำ Si} \\ &= 3.25 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_g &= \text{ความกว้างของระดับพลังงานในแถบช่องห้ามของ Si} \\ &= 1.1 \text{ eV ที่อุณหภูมิ } 300^\circ\text{K} \end{aligned}$$

$$q = \text{ประจุของอิเล็กตรอน}$$

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

$$\phi_f = \frac{E_i - E_f}{q} \dots\dots(2.9)$$

$$= \frac{KT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} \cong -0.29 \text{ v} \dots\dots(2.10)$$

ในที่นี้

$\phi_f$  = ความต่างศักย์ระหว่างระดับพลังงานอินทรีนซิก ( $E_i$ ) (v) กับ ระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_f$ ) หรือ เรียกว่าศักย์การระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi potential)

$E_i$  = ระดับพลังงานอินทรีนซิก (eV)

$E_f$  = ระดับพลังงานเฟอร์มี (eV)

K = ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant)

$$= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$$

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารกึ่งตัวนำ

$n$  = ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (donor atom) ในซิลิกอน n - type substrate ( $N_D$ ) (Atom/cm<sup>3</sup>)

ค่า

$$N_D = \frac{1}{pq \mu_n} \dots(2.11)$$

$N_D$  = ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ในฐานของชนิด N (Atom/cm<sup>2</sup>)

$\mu_n$  = ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อซิลิกอน

$$= 1350 \text{ cm}^2/\text{v-sec}$$

$\rho$  = พิกัดความต้านทาน ( $\Omega \text{-cm}$ )

ส่วนค่าของ

$$n_i = 3.9 \times 10^{16} T^{3/2} \cdot e^{-1.21/2KT} \dots(2.12)$$

เมื่อ

$n_i$  = จำนวนอิเล็กตรอนในอินทรีนซิกซิลิกอน (/cm<sup>3</sup>)

$Q_{ss}$  = ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัสระหว่างซิลิกอนกับออกไซด์กับซิลิกอน (Interface charge)

$$= + 8.0 \times 10^{-8} \text{ coulomb/cm}^2$$

ค่าของ  $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{T_{ox}} \dots (2.13)$

เมื่อ  $C_{ox}$  = ความจุไฟฟ้าที่ส่วนเกตออกไซด์ (F/cm<sup>2</sup>)  
 $Q_{ox}$  = ประจุในซิลิกอนไดออกไซด์ (coulomb/cm<sup>2</sup>)  
 $\phi_s$  = ศักคาที่ผิว (Surface potential) คือศักคาที่เกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการบิดโค้งของแถบพลังงานคังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi_s = 2 \phi_f \approx -0.58 \text{ V} \quad (2.14)$$

ประจุในชั้นกัลล์ที่เพียงพอในการเกิดแขนแนและพิจารณาได้จาก

$$Q_B = \sqrt{2 \epsilon_s \epsilon_0 q N_D (|2\phi_f| + V_{BG})} \dots (2.15)$$

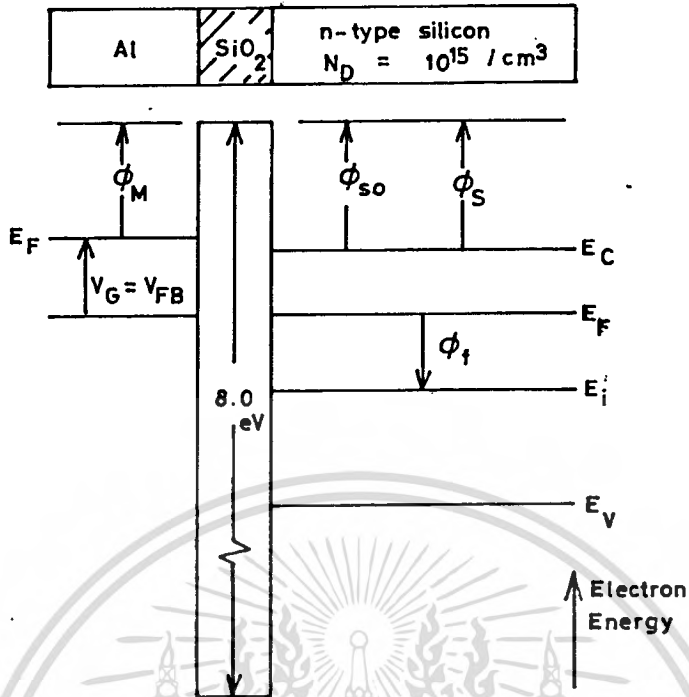
$Q_B$  = ความหนาแน่นประจุบริเวณพลาสมาทะที่ผิวขณะใดรับแรงคันถึงจุดที่ทำให้เกิดชั้นกัลล์พอดี (Coulomb/cm<sup>2</sup>)  
 $\epsilon_s$  = ค้างคังที่คังอิเล็กทริกของซิลิกอนมีค่าเท่ากับ 12  
 $V_{BG}$  = แรงคันไบอัสย้อนกัลล์ที่ขั้วสเตรท (back-gate bias) (V)  
 $\Delta V_{DT}$  = ค่าแรงคันวิกฤติที่เปลี่ยนไปเนื่องจกผลของการแพร่กระจายสารเจือในเนื้อซิลิกอนมีค่าประมาณ - 0.07 V

คังความสัมพันธ์ระหว่างแรงคันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับ โครงสร้างทางเรขาคณิตคังสมการที่ (2.14)

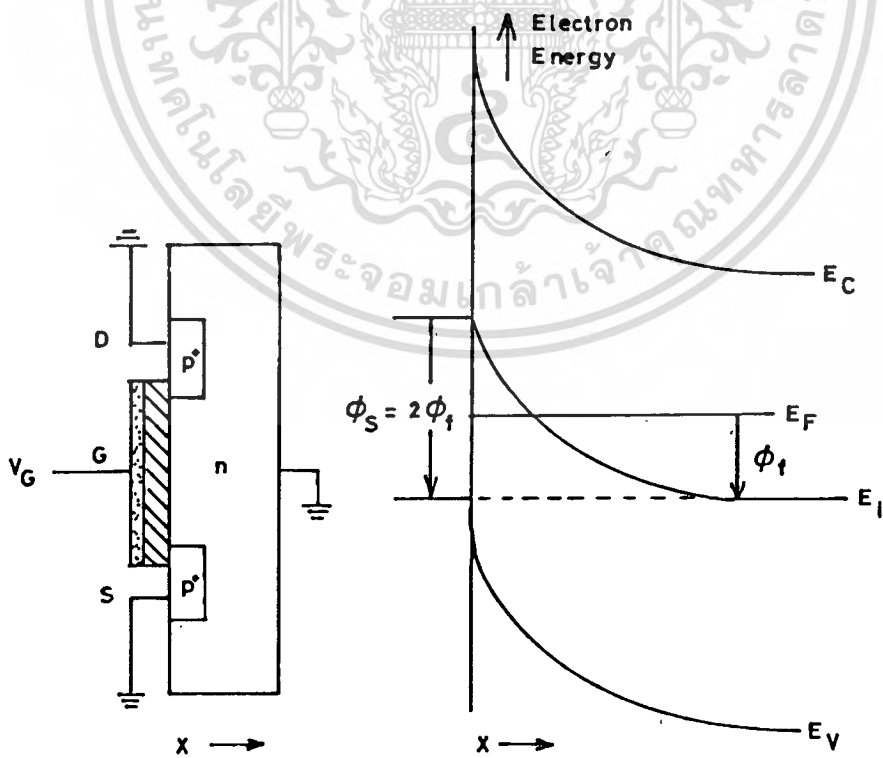
$$V_T \propto T_{ox} \dots (2.16)$$

### 2.3 วิธีการสำหรับวัดค่าแรงคันวิกฤติ

สำหรับวิธีการวัดค่าแรงคันวิกฤติ ( $V_T$ ) นั้น มีหลายวิธีคังกัน แต่ละวิธีจะให้ค่าความถูกต้องของ  $V_T$  แตกต่างกัน 100 - 200 mv [11] ความต้องการที่จะใช้วิธีการวัดแบบไหนนั้นขึ้นคัง



รูปที่ 2.1 Flat band condition



รูปที่ 2.2 แรงดันไบอัส  $-V_G$  ทำให้เกิดชั้นกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหมาะสม

1. 1-  $\mu\text{A}$  Method

วิธีนี้กำหนดว่าแรงดันของเกต ( $V_G$ ) ที่ทำให้กระแสเดรน ( $I_D$ ) ไหล  $1 \mu\text{A}$  เป็นค่าแรงดันวิกฤติที่ 2.3 การวัดวิธีนี้นิยมใช้มากเพราะสามารถวัดได้ง่าย โดยตรงจาก เคอร์ฟเทรเซอร์ (curve tracer) ซึ่งวัดระหว่าง  $I_D - V_G$  แต่วิธีนี้มีข้อเสียตรงที่ เมื่อขนาดของดีไวซ์ ( $W, L$ ) เปลี่ยนไป จุดที่ ดีไวซ์สามารถนำกระแสได้  $1 \mu\text{A}$  จะเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อย ดังนั้นวิธีนี้จะไม่นิยมใช้วัดในกรณีที่มีออสเฟทนำกระแสได้น้อย

2.  $\sqrt{I_{DSS}}$  กับ  $V_G$  Method

รากที่สองของค่ากระแสเดรน  $\sqrt{I_{DSS}}$  เป็นค่ากระแสเดรนอิมิตัว วัดค่า  $I_{DSS}$  ที่  $V_G$  ค่าต่าง ๆ กัน โดยการต่อเกตกับเดรนเข้าด้วยกัน ต่อวัดกับ curve tracer จะได้อุปกราฟตามรูปที่ 2.3 นำค่า  $\sqrt{I_{DSS}}$  มาพล็อตกับ  $V_G$  ตามรูปที่ 2.4 เส้นกราฟที่ตัดแกน  $V_G$  นั้นคือ ค่าแรงดัน  $V_T$  ซึ่งก็คือจุดที่แรงดัน  $V_G$  เพียงพอให้เกิดชั้นกลับพอดิ กระแส  $I_D$  จึงเริ่มไหลได้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (2.5)} \quad I_{DSS} &= \frac{\beta}{2} (V_G - V_T)^2 \\ \beta &= \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \cdot \frac{W}{L} \\ \sqrt{I_{DSS}} &= \sqrt{\frac{\beta}{2}} (V_G - V_T) \quad \dots(2.17) \end{aligned}$$

นั่นคือ ค่า  $I_D = 0$  ที่  $V_G = V_T$  แต่จริง ๆ แล้วดีไวซ์โดยทั่วไปจะมีค่ากระแสรั่วไหลอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เส้นกราฟโค้งกอนถึงจุด  $V_T$  จึงจำเป็นต้องลากเส้นตรงคดล จากความชัน เส้นกราฟลงมาตัดแกน  $V_G$  จึงได้จุด  $V_T$  ที่จุดคัตนั้น วิธีนี้จะได้อ่า  $V_T$  ที่ถูกต้องมากกว่า แม้ว่าจะเปลี่ยนขนาดของดีไวซ์ก็ตาม

3. 10 - 40 Method

วิธีนี้แปลงมาจากวิธีที่ 2 โดยทำการวัดแรงดันที่ป้อนเข้ามาที่เกตทำให้กระแสครนอิมตัวไหลเท่ากับ  $10 \mu A$  แรงดันเกตที่ก่าหนดให้เป็น  $V_{10}$  โดยให้แรงดัน  $V_D = 5 V$  ดังที่ตลอดตามรูปกราฟ 2.4 จากนั้นวัดแรงดันที่เกตที่ทำให้กระแสครนอิมตัวไหล  $40 \mu A$  แรงดันเกตที่ก่าหนดให้เป็น  $V_{40}$

แรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ก่าหนดได้ตามสมการที่ (2.18)

$$V_T = 2V_{10} - V_{40} \dots\dots(2.18)$$

ค่าแรงดันเกตที่เลือกนี้ไม่ว่าเป็นต้องเป็น  $V_{10}$  กับ  $V_{40}$  เสมอไป แต่ความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ค่านี้ต้องเป็น 4 เท่าเสมอ ดังนั้นถ้าเราเลือกค่าแรกเป็น  $10 \mu A$  ค่าที่ต้องเลือกอีกค่าหนึ่งจึงต้องเป็น  $40 \mu A$

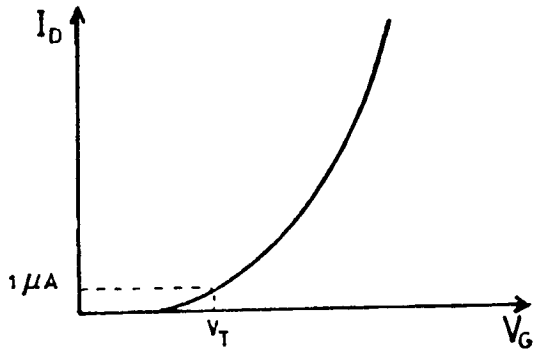
4. Alternative 10 - 40 Method

วิธีนี้เหมือนหัวข้อที่ 3 เพียงแต่วิธีการวัดแตกต่างกัน โดยตามวิธีนี้จะใช้วิธีวัดค่าแรงดันเกต  $V_{10}$  และ  $V_{40}$  ตามรูปที่ 2.5 ถ้ากระแสครน  $I_D$  ที่ไหล  $10 \mu A$  จะต้องป้อนแรงดันที่เกตเป็น  $V_{10}$  และกระแส  $I_D$  ที่  $40 \mu A$  จะต้องใช้แรงดันเกตเท่ากับ  $V_{40}$  ค่านี้เมื่อนำไปก่าหนดหาค่าแรงดันวิกฤติ  $V_T$  ตามสมการที่ (2.18) จะได้ออกค่าเท่ากับวิธีที่ 3 ถ้ากระแสครนช่วงอิมตัวก่าหนดเท่ากันไม่ว่าที่  $V_D$  จะเท่ากับ  $V_G$  หรือที่  $V_D > V_G$  นั่นคือกระแสครนช่วงอิมตัวมีสไลเป็น 0 แต่จริง ๆ แล้วค่า  $V_T$  ที่วัดด้วยวิธี 10 - 40 method กับวิธี Alternative 10- 40 method จะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากกระแสครนอิมตัวจะมีค่าสไลอยู่ค่าหนึ่ง ดังนั้นที่  $V_D$  ก่าต่าง ๆ จะให้ค่ากระแส  $I_D$  ไม่เท่ากัน

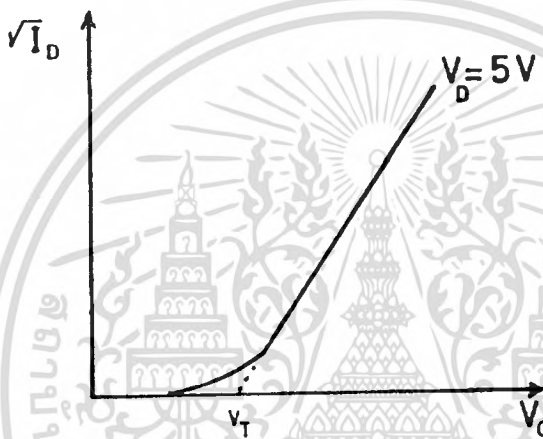
จากวิธีการทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมา เพื่อให้ข้อมูลที่ไ้จากการทดลองที่จะกล่าวไปมีมาตรฐานเดียวกัน และง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นในปริญยานพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธี  $1 \mu A$  method สำหรับการวัดค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ )

2.4 ขอส-ครน คอนคักแทนท์ ( $g_{sd}$ )

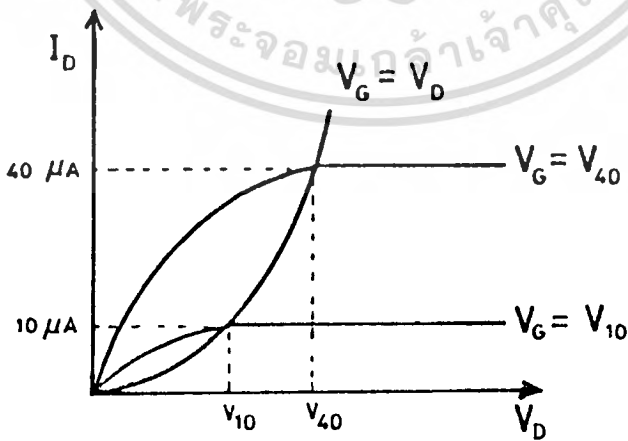
ขอสครน คอนคักแทนท์ คือ ค่าความนำไฟฟ้าของแซนแนล ค่านี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนประจุที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในชั้นกสล์ ดังนั้นในที่แซนแนลมอสเฟตถ้าไบอัสให้เกตเป็นลบมาก ๆ ค่าความนำไฟฟ้านี้ก็จะเพิ่มมากขึ้น แต่จะมีค่าก่างที่ที่แรงดันเกตค่าหนึ่ง ๆ ค่าความนำไฟฟ้า ( $g_{sd}$ ) นี้จะขึ้นกับ



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_D$  กับ  $V_G$



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{I_D}$  กับ  $V_G$  ที่  $V_D = 5V$  คงที่



รูปที่ 2.5 แรงดันเกท  $v_{10}$  และ  $v_{40}$  ที่กระแสเดรน  $10 \mu A$  และ  $40 \mu A$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟตแบบพีแชนแนล เอ็นชานซ์เมนต์โหมด กังสมการ (2.19)

$$g_{sd} = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_D} \right|_{V_G \text{ คงที่}} \quad \dots(2.19)$$

พิจารณา  $g_{sd}$  ในช่วงเชิงเส้น (Linear region)

จากสมการที่ (2.1)

$$I_D = \beta \left[ (V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2} \right]$$

$$\beta = \mu_{PS} \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \cdot \frac{W}{L} \quad \dots(2.20)$$

$$\therefore g_{sd} = \beta |V_G - V_T - V_D| \quad \dots(2.21)$$

ค่าความนำไฟฟ้า  $g_{sd}$  ในช่วงอิ่มตัว (Saturation region)

ผลการเพิ่มแรงดัน  $V_D$  ทำให้ความยาวแชนแนลจริง (L-effective) มีค่าลดลง ในบริเวณชั้นกลับที่ผิวซึ่งเกิดจากบริเวณที่เปลวชั้นที่ด้านแคบมีค่ามากขึ้น (เท่ากับ  $\Delta L$ ) ผลของ  $\Delta L$  นี้จะปรากฏเห็นชัดเมื่อความยาวของแชนแนลที่ออกแบบไว้สั้นมาก ๆ จนมีขนาดใกล้เคียงกับความกว้างของเปลวชั้น หรือพิจารณาสมการได้ดังนี้

$$g_{sd(sat)} = \frac{I_{D(sat)} K_S}{2L[1 - (\Delta L/L)^2 (V_D - V_{D(sat)})]^{\frac{1}{2}}} \quad \dots(2.22)$$

$$K_S = \left[ \frac{2 \epsilon_s}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots(2.23)$$

$$N = \frac{1}{pq \mu_n} \quad \dots(2.24)$$

$$V_{D(sat)} = V_G - V_T \quad \dots(2.25)$$

$\Delta L$  = ความกว้างของบริเวณที่เปลี่ยนทางคานาครน (cm)

### 2.5 ทรานคอนคักแตนท์ ( $g_m$ )

ทรานคอนคักแตนท์ ( $g_m$ ) คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์พุทต่อการเปลี่ยนแปลงแรงคักอินพุท ค่านี้จะเป้นตัว ออกอัตราขยายแรงคักได้โดยนำค่า  $g_m$  ไปคูณกับค วามต้านทานของโหลด ( $R_L$ )อัตราขยาย A =  $\frac{v_i}{v_o} = g_m R_L$  ซึ่งค วามสัมพันธ์ของ  $g_m$  แสดงได้ตามสมการ ที่ (2.26)

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_G} \right|_{V_D \text{ คงที่}} \dots (2.26)$$

เมื่อพิจารณาค่า  $g_m$  ในช่วงเชิงเส้น (Linear region)

จากสมการที่ (2.1)

$$I_D = \beta \left[ (V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2} \right]$$

เมื่อ

$$\beta = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \cdot \frac{W}{L}$$

$$g_m = \beta |V_D| \dots (2.27)$$

โดยคาค วามคล่องตัวของโฮล ( $\mu_{PS}$ ) มีคาคงที่ไม่ขึ้นกับ  $V_G$  และ  $Q_B$  คงที่

ค่า  $g_m$  ในช่วงอิ่มตัว (Saturation region) :  $g_{m(sat)}$

จากสมการที่ (2.5)

$$I_{DSS} = \frac{\beta}{2} [V_G - V_T]^2$$

$$\therefore g_{m(sat)} = \beta |V_G - V_T| \dots (2.28)$$

### 2.6 การตอบสนองความถี่ ( $f_o$ )

ค่าความถี่สูงสุดของมอสเฟส แสดงได้ตามสมการ

$$f_o = \frac{g_m}{2 \pi C_G} \dots\dots(2.29)$$

เมื่อ  $g_m$  = ค่าทรานคอนดักแตนซ์ของทีไวซ์ (mho)

$C_G$  = ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่เกต =  $C_o \cdot A$  (Farad)

อัตราส่วน  $g_m/C_G$  แสดงค่า Figure of merit (FM) ซึ่ง Speed ของมอสเฟสจะขึ้น

อยู่กับค่า FM นี้

จากสมการ (2.13) และ (2.27)

$$f_o = \frac{(\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o \cdot W/T_{ox} \cdot L) |V_G - V_T|}{(2\pi \epsilon_{ox} \epsilon_o / T_{ox}) W \cdot L} \dots(2.30)$$

$$f_o = \frac{\mu_{PS} |V_G - V_T|}{2 \pi L^2} \dots(2.31)$$

ค่า  $f_o$  นี้จะแสดงเฉพาะค่าความถี่สูงสุดที่มอสเฟสทำงานได้ แต่สำหรับในวงจรค่า  $f_o$  อาจมีค่าต่ำกว่านี้ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าต่าง ๆ ในวงจร

### 2.7 Subthreshold current ( $I_{sub}$ )

ในทางทฤษฎีขณะที่ให้ไบอัส  $V_G \leq V_T$  กระแสเดรน  $I_D$  ยังคงมีค่า = 0 และจะเพิ่มขึ้นที่  $V_G > V_T$  แต่จริง ๆ แล้วจะมีกระแสรั่วไหลอยู่ค่าหนึ่ง รูปที่ 2.6 เป็นกระแสที่เราไม่ต้องการ เพราะทำให้ตัวเก็บประจุออกไซด์ ( $C_o$ ) และตัวเก็บประจุที่ผิว ( $C_{fs}$ ) ถูกดิสชาร์จเป็นกำลังที่สูญเสียไป (dissipation power) ซึ่งเรียกระแส  $I_{sub}$  นี้ว่า Subthreshold current ( $I_{sub}$ ) มีค่าขึ้นกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามสมการที่ (2.32) [22]<sup>D</sup>

$$I_D = \frac{W}{L} \mu_{PS} C_o \cdot \frac{1}{m} (nB)^2 \exp \left[ \frac{1}{nB} (V_G - V_T - nB) \right] \cdot \left[ 1 - \exp \left( - \frac{m}{nB} \cdot V_D \right) \right] \dots (2.32)$$

$$\approx I_o \exp \left[ \frac{(V_G - V_T)}{nB} \right] ; V_G \leq V_T \dots (2.33)$$

เมื่อ  $I_o = \frac{W}{L} \mu_{PS} C_o \cdot \frac{1}{m} (nB)^2 \dots (2.34)$

$$B = \frac{KT}{q}$$

$$m = \frac{(C_o + C_s)}{C_o}$$

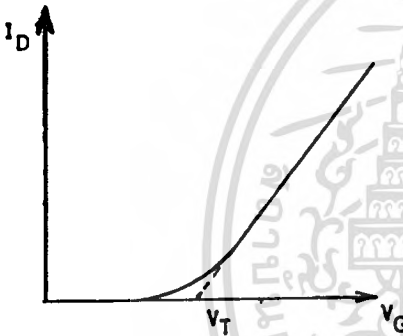
$$n = \frac{(C_o + C_s + C_{fs})}{C_o}$$

- $C_o$  = Oxide capacitance
- $C_s$  = Silicon capacitance
- $C_{fs}$  = Surface State capacitance

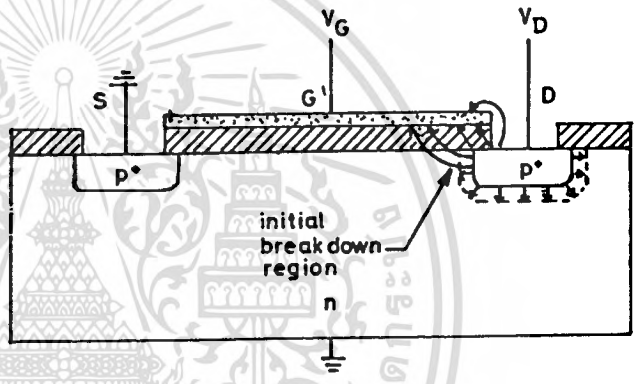
### 2.8 Avalanche breakdown

เมื่อมอสเฟตถูกไบอัสด้วย  $V_D$  จนกระทั่งเลขคูณกระแสอิ่มตัวแล้ว ที่  $V_D$  มีค่า ๆ หนึ่ง มอสเฟตจะนำกระแสมากขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งแรงดันที่จุดนี้เรียกว่าแรงดันพังทะลาย (Avalanche breakdown) ปรากฏการณ์ของการพังทะลายอธิบายได้ในรูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าจะไปปรากฏอยู่ที่

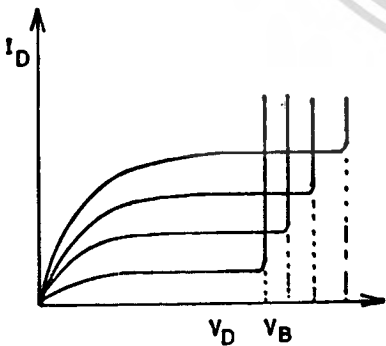
บริเวณที่เพลทชั้นคานเดรน เมื่อไม่มีแรงดันไบอัสให้เกตหรือเกตต่อกับกราวด์ ค่าแรงดันพังทะลายนี้จะมียกค่าต่ำสุด แต่เมื่อให้ไบอัสเกตเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันพังทะลายนี้จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าระหว่างเกตกับ คานเดรนลดลงที่  $V_D$  เท่าเดิม ผลของการพังทะลายแบบอะวาลานซ์ แสดงได้ในรูปที่ 2.8 ปรากฏการณ์ของการพังทะลายนี้มีอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการไหลของกระแส  $I_D$  ระหว่างคานเดรนกับซอสที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดก่อนการพังทะลายแบบอะวาลานซ์โดยจะเกิดขึ้นเมื่อคิเพลทชั้นคานเดรนกับซอสต่อกัน ทำให้อิเล็กตรอนหรือโฮลสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ การพังทะลายแบบนี้เรียกว่า พันซ์-ทรู (punch-through) คูในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความยาวแชนแนลของมอสเฟตสั้นมาก ๆ หรือค่าพิกัดความต้านทานของฐานรอง (Substrate) มีค่ามาก



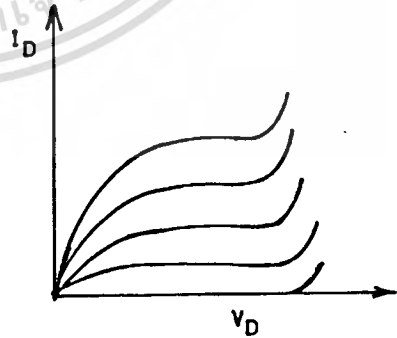
รูปที่ 2.6 กระแส  $I_D$  ที่ไหลก่อนถึง  $V_T$



รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าบริเวณคานเดรนขณะไบอัส MOSFET



รูปที่ 2.8 การเกิดแรงดันพังทะลายแบบอะวาลานซ์



รูปที่ 2.9 การเกิด พันซ์-ทรู ของ MOSFET

### บทที่ 3

## การสร้างมอสเฟตแบบพีแซนแนล เอ็นฮานซ์เม้นท์โหมค

### 3.1 วัตถุประสงค์

ในการสร้างมอสเฟตแบบพีแซนแนล เอ็นฮานซ์เม้นท์โหมค เมื่อกศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ วิธีการสร้างโคหลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน เช่น แบบ Ion Implantation ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่จะสามารถสร้างโคชิใหม่ขนาดเล็กโคมาก ๆ โดยที่คุณสมบัติของมอสเฟตยังคงเดิม แต่เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับอุปกรณ์การสร้ง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะโคกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบการแพร่ด้วยความร้อน (Thermal diffusion process) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมต่อการสร้างแบบง่าย ๆ และประหยัด สามารถสร้างพีแซนแนล เอ็นฮานซ์เม้นท์โหมค ใหม่คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถทำงานโคตามต้องการ ซึ่งขั้นตอนการสร้างคงต่อไป

### 3.2 ขั้นตอนการสร้าง

#### 1. การทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นผลึก

นำแผ่นผลึกไปต้มใน Trichloro ethylene ( $\text{ClCH}_2\text{CCl}_3$ ) รอนาน 5 นาที ซุปเปอร์โซนิค ใน Acetone ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) 2-3 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำ DI (Deionize water) ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) 10 นาที ล้างออกด้วยน้ำ DI ต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง ช่วงนี้จะเกิดออกไซด์เคลือบผิวบาง ๆ แล้วนำไปกัดออกด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% ประมาณ 10 วินาที

#### 2. การออกซิเดชัน (Oxidation) สร้างชั้น $\text{SiO}_2$

นำแผ่นผลึกที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว เข้า ตาออกซิเดชันอุณหภูมิ  $1100^\circ\text{C}$  ผ่านภาชนะออกซิเจนแบบแห้ง โดยมี อัตราการไหล 1000 ซีซี/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และแบบขึ้นเป็น เวลา 1/2 ชั่วโมง โคความหนาของชั้น  $\text{SiO}_2$  ประมาณ  $5000 \text{ \AA}$

#### 3. การเปิดช่องออกไซด์สำหรับการแพร่สารเจือปน

นำแผ่นผลึกที่ผ่านการออกซิเดชัน สร้างชั้น  $\text{SiO}_2$  แล้ว มาเปิดช่องออกไซด์ออก

ในส่วนที่ของการแพร่สารเจือโบรอน โดยใช้ขบวนการโฟโตลิโทกราฟี (photo lithography) ซึ่งใช้สารไวแสงชนิดลบ (Way Coat) เคลือบผิวหน้าแผ่นผลึกแล้วนำไปอบในตู้ ทัมอุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที นำไปฉายแสงผ่านแผ่นโฟโตมาสก์ เพื่อกำหนดบริเวณที่จะทำการเปิดช่องออกไซด์ออกแพร่สารเจือ (ซอสและแคโรน) โดยใช้เวลาในการฉายแสง (expose) ประมาณ 8 วินาที นำแผ่นผลึกไปตีเวลลอปใน Xylene [ $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)$ ] 2 นาที (2 แก้ว ๆ ละ 1 นาที)

ล้าง Xylene ออกด้วย Isophophil Alcohol [ $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ ] 1 นาที แล้วล้างน้ำ DI เป่าให้แห้ง นำแผ่นผลึกไปอบเพื่อป้องกันฟิล์มสลอกในตูอบ  $100^{\circ}\text{C}$  อีก 20 นาที นำแผ่นผลึกมาเคลือบด้านหลังเพื่อป้องกันการกัดออกไซด์ด้านหลัง ด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบ AZ-1350 J นำไปอบต่ออีก 10 นาที จากนั้นนำไปกัดออกไซด์ออกด้วยน้ำยา Buffer ( $\text{HF } 47\% : \text{NH}_4\text{F} = 1 : 6$ ) นำแผ่นผลึกที่กัดออกไซด์ในส่วนที่ของการออกหมดแล้ว ไปลอกฟิล์มสารไวแสงออกด้วยการต้มในกรดซัลฟูริก เข้มข้น ( $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ conc}$ )

#### 4. การแพร่สารเจือโบรอน

ในการแพร่สารเจือชนิดพี เมอส์สร้างส่วนซอสและแคโรน ใช้แผ่นโบรอนไนไตรด์ (BN M-Grade) เป็นแหล่งจ่ายสารเจือชนิดพี โดยก่อนทำการแพร่สารเจือต้องทำการ Activate ให้เป็น  $\text{B}_2\text{O}_3$  ก่อน โดยทำที่อุณหภูมิ  $970^{\circ}\text{C}$  ในก๊าซ  $\text{O}_2$  ทัมอัตราการไหล 1000 ซีซี/นาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจึงนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี โดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิ  $970^{\circ}\text{C}$  ในก๊าซ  $\text{N}_2$  ทัมอัตราการไหล 800 ซีซี/นาที เป็นเวลา 20 นาที

นำไปซัลก และสร้างชั้น  $\text{SiO}_2$  ใหม่ ทัมอุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  ในก๊าซ  $\text{O}_2$  ทัมอัตราการไหล 1000 ซีซี/นาที เป็นเวลา 30 นาที

#### 5. การสร้างชั้น กทออกไซด์ เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวน

ทำการเปิดช่องออกไซด์ออกอีกครั้งด้วยขบวนการ โฟโตลิโทกราฟี และกัดออกไซด์ออกด้วยน้ำยา Buffer (etching) เรียกย่อ ๆ ว่า โฟโต-เอชซิง (photo-etching) เช่นเดียวกับข้อ 3 ที่ตำแหน่งกทซึ่งอยู่ระหว่างซอสและแคโรน จากนั้นนำไปสร้างชั้นออกไซด์ชั้นใหม่ ทัมอุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  ในก๊าซ  $\text{O}_2$  แบบแห้งอัตราการไหล 1000 ซีซี/นาที จนได้ชั้นออกไซด์หนาตามต้องการ แล้วทำการ aneal ต่อ โดยใช้อุณหภูมิเท่าเดิม แต่เปลี่ยนก๊าซ  $\text{O}_2$  เป็น  $\text{N}_2$  ทัมอัตราการไหล

1000 ซีซี/นาที เป็นเวลา 10 นาที

#### 6. การเปิดช่องออกไอซ์ทำขั้วโลหะ

ทำการเปิดช่องออกไอซ์ ทบบริเวณส่วนขอสและแคโรน ด้วยขบวนการโฟโต-เอชซึ่ง เพื่อสร้างขั้วสัมผัสโลหะที่ ขอส และแคโรน พร้อมกับการออกไอซ์ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกออกควย เพื่อทำ ขั้วสัมผัสโลหะของ ซีบิ เตอร์ท

#### 7. การสร้างขั้วโลหะ

ทำการเคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกควยอลูมิเนียม ในเตาเคลือบแบบสูญญากาศ ที่ความ กดดัน (pressure) ประมาณ  $1 \times 10^{-6}$  Torr จากนั้นนำไปกัดลวดลายวงจรโดยใช้ขบวนการโฟโต -เอชซึ่ง เช่นเดียวกับข้อ 3 แต่เปลี่ยนน้ำยาไวแสงเป็นชนิดบวกคือ AZ - 1350 J เคลือบแทน และใช้ AZ developer เป็นน้ำยาสำหรับควยลอปนาน 2 นาที (2 แก้ว ๆ ละ 1 นาที) ล้างออก ด้วยน้ำ DI จากนั้นใช้กรด ซึ่งมีส่วนผสมของกรด ฟอสฟอริก: กรดไนตริก: กรดน้ำส้ม: น้ำ ( $H_3PO_4$  :  $HNO_3$  :  $CH_3COOH$  :  $H_2O$ ) เป็น 80:5:5:10:10 กัดอลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออกจะ โคขขอส, แคโรน และเกท

#### 8. การขึ้นเตอรริง

นำแผ่นผลึกที่ผ่านขบวนการเคลือบอลูมิเนียม และกัดลวดลายแล้วมาเข้าเตา สำหรับ ขึ้นเตอรริง (Sintering) เพื่อทำให้รอยสัมผัสโลหะของซิลิกอนกับอลูมิเนียมเป็น โอห์มิกคอนแทค (Ohmic contact) โดยใช้อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  ในก๊าซ  $N_2$  ที่อัตราการไหล 1000 ซีซี/นาที เป็น เวลา 10 นาที

#### 9. การเก็บบรรจุ

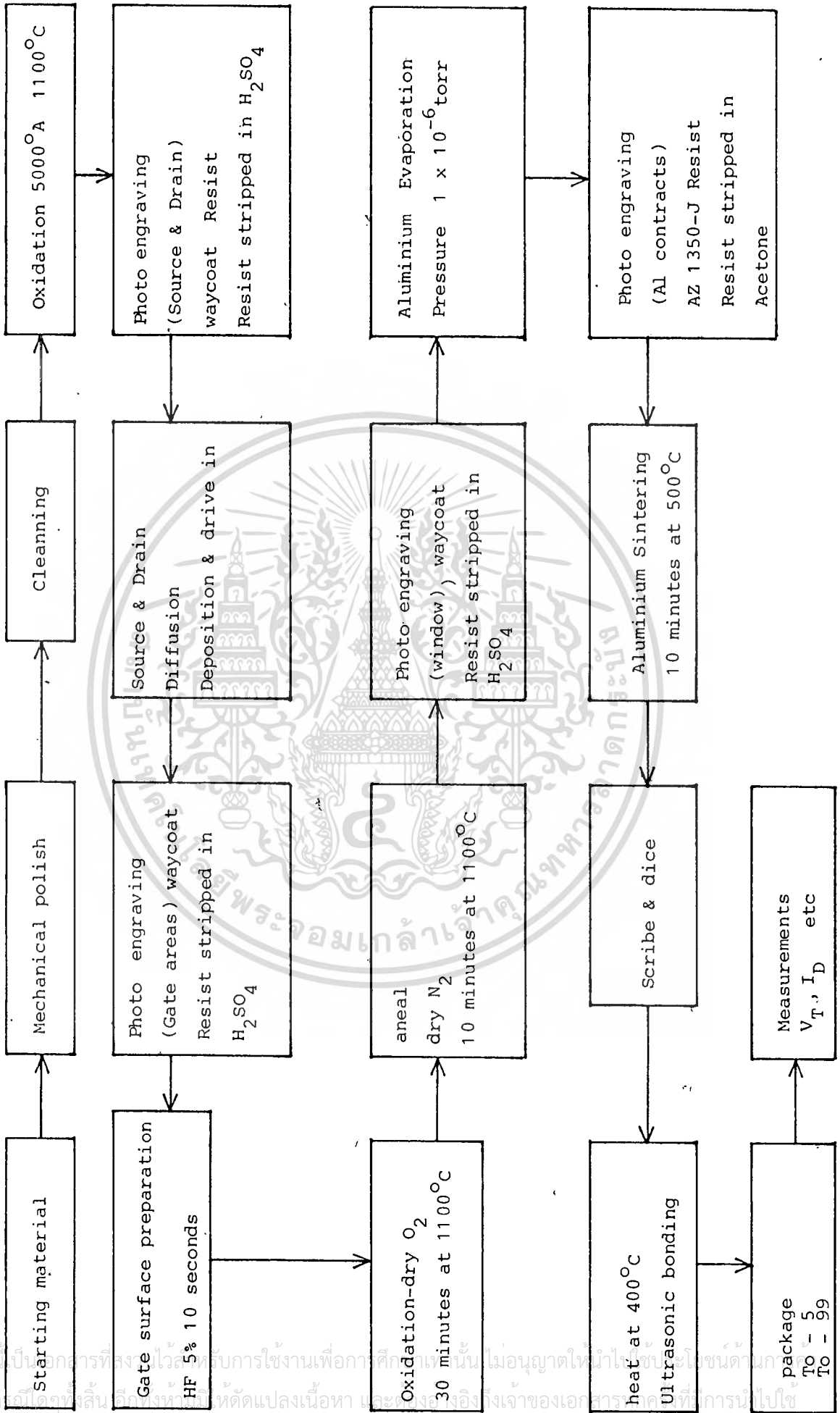
นำแผ่นผลึกมาตัดแยกซีฟออก นำไปติดบนตัวถังแบบกระป๋อง (can case) ใช้ความ รอนสำหรับติดซีฟกับตัวกระป๋องที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  นำซีฟที่ติดบนกระป๋องเรียบร้อยแล้ว มาทำการ bonding โดยใช้ลวดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $25 \mu m$  ทำการ bond โดยใช้ Ultrasonics bonding ปิดฝาเรียบร้อยนำไปวัดคุณสมบัติ

### 3.3 สรุป

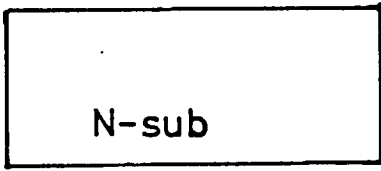
ตามขั้นตอนการร่างที่โกลาแลวจากข้อ 1-9 ในหัวข้อ 3.2 นำมาเขียนเป็น flow chart การทำงานได้ในรูปที่ 3.1 มีขั้นตอนการร่างตามรูปที่ 3.2 ซึ่งจะได้อธิบายถึงการเกิดขึ้นต่าง ๆ ของส่วนข้อส , เครนและเกท ไทเห็น เมื่อสร้างเสร็จจนถึงข้อ 9 ในหัวข้อ 3.2 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยการนำซีพมอส เฟทไปบรรจุลงบนตัวถังแบบกระป๋อง มีชื่อรหัสว่า TO-5 (3 ขา) TO-99 (8 ขา) โคมอส เฟทที่สมบูรณ์ นำไปทดสอบหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าไปตามต้องการ และสำหรับมอส เฟทที่สร้างขึ้น หลังจากบรรจุลงบนตัวถังเรียบร้อยแล้ว ควรมีลวดโลหะพันรอบขาทั้งหมดของมอส เฟท หรือเสียบลงบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) ก็ได เพื่อผลในการป้องกันประจุไฟฟ้าภายนอก เช่นประจุไฟฟ้าสถิตจากมือเรา เนื่องจากค่าความต้านทานอินพุทของมอส เฟทค่าสูงมาก (เป็น เมกกะโอห์ม) เมื่อมีกระแสไหลเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้เกิดแรงดันหลาย ๆ โวลต์ได้ และจะไปทำลายส่วนเกทของมอส เฟท ในวงจรรวมทั่ว ๆ ไป จึงมักจะมีส่วนป้องกัน โดยการต่อซีเนอร์ไดโอด เพื่อจำกัดค่าแรงดันอินพุทไม่ไหม้ค่าสูงเกินค่าที่ต้องการ



รูปที่ 3.1 FLOW CHART

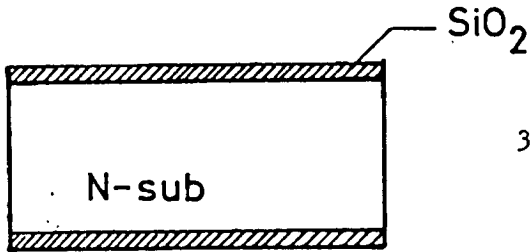


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในงานอื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และสิ่งอื่นใดของเอกสารนี้ กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทราบ



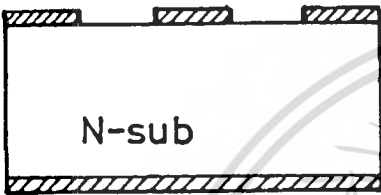
3.1 ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอน

$\langle 100 \rangle \rho = 10 \Omega\text{-cm. THK} = 410 \mu\text{m}$



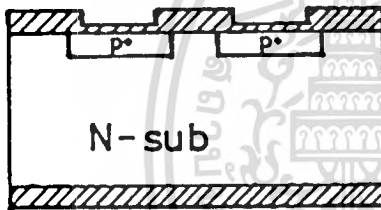
3.2 สร้างชั้นออกไซด์

อุณหภูมิ  $1100^\circ\text{C}$  dry Oxidation 1 hr.,  
wet Oxidation  $\frac{1}{2}$  hr.

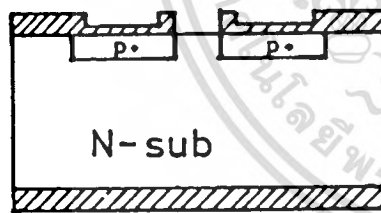


3.3 เปิดช่องออกไซด์ เตรียมแพร่สารเจือโบรอน

อุณหภูมิ  $970^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที



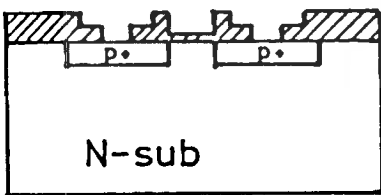
3.4 แพร่สารเจือโบรอนพร้อมกับสร้างชั้นออกไซด์ปิด



3.5 เปิดช่องออกไซด์ที่เกตเตรียมสร้าง

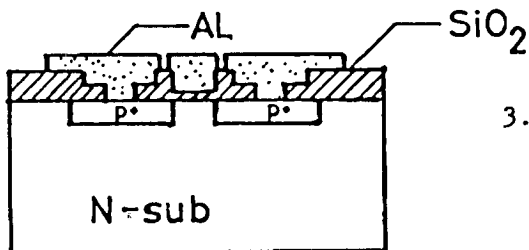
เกตออกไซด์ พร้อมกับกัดออกไซด์คานหลัง

อุณหภูมิ  $1100^\circ\text{C}$  dry Oxidation



3.6 สร้างเกตออกไซด์ และเปิดช่องออกไซด์

ออกทำขั้วสัมผัสโลหะ



3.7 เคลือบอลูมิเนียมทำขั้วสัมผัสโลหะ

บทที่ 4

การศึกษาพารามิเตอร์ทางโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ (Large Geometry dependence)

4.1 วัตถุประสงค์

มอสเฟตแบบพีเชนแนล เอ็นชานซ์เมนต์โหมด มีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยส่วนโลหะ, ออกไซด์ และ สารกึ่งตัวนำ แบ่งเป็นส่วนฐานรอง (substrate), ช่อง, เกรน และเกตคิงแสดงในรูปที่ 4.1 คุณสมบัติต่างๆของมอสเฟตนี้จะขึ้นกับพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต เช่น ความกว้างของเชนแนล ความยาวของเชนแนล และความหนาของเกตออกไซด์

เพื่อทำการศึกษาคูสมบัติความนำไฟฟ้านี้ จึงได้ออกแบบสร้างมอสเฟสแบบพีเชนแนล เอ็นชานซ์เมนต์โหมดนี้ขึ้น ให้มีพารามิเตอร์เกี่ยวกับ ความกว้างเชนแนล (w) และความหนาเกตออกไซด์ (T<sub>ox</sub>) หลาย ๆ ค่า แตกต่างกันไป พารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้จะมีผลต่อค่ากระแสเกรน (I<sub>D</sub>) และแรงคั้นวิกฤติ (V<sub>T</sub>)

จากสมการที่ (2.1) 
$$I_D = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \cdot \frac{W}{L} [ (V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} ]$$

และสมการที่ (2.5) 
$$I_{DSS} = \mu_{PS} \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \cdot \frac{W}{L} \left( \frac{V_G - V_T}{2} \right)^2$$

ได้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.4)

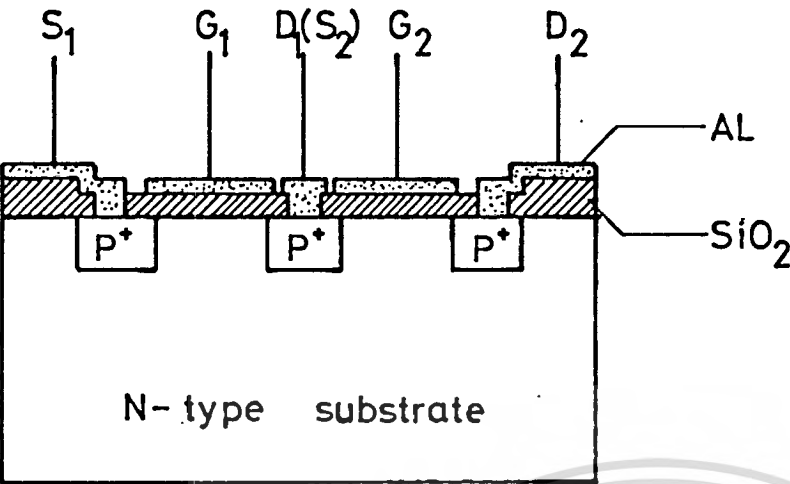
$$I_D \propto \frac{W}{L \cdot T_{ox}}$$

และสำหรับค่าแรงคั้นวิกฤติ (V<sub>T</sub>)

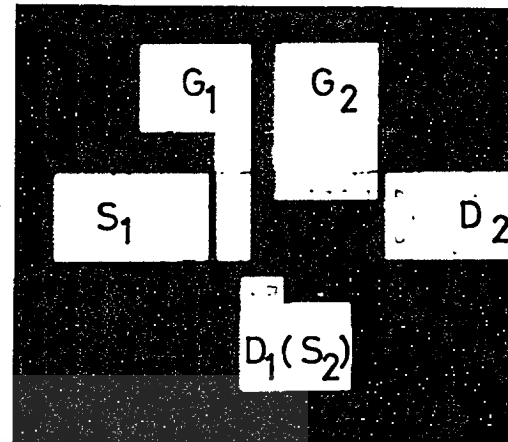
จากสมการที่ (2.4) 
$$V_T = \phi_{MS} - Q_{SS} \frac{-Q_{ox}}{C_o} + 2\phi_f - \frac{Q_B}{C_o} + \Delta V_{DT}$$

จากสมการที่ (2.14) ได้ 
$$V_T \propto T_{ox}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้าง



ภาพถ่ายคาบม

รูปที่ 4.1 pattern MOSFET P-ch Enhancement Mode

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง

L = 40 $\mu$ m      100 $\mu$ m      200 $\mu$ m

	A1	A5	A9
W = 100 $\mu$ m	W/L = 2.5	1	0.5
200 $\mu$ m	A2	A6	A10
	5	2	1
400 $\mu$ m	A3	A7	A11
	10	4	2
800 $\mu$ m	A4	A8	A12
	20	8	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งกระแสกระแสและแรงดันวิกฤติ ต่างก็ขึ้นกับ โครงสร้างทางเรขาคณิต ( $w, L, T_{ox}$ ) ในหัวข้อนี้จะได้ เปรียบเทียบผลที่ได้ จากการทดลองกับผลการคำนวณอีกด้วย

#### 4.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบมอสเฟตแบบพีแชนแนล เอ็นทรานซ์เมนต์ใหม่ เพื่อศึกษาผลของโครงสร้าง ทางเรขาคณิต ได้ออกแบบให้มีโครงสร้างคั่นแบบ ดังในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะประกอบด้วยมอสเฟต 2 ตัว โดยใช้เกรนของมอสเฟตตัวหนึ่งเป็นซอสของมอสเฟตอีกตัวหนึ่ง ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงได้ใน ตารางที่ 4.1

นำคั่นแบบไปเขียนบนแผ่นกราฟ แล้วทำการตัดแผ่น peel coat ตามแบบ ถายยอขนาด 50 เท่า ลงบนฟิล์มกระจก จะได้มาส์คคั่นแบบ สำหรับการสร้างมอสเฟต แล้วจึงนำคั่นแบบที่ได้นี้ไป สร้างตามขั้นตอนการสร้างในบทที่ 3 จนถึงหัวข้อที่ 3.6 ในรูปที่ 3.2 ได้ออกแบบสร้างใหม่มีความหนา ของชั้นเกตออกไซด์ แตกต่างกัน 2 ค่า คือที่ความหนา  $T_{ox}$   $700\text{\AA}$  และ  $1200\text{\AA}$

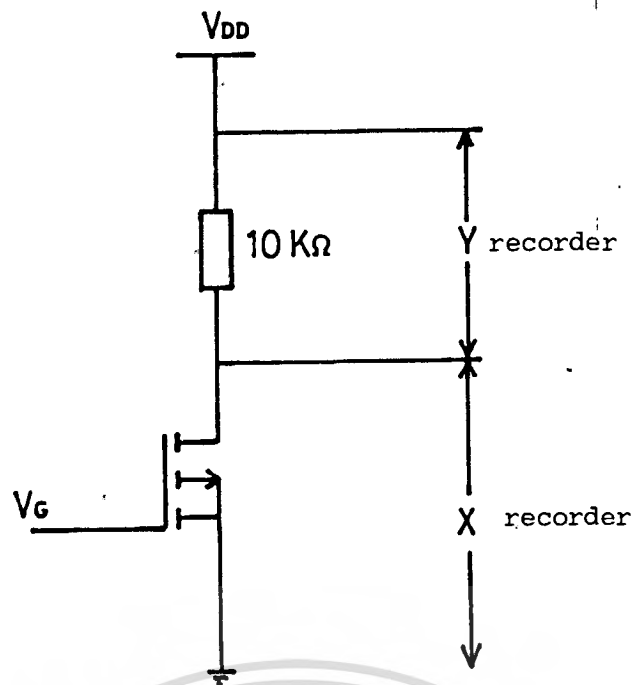
#### 4.3 การทดลองและผลการทดลอง

##### 4.3.1 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ( $I_D$ ) กับ ความยาวแชนแนล ( $L$ )

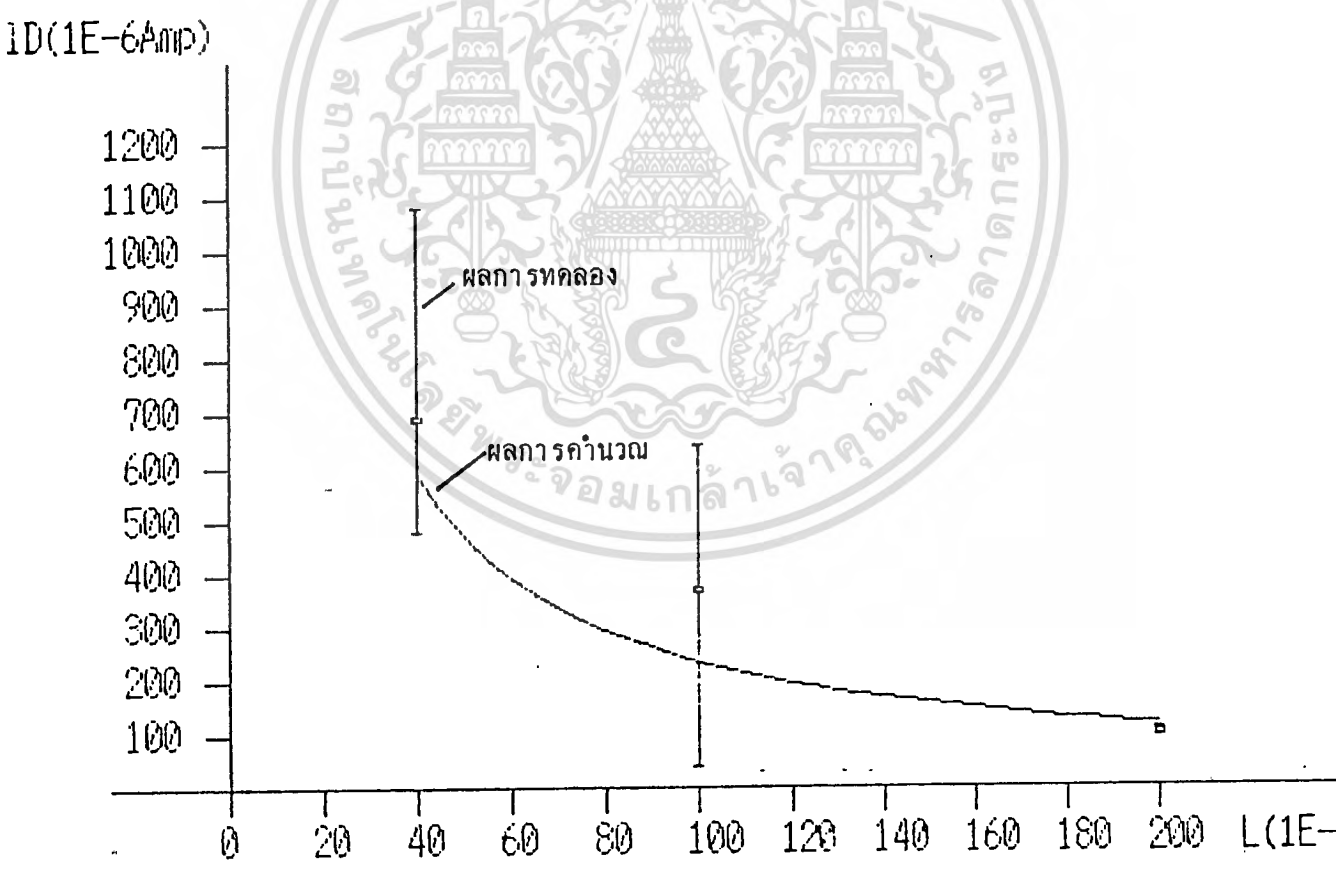
ได้อวจรทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 เอาท์พุทต่อกับ XY-recorder ให้แรงดันไบอัส ที่เกตอยู่ที่ 7V ใช้ดีไวซ์ที่มีความยาวแชนแนล ( $L$ )  $40\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$  และ  $200\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ ความกว้างแชนแนล ( $w$ )  $800\ \mu\text{m}$  และความหนาของเกตออกไซด์  $700\text{\AA}$  คงที่ วัดหาค่าความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสเกรนอิม  $I_D$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันซ้ำอีกแต่ เปลี่ยน ดีไวซ์ใหม่ใหม่มีความหนา เกตออกไซด์  $1200\text{\AA}$  นำข้อมูลที่ได้อไปพล็อตกราฟ

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับ ความยาวแชนแนล  $L$  ที่ค่าแรงดัน  $V_{DS}$  เท่ากัน และมีความหนาของเกตออกไซด์  $700\text{\AA}$  คงที่ ส่วนรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับ  $L$  ที่ความหนาเกตออกไซด์  $1200\text{\AA}$  คงที่ ข้อมูลที่แสดงในรูปกราฟทั้งสองมีขีดบนสุดของแต่ละข้อมูลเป็นค่าสูงสุด ส่วนขีดล่างเป็นค่าต่ำสุด



รูปที่ 4.2 วงจรทดลองวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเกรน ( $I_D$ )



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับความยาวแชนแนล ( $L$ ) ที่ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700\text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่วากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยมเป็นค่าเฉลี่ย เส้นที่ลากเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณกระแส  $I_{DSS}$  ที่ความยาวแชนแนล  $L$  ค่าต่าง ๆ กัน ซึ่งจะเห็นว่า ผลของการทดลองกับการคำนวณ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน ทั้งความหนาของเกตออกไซด์  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  แต่อย่างไรก็ตามค่าทั้งสองนั้นยังคงมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าผิดพลาดต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ เช่น ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ), ประจุที่ผิว ( $Q_{SS}$ ) ฯลฯ

จากรูปกราฟจะพบว่า กระแสเดรน  $I_D$  จะแปรผกผันกับ  $L$  และเมื่อเปรียบเทียบกราฟรูปที่ 4.3 กับรูปที่ 4.4 กระแสเดรน  $I_D$  จะแปรผกผันกับ  $T_{ox}$  ด้วย นั่นคือ

$$I_D \propto \frac{1}{L \cdot T_{ox}}$$

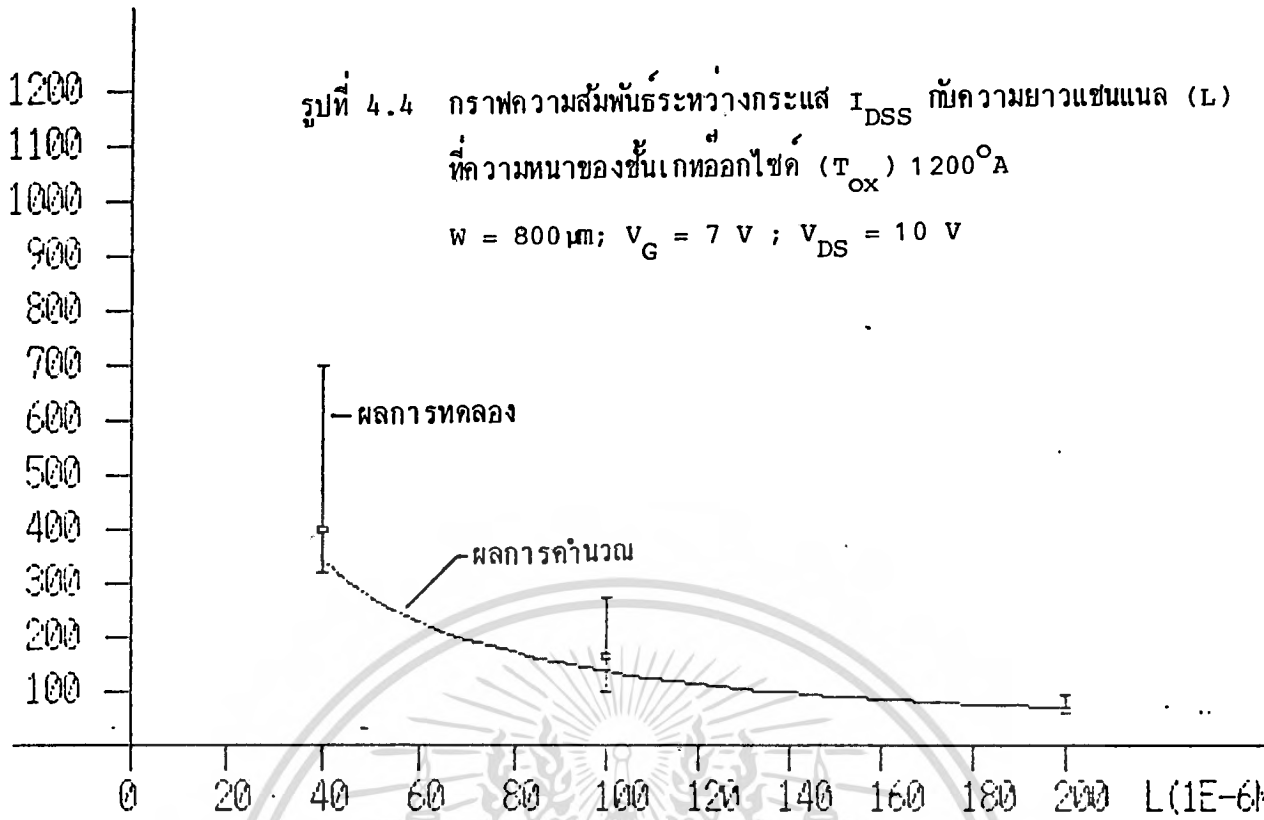
4.3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_D$ ) กับความกว้างแชนแนล ( $w$ )  
 ทดลองการทดลองตามรูปที่ 4.3 ให้แรงดันไบอัสเกต  $7 \text{ V}$  ใช้ซีไอซ์ที่มีความกว้างแชนแนล  $100 \mu\text{m}$ ,  $200 \mu\text{m}$ ,  $400 \mu\text{m}$  และ  $800 \mu\text{m}$  ตามลำดับ โดยมีความยาวแชนแนลเท่ากัน ( $L = 200 \mu\text{m}$ ) และความหนาของเกตออกไซด์มี 2 ค่า คือ  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  วัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน  $I_D$  กับ  $V_{DS}$  นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ

ผลการทดลอง

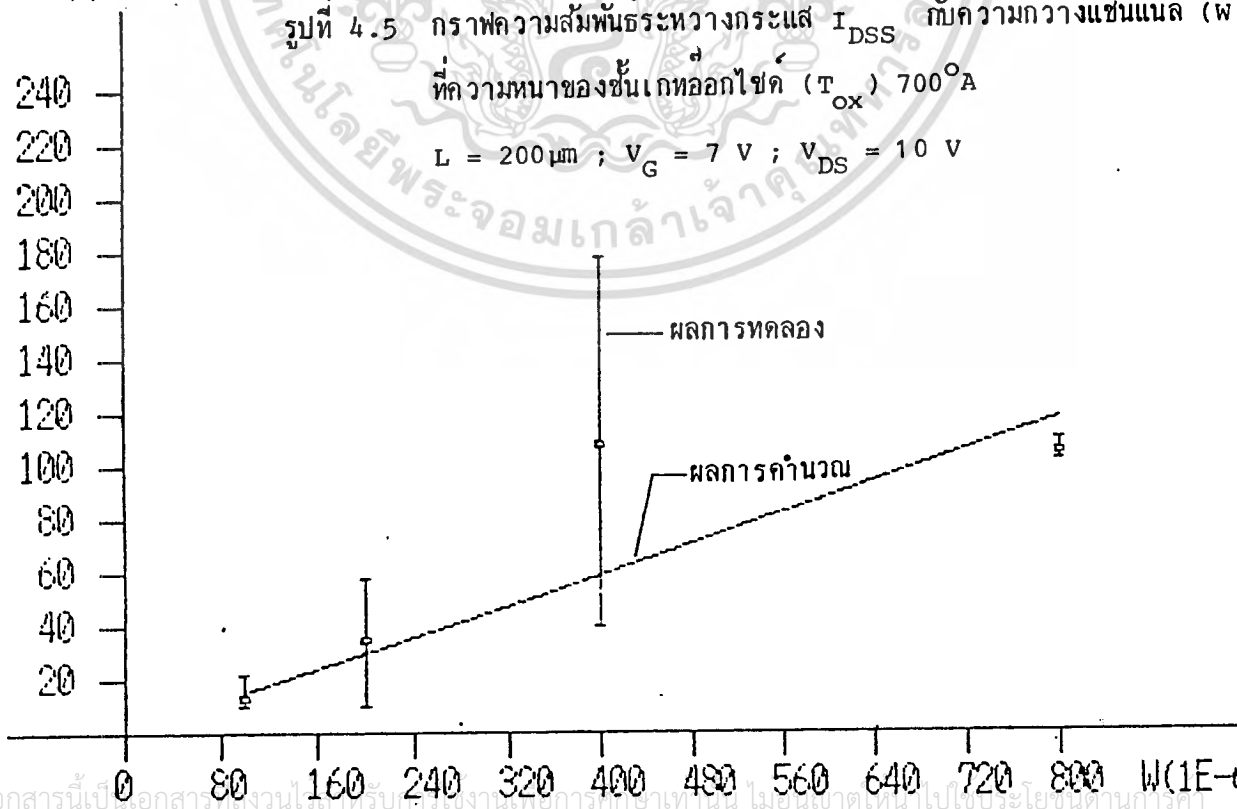
ผลการทดลอง แสดงได้ในรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับ  $w$  ที่ค่าแรงดัน  $V_{DS}$  คงที่ โดยมีความหนาของเกตออกไซด์  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  ตามลำดับ ค่าที่นำมาพล็อตก็จะมีค่าสูงสุด, ต่ำสุดและค่าเฉลี่ย เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3.1 เส้นที่ลากเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ ผลจากการทดลองและการคำนวณจะพบว่า มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน จะเห็นว่ากระแส  $I_D$  แปรผันกับ  $w$  และแปรผกผันกับ  $T_{ox}$  นั่นคือ

$$I_D \propto \frac{w}{T_{ox}}$$

D(1E-6Amp)



ID(1E-6Amp)



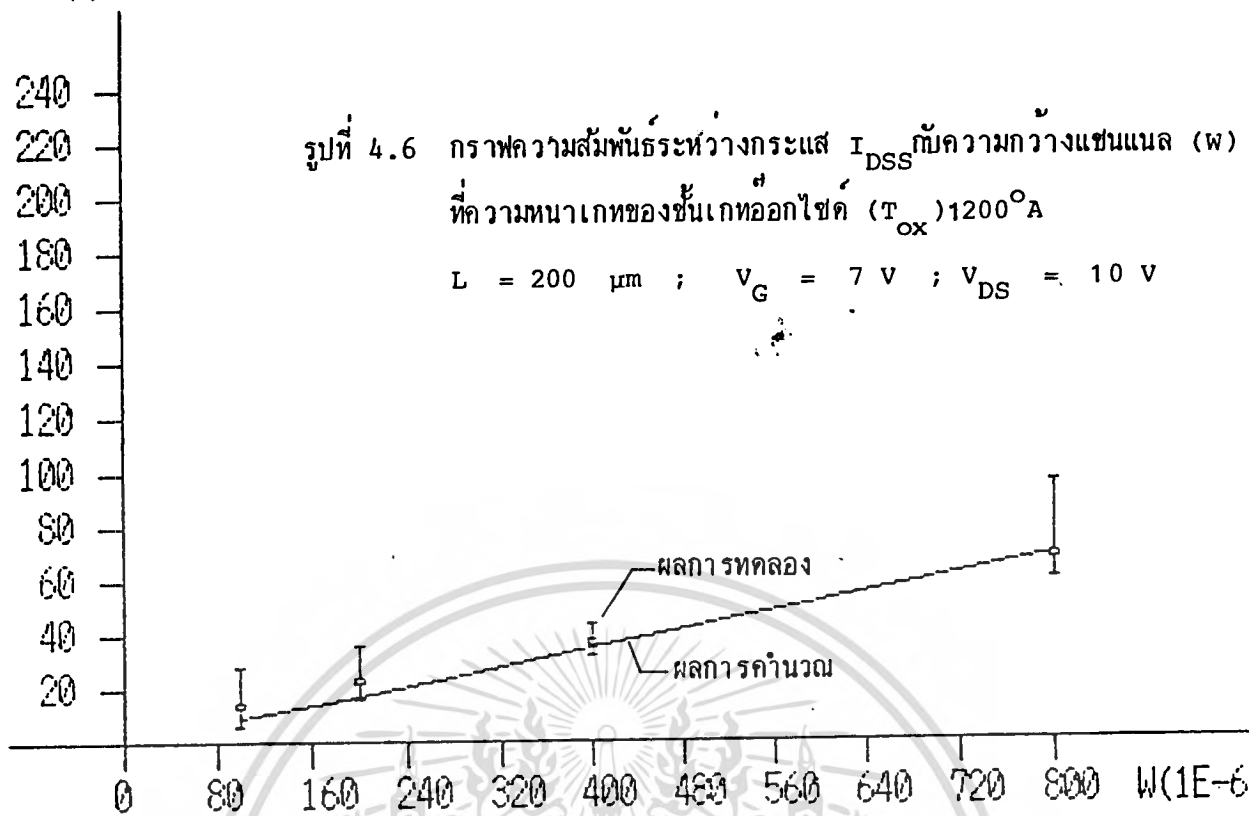
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูประจำชั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_D(1E-6Amp)$

รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับความกว้างแชนแนล (w) ที่ความหนาเขตของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $1200^{\circ}A$

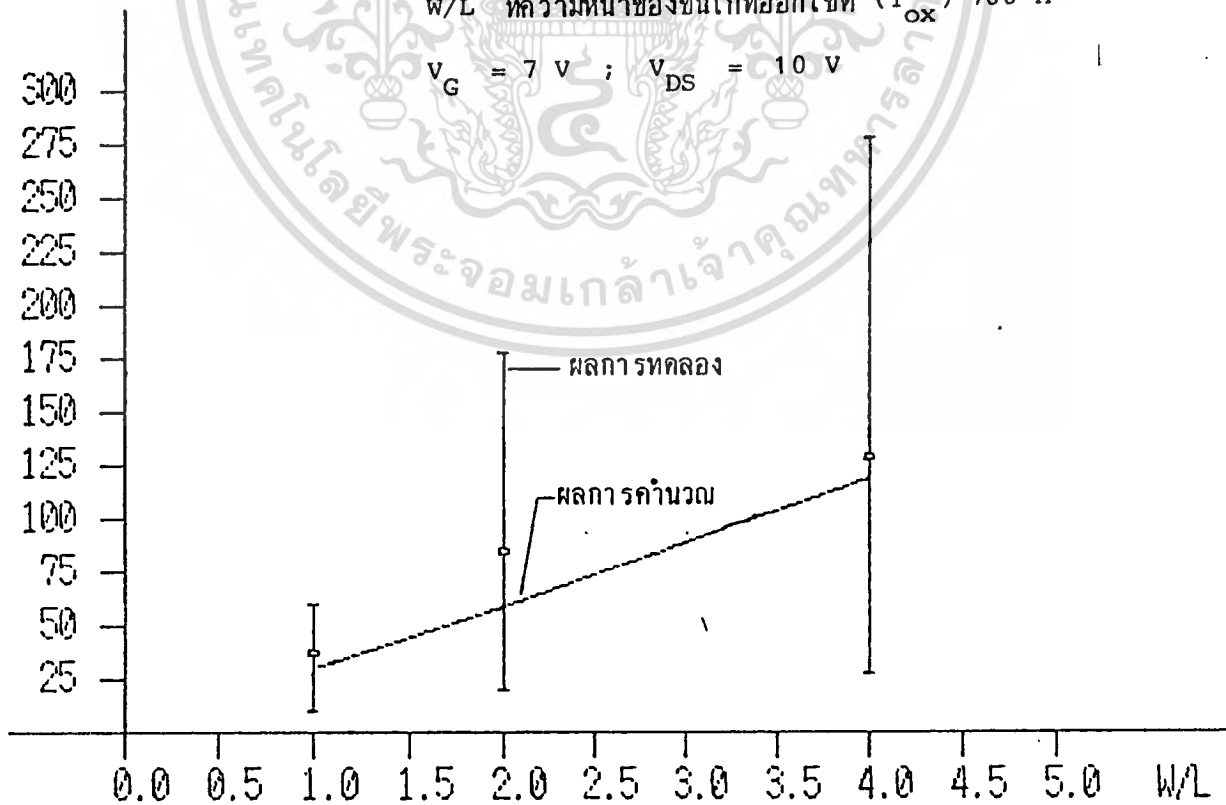
$L = 200 \mu m ; V_G = 7 V ; V_{DS} = 10 V$



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับอัตราส่วน  $w/L$  ที่ความหนาเขตของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700^{\circ}A$

$V_G = 7 V ; V_{DS} = 10 V$

$I_D(1E-6Amp)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3. การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเกรน (I) กับอัตราส่วน w/L

ต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.2 โดยให้แรงดันไบอัสที่เกต 7 V เลือกใช้เวซท์มีอัตราส่วน w/L เป็น 1, 2 และ 4 โดยที่ความยาวของแชนแนล L เท่ากับ 200  $\mu\text{m}$  ความหนาของเกตออกไซด์มี 2 ค่า คือ 700  $\text{\AA}$  และ 1200  $\text{\AA}$  ตามลำดับ วัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเกรน  $I_D$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับ w/L ที่ค่าแรงดัน  $V_{DS}$  คงที่โดยมีความหนาของเกตออกไซด์ 700  $\text{\AA}$  และ 1200  $\text{\AA}$  ตามลำดับ ค่าที่นำมาพล็อตจะแสดงค่าสูงสุด ค่าต่ำสุดและค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3.1 เส้นทึบเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน โดยจะได้ว่า กระแส  $I_D$  แปรผันกับ  $w/L$  และแปรผกผันกับ L และ  $T_{ox}$  นั่นคือ

$$I_D \propto \frac{w}{L \cdot T_{ox}}$$

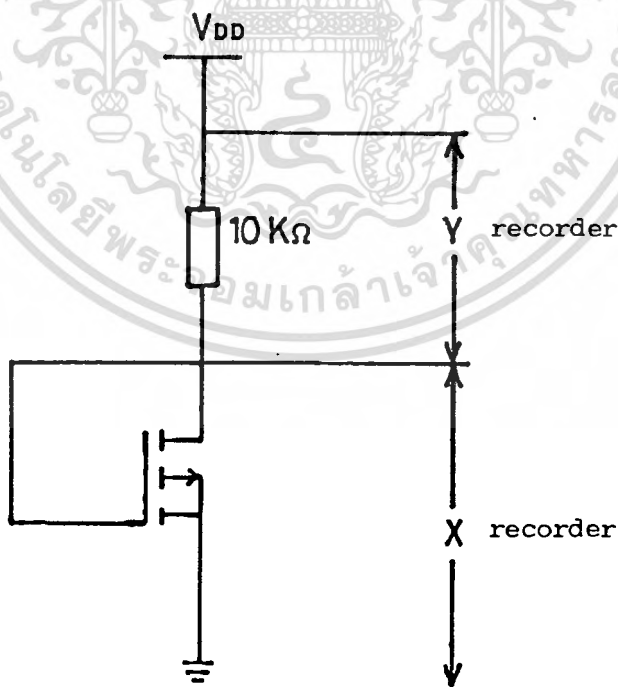
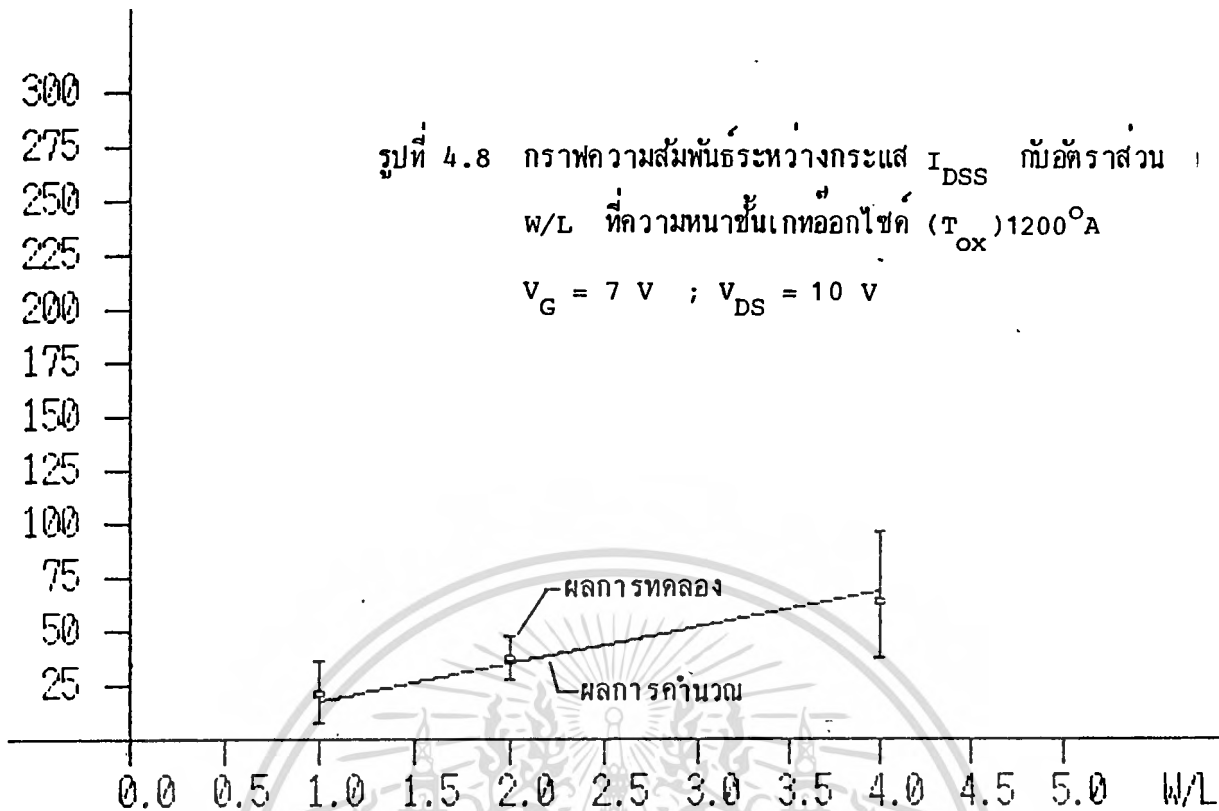
### 4.3.4 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความยาวแชนแนล (L)

ต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.9 เลือกใช้เวซท์ที่มีความยาวแชนแนล (L) เป็น 40  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  และ 200  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ โดยมีค่าความกว้างของแชนแนลเท่ากัน ( $w = 800 \mu\text{m}$ ) ความหนาของชั้นเกตออกไซด์มี 2 ค่า คือ 700  $\text{\AA}$  และ 1200  $\text{\AA}$  วัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_D$  กับแรงดัน  $V_G$  นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความยาวแชนแนล (L) ที่ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) ทั้ง 2 ค่า คือ  $T_{ox}$  เท่ากับ 700  $\text{\AA}$  และ 1200  $\text{\AA}$  จะพบว่าแรงดันวิกฤติ ที่ความหนาของเกตออกไซด์เท่ากันจะมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับ

(1E-6Amp)



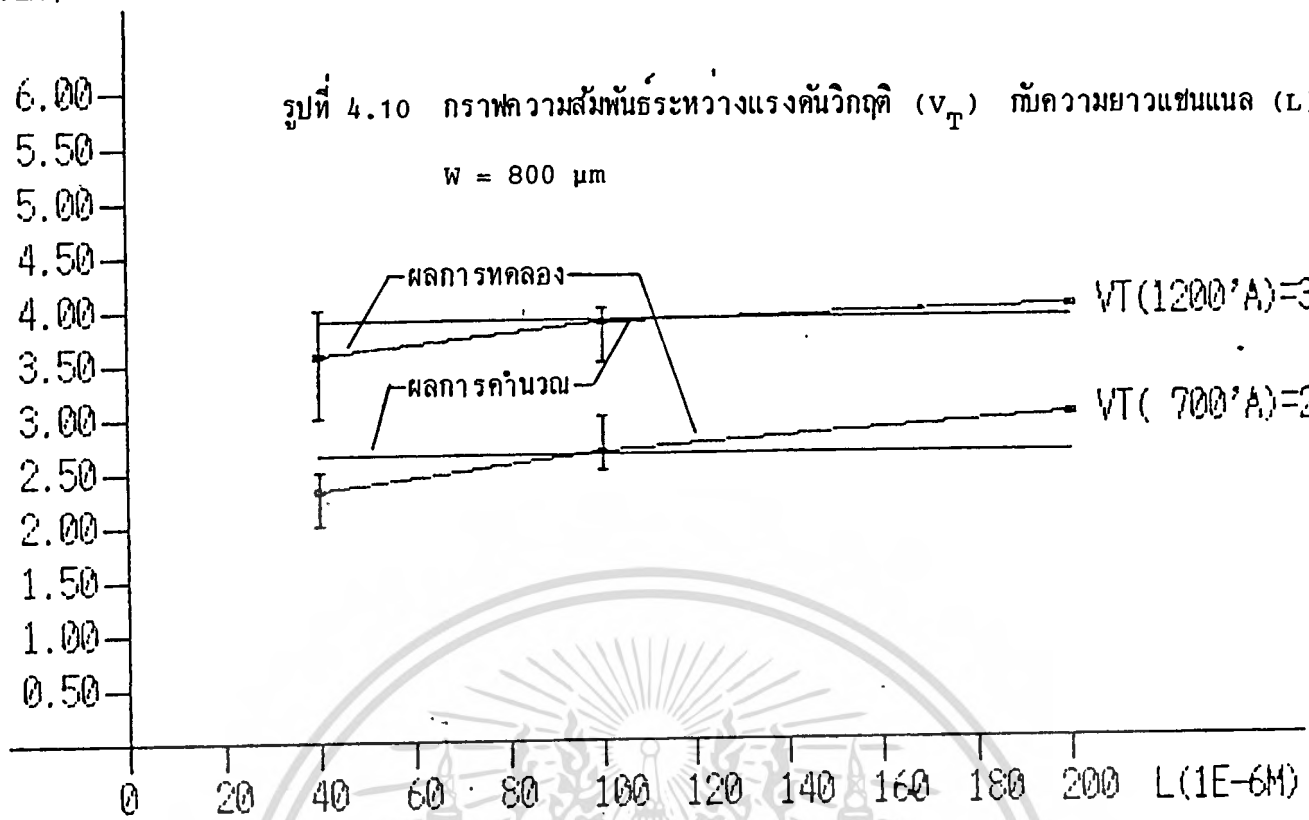
รูปที่ 4.9 วงจรทดลองวัดค่าแรงดันวิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VOLT)

รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความยาวแขนแนล (L)

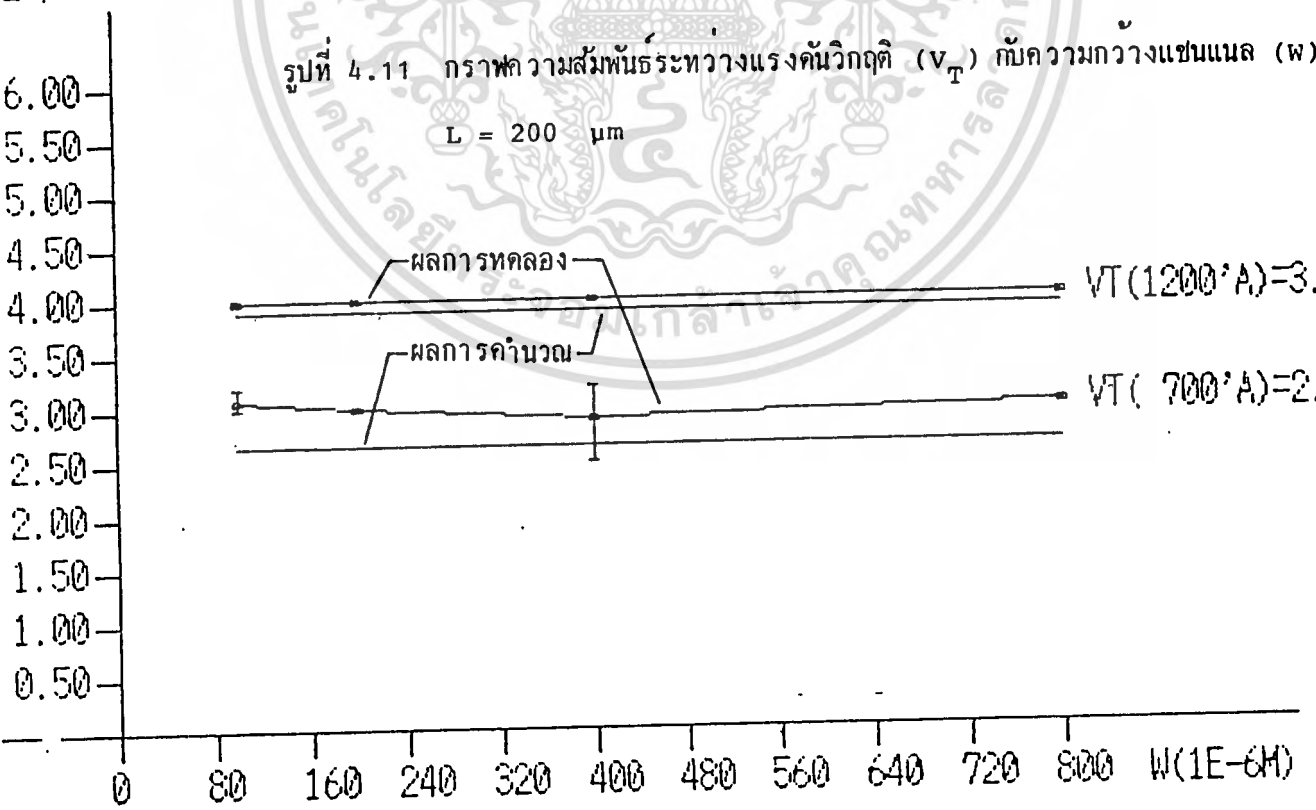
W = 800  $\mu$ m



VOLT)

รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความกว้างแขนแนล (W)

L = 200  $\mu$ m



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของแชนแนล แสดงว่าพารามิเตอร์  $L$  ไม่มีผลต่อค่าแรงดันวิกฤติ ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ไค การคำนวณ แต่เมื่อ  $T_{ox}$  มีค่าต่างกัน จะเห็นว่าค่าแรงดันวิกฤติจะมีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งที่ค่าความหนาของเกตออกไซด์มีค่ามากกว่าของแรงดันวิกฤติจะมีค่ามากด้วย เช่นที่  $T_{ox} = 700 \text{ \AA}$   $V_T = 2.64 \text{ V}$  และที่  $T_{ox} = 1200 \text{ \AA}$   $V_T$  มีค่า =  $3.90 \text{ V}$  แสดงว่าค่าแรงดันวิกฤตินั้นแปรผันกับ ความหนาของเกตออกไซด์ นั่นคือ

$$V_T \propto T_{ox}$$

4.3.5 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความกว้างแชนแนล ( $w$ )

ตัวอย่างการทดลองตามรูปที่ 4.9 เลือกใช้ไอซ์ที่มีควมกว้างแชนแนล ( $w$ ) เป็น  $100 \text{ \mu m}$ ,  $200 \text{ \mu m}$ ,  $400 \text{ \mu m}$  และ  $800 \text{ \mu m}$  ตามลำดับ โดยมีความยาวแชนแนลเท่ากัน ( $L = 200 \text{ \mu m}$ ) ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ เท่ากับ  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  วัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_D$  กับแรงดัน  $V_G$  นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.11 ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเป็นค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความกว้างแชนแนล ( $w$ ) ที่ความหนาเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) ทั้ง 2 ค่าคือ  $T_{ox}$  เท่ากับ  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  จะพบว่าไม่ว่าความกว้างแชนแนล ( $w$ ) จะเป็นเท่าไรก็ตาม ค่าแรงดันวิกฤติ จะมีค่าคงที่เท่ากันตลอดเมื่อความหนาชั้นเกตออกไซด์เท่ากัน แสดงว่าค่าแรงดันวิกฤติ ไม่ขึ้นกับความกว้างแชนแนล ( $w$ ) แต่เมื่อ  $T_{ox}$  มีค่าต่างกัน ค่า  $V_T$  จะมีค่าเปลี่ยนไป โดยที่ค่าความหนาของเกตออกไซด์มีค่ามากกว่าแรงดันวิกฤติจะมีค่ามากด้วย เช่น ที่  $T_{ox} = 700 \text{ \AA}$  ค่า  $V_T = 2.64 \text{ V}$  และที่  $T_{ox} = 1200 \text{ \AA}$  ค่า  $V_T = 3.90 \text{ V}$  แสดงว่าค่าแรงดันวิกฤตินั้นขึ้นกับความหนาของชั้นเกตออกไซด์ นั่นคือ

$$V_T \propto T_{ox}$$

### 4.3.6 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับอัตราส่วน $w/L$

ตัวอย่างการทดลองตามรูปที่ 4.9 เลือกใช้ชิปที่มีอัตราส่วน  $w/L$  เป็น 1, 2 และ 4 โดยที่ความยาวแขนแนลเท่ากัน ( $L = 200 \mu m$ ) ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) เป็น  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  วัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_D$  กับแรงดัน  $V_G$  นำข้อมูลที่ได้ออกไปพล็อตกราฟ

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันวิกฤติกับค่าอัตราส่วน  $w/L$  ที่ความหนาของเกตออกไซด์ ทั้ง 2 ค่าคือ  $T_{ox}$  เท่ากับ  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  จะพบว่าไม่ว่าอัตราส่วน  $w/L$  จะเป็นอย่างไรก็ตาม ค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) จะมีค่าคงที่เท่ากันเสมอเมื่อความหนาของชั้นเกตออกไซด์เท่ากัน แสดงว่าแรงดันวิกฤติ ไม่ขึ้นกับค่าอัตราส่วน  $w/L$  แต่เมื่อพิจารณาที่  $T_{ox}$  มีค่าเท่ากัน ค่า  $V_T$  จะมีค่าเปลี่ยนไปโดยที่  $T_{ox} = 700 \text{ \AA}$   $V_T = 2.64 \text{ V}$  และที่  $T_{ox} = 1200 \text{ \AA}$   $V_T = 3.90 \text{ V}$  แสดงว่าค่าแรงดันวิกฤตินั้นขึ้นกับความหนาของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) อย่างเดียว นั่นคือ

$$V_T \propto T_{ox}$$

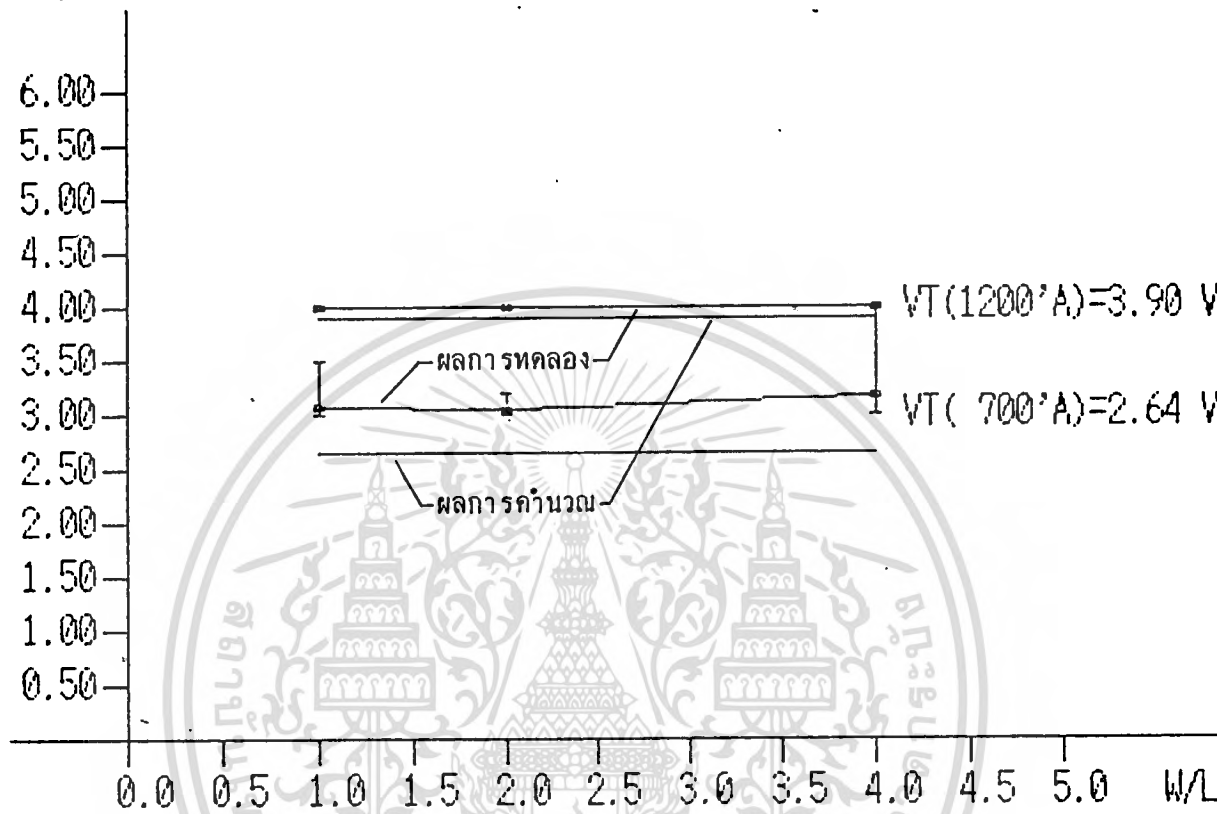
#### 4.4 สรุป

จากผลการทดลองวัดหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_D$  กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น  $L, w$  และ  $T_{ox}$  ค่าที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้เปลี่ยนไป เช่นเดียวกับการคำนวณทางทฤษฎี

อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นมีความไม่เท่ากันทีเดียว ทั้งนี้เพราะค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเช่น  $T_{ox}, \mu_{ps}$  ฯลฯ จะใช้ค่าโดยประมาณซึ่งได้จากการสังเกตด้วยตา หรือค่าทั่วไป (Typical Value) ที่นิยมใช้ในการคำนวณ จึงทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างไปจากการทดลอง แต่ถึงกระนั้นก็ตาม แนวโน้มของข้อมูลที่ได้ออกมาทั้ง 2 วิธียังคงมีลักษณะเช่นเดียวกัน จึงเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการทดลองที่ได้

สำหรับค่าแรงดันวิกฤตินี้ ได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับการคำนวณ คือมีค่าที่เท่ากันตลอด

$V_T$  (VOLT)



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับ  $W/L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความหนาของเกทออกไซด์ มีค่าเท่ากัน

สิ่งที่น่าสังเกตจากผลการทดลองวัด  $v_T$  กับ  $L$  ในรูปที่ 4.10 นั่นคือ เมื่อขนาดความยาว แชนแนล ( $L$ ) สั้นลง (ประมาณ 40  $\mu\text{m}$ ) ค่าแรงดันวิกฤติ ( $v_T$ ) เริ่มมีค่าลดลง และผลการทดลองวัด  $v_T$  กับ  $w$  ในรูปที่ 4.11 นั้น ปรากฏว่าเมื่อขนาดความกว้างแชนแนล ( $w$ ) แคบลง (ประมาณ 100  $\mu\text{m}$ ) ค่าแรงดันวิกฤติ ( $v_T$ ) เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้ง 2 แบบนี้จะทำการวิเคราะห์และกล่าวโดยละเอียดอีกครั้งในบทที่ 7 และบทที่ 8 ซึ่งเป็นการศึกษาผลของโครงสร้างทางเรขาคณิตที่มีขนาดเล็ก ๆ (small geometry effect) ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟต



บทที่ 5

ความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้โดยใช้แรงดันควบคุม  
[Voltage Control Resistance (VCR)]

5.1 วัตถุประสงค์

VCR เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ที่ใช้แรงดันภายนอกมาควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ในสมัยก่อนต้องใช้ดีไวซ์พวกไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาประกอบเป็นวงจรเพื่อสร้างเป็น VCR ในขณะนี้จะกล่าวถึงมอสเฟตซึ่งเป็นดีไวซ์ที่มีโครงสร้างแบบง่าย ๆ มีการควบคุมการทำงานโดยอาศัยแรงดันภายนอกมาไบอัสที่เกตเพื่อควบคุมการเกิดแชนแนลทำให้น้ำกระแสได้มากน้อยตามต้องการ อันเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของ VCR ดังกล่าว ซึ่งการควบคุมคุณสมบัติของมอสเฟตเพื่อให้ได้ VCR ตามต้องการนั้น อธิบายโดยทฤษฎีการ (2.1)

$$I_D = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \frac{W}{L} \left[ (V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2} \right]$$

ในช่วง Triode region หรือเรียกว่าช่วง Linear ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยพิจารณาที่  $V_D$  มีค่าน้อย ๆ ดังนั้น

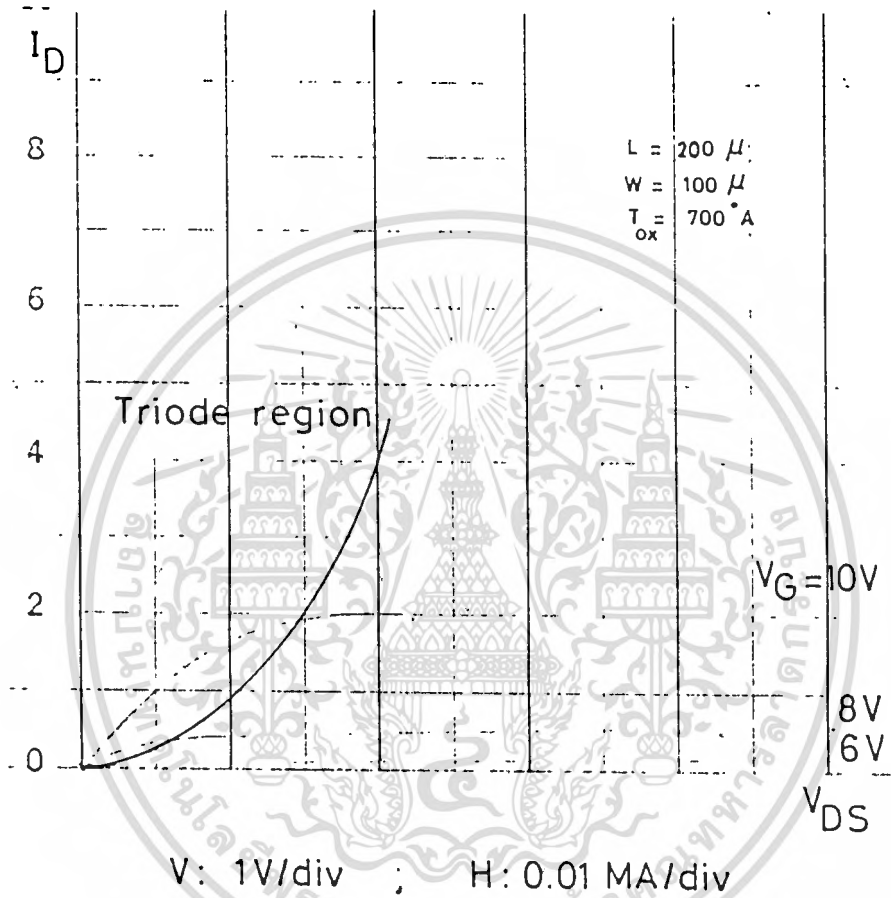
เทอม  $\frac{V_D^2}{2}$  จึงตัดทิ้งได้ ดังสมการที่ (2.2)

$$I_D = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \frac{W}{L} [(V_G - V_T)V_D]$$

ตามสมการ (2.2) นี้ เมื่อให้โครงสร้างคงที่ (W,L คงที่)

$$I_D = k V_D ; k = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \frac{W}{L} |V_G - V_T|$$

$$\frac{1}{K} = \frac{V_D}{I_D} = R$$



รูปที่ 5.1 Triode region ของมอสเฟต สำหรับการควบคุมการทำงานของ VCR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ

$$R = \frac{T_{ox} \cdot L}{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o W |V_G - V_T|}$$

ค่า R คือค่าความต้านทานมีค่า  $\frac{1}{K}$  เราจึงนำมอสเฟตมาสร้างเป็น VCR ได้เช่นกัน

นอกจากการพิจารณาความต้านทานแล้วการสร้าง VCR ใหม่ก็คุณสมบัติที่ควรมีความเร็วในการสวิตช์ (Switching Speed) สูงด้วย ซึ่งถ้าดีไวซ์มีความเร็วสูง ๆ แล้ว ก็จะตอบสนองความถี่ได้สูงเช่นกัน จากสมการ (5.1)

$$f_g = \frac{0.35}{T_r} \text{ Hz} \quad \dots (5.1)$$

จากสมการที่ (2.26)

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_G} \Big|_{V_D \text{ คงที่}}$$

ในช่วง Triode

$$I_D = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \frac{W}{L} \left[ (V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2} \right]$$

ซึ่งจะได้

$$g_m = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \frac{W}{L} |V_D|$$

ในช่วง Saturation

จากสมการ (2.5)

$$I_{DSS} = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}} \frac{W}{L} (V_G - V_T)^2$$

จะได้ว่า

จากสมการที่ (2.28)

$$g_m = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_{ox}}{T_{ox}} \frac{W}{L} |V_G - V_T|$$

ค่า  $g_m$  ในช่วงอิ่มตัวจะเป็นค่า  $g_m$  maximum ของ VCR

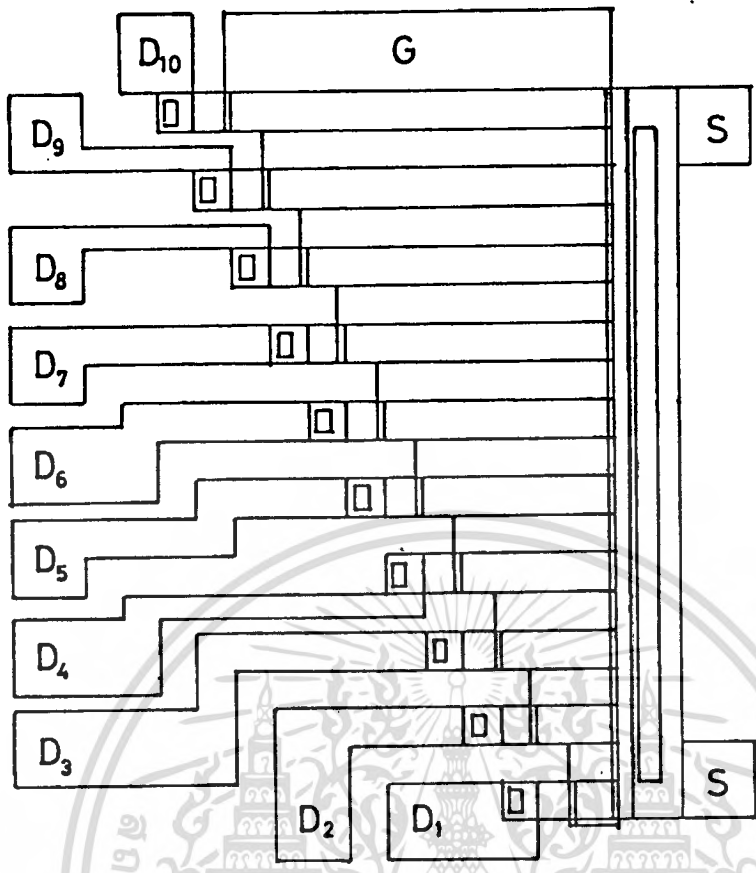
ในการทดลองนี้จะทำการสร้าง P-ch MOSFET ให้ทำงานเป็น VCR ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น ตัวความต้านทานที่คี่ มีค่าความต้านทานแบบ Linear และสามารถควบคุมค่าความต้านทานได้ช่วงกว้าง

## 5.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

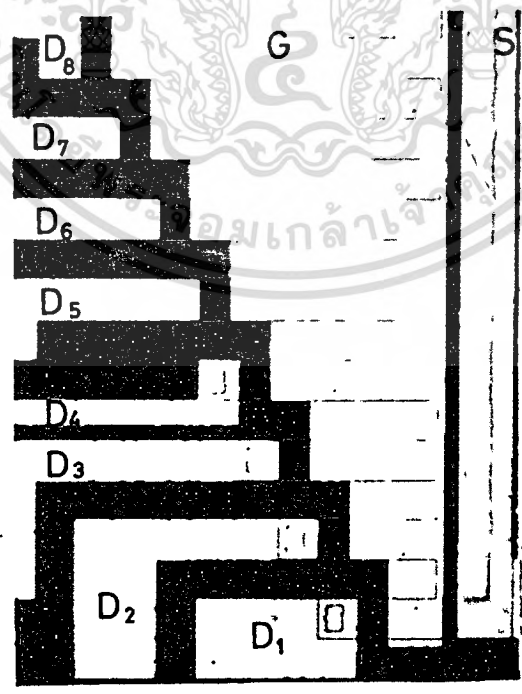
ในการออกแบบมอสเฟตเมื่อศึกษาโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการทำเป็น VCR นั้นได้ ออกแบบให้มีโครงสร้างคั่นแบบคั้งแสดงในรูปที่ 5.2 โดยที่ ใน 1 ชิป ประกอบด้วยมอสเฟตเรียงกัน 10 ตัว ( $D_1 - D_{10}$ ) ใช้ขั้วเกตและขั้วสรวมกัน มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน คั้งแสดงในตารางที่ 5.1 โดยออกแบบให้ความยาวแชนแนล ( $L$ ) ของมอสเฟตมีค่าตั้งแต่ 100  $\mu m$  - 1000  $\mu m$  ความกว้าง แชนแนล ( $w$ ) 100  $\mu m$  ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 700 $^{\circ}A$  และ 1200 $^{\circ}A$  เขียนคั่นแบบลงบน กระดาษกราฟ แล้วตัดแผ่น peel coat ตามแบบ ถายยอลงบนมาสค์กระจกขนาดย่อ 50 เท่า นำไป เป็นคั่นแบบสำหรับสร้าง VCR ตามขั้นตอนโยมที่ 3

## 5.3 การทดลองและผลการทดลอง

5.3.1 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) กับ ความยาวแชนแนล ( $L$ )  
ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองรูปที่ 5.3 วัดค่าความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) ของ มอสเฟต ซึ่งหาได้จาก  $R_{sd} = \Delta V_D / \Delta I_D$  ในบริเวณช่วง Triode region ที่ความยาวแชน



ภาพ pattern ขนาดขยาย 50 เท่าจากชิ้นงานจริง



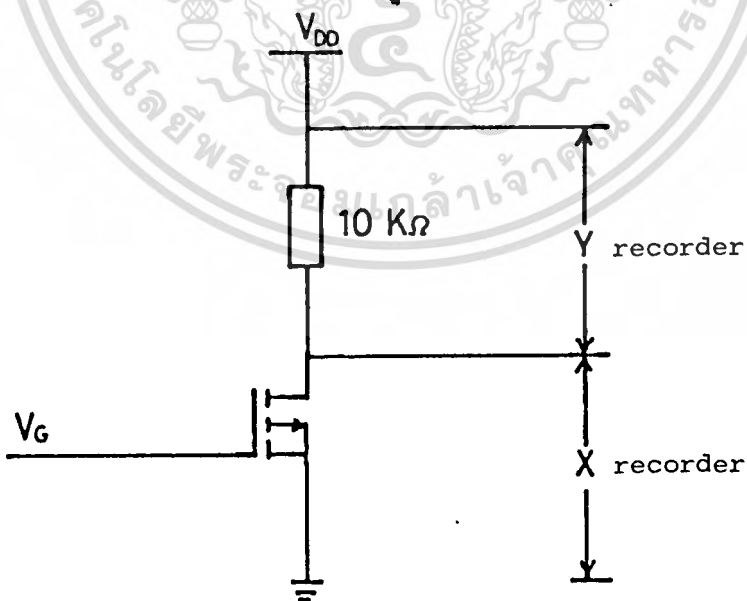
ภาพถ่ายจากชิ้นงานจริง

รูปที่ 5.2 Pattern MOSFET ทดสอบคุณสมบัติ แบบVCR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1

พารามิเตอร์	L (μm)	W (μm)	T <sub>ox</sub> (Å)
D <sub>1</sub>	100	100	700 ,  1200
D <sub>2</sub>	200		
D <sub>3</sub>	300		
D <sub>4</sub>	400		
D <sub>5</sub>	500		
D <sub>6</sub>	600		
D <sub>7</sub>	700		
D <sub>8</sub>	800		
D <sub>9</sub>	900		
D <sub>10</sub>	1000		



รูปที่ 5.3 วงจรการทดลองวัดค่ากระแสครน ( $I_D$ ) กับแรงดันครน ( $V_{DS}$ )

ที่แรงดันเกต ( $V_G$ ) มีค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกัน ให้แรงดันเกต  $V_G$  มีค่าตั้งแต่ 6V ถึง 10 V ความยาวแชนแนล (L) มีค่าตั้งแต่ 100  $\mu\text{m}$  ถึง 1000  $\mu\text{m}$  ความกว้างแชนแนล (w) 100  $\mu\text{m}$  ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{\text{ox}}$ ) 700 $^{\circ}\text{A}$  นำข้อมูล  $R_{\text{sd}}$  ไปพล็อตกับ L ที่มีค่าต่าง ๆ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยน  $T_{\text{ox}}$  เป็น 1200 $^{\circ}\text{A}$  นำข้อมูลไปพล็อตกราฟ

ผลการทดลอง

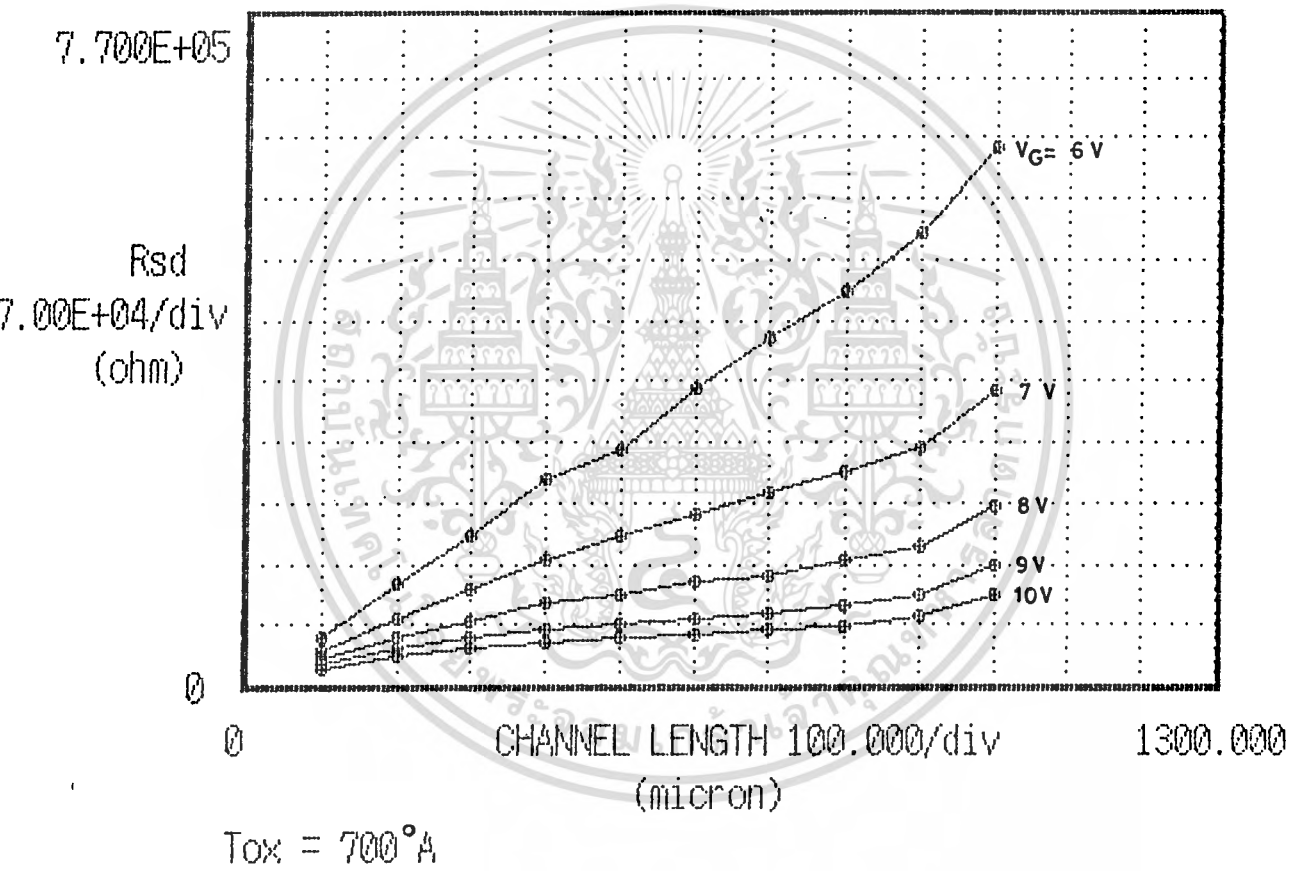
ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูป 5.4 เป็นกราฟ  $R_{\text{sd}}$  กับ L ที่  $T_{\text{ox}}$  700 $^{\circ}\text{A}$  จากกราฟจะพบว่า ที่แรงดัน  $V_G$  ค่าต่ำคือ  $V_G = 6 \text{ V}$  จะได้ค่าความต้านทาน  $R_{\text{sd}}$  สูงเมื่อความยาวแชนแนล L มากขึ้น ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{\text{sd}}$  กับ L เป็น

$$R_{\text{sd}} \propto L$$

ค่าความต้านทาน  $R_{\text{sd}}$  ที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ 55 k $\Omega$  - 620 k $\Omega$  ซึ่งนับว่ามีช่วงใช้งานกว้างมาก เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสที่เกตมากขึ้น เช่น ที่  $V = 7 \text{ V}$   $R_{\text{sd}}$  มีค่าระหว่าง 40 k $\Omega$  - 340 k $\Omega$ , ที่  $V = 8 \text{ V}$   $R_{\text{sd}}$  มีค่าระหว่าง 30 k $\Omega$  - 200 k $\Omega$ , ที่  $V = 9 \text{ V}$   $R_{\text{sd}}$  มีค่าระหว่าง 25 k $\Omega$  - 140 k $\Omega$  ที่  $V_G = 10$   $R_{\text{sd}}$  มีค่าระหว่าง 20 k $\Omega$  - 100 k $\Omega$  สำหรับการออกแบบให้  $R_{\text{sd}}$  มีค่าต่ำหรือสูงสามารถทำได้โดยควบคุม ความยาวแชนแนล L เช่น ถ้าต้องการ  $R_{\text{sd}}$  ค่าต่ำ ๆ ก็ลดความยาวลง ถ้าต้องการ  $R_{\text{sd}}$  ค่าสูง ๆ ก็เพิ่มความยาวแชนแนลให้มาก แต่การลดเพิ่ม L นี้ต้องมีขอบเขตที่จะไม่เกิดผลทางด้านอื่นตามมา เช่น Short channel effect หรือถ้าเพิ่ม L มากๆก็เปลืองพื้นที่มาก นอกจาก L แล้ว เรายังสามารถควบคุมค่า  $R_{\text{sd}}$  ได้โดยตัวแปรอื่น เช่น w,  $T_{\text{ox}}$  และ แรงดันไบอัสที่เกต ( $V_G$ ) ซึ่งสามารถทำได้ง่าย ในรูปที่ 5.5 จะเป็นกราฟที่ไล่ค่าการคำนวณทางทฤษฎีเทียบกับกราฟรูปที่ 5.4 พบว่าค่าการคำนวณกับการทดลองให้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในรูปที่ 5.6 เป็นผลการทดลองที่  $T_{\text{ox}}$  1200 $^{\circ}\text{A}$  ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันแต่มีค่าความต้านทานสูงกว่ารูปที่ 5.7 เป็นการทดลองวัดหาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_{\text{sd}}$  ต่อแรงดัน  $V_G$  ที่ความยาวแชนแนลต่าง ๆ ถ้าลากกราฟจะพบว่า ที่ความยาวแชนแนลสั้น ๆ ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเปลี่ยนค่า  $V_G$  ส่วนที่ความยาวแชนแนลยาว ๆ มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเช่น ที่ ความยาว L 100  $\mu\text{m}$   $V_G$  เปลี่ยนจาก 10 V เป็น 6 V ค่า  $R_{\text{sd}}$  เปลี่ยนแปลงจาก 20 k $\Omega$  เป็น 40 k $\Omega$

# DATA PLOTTER

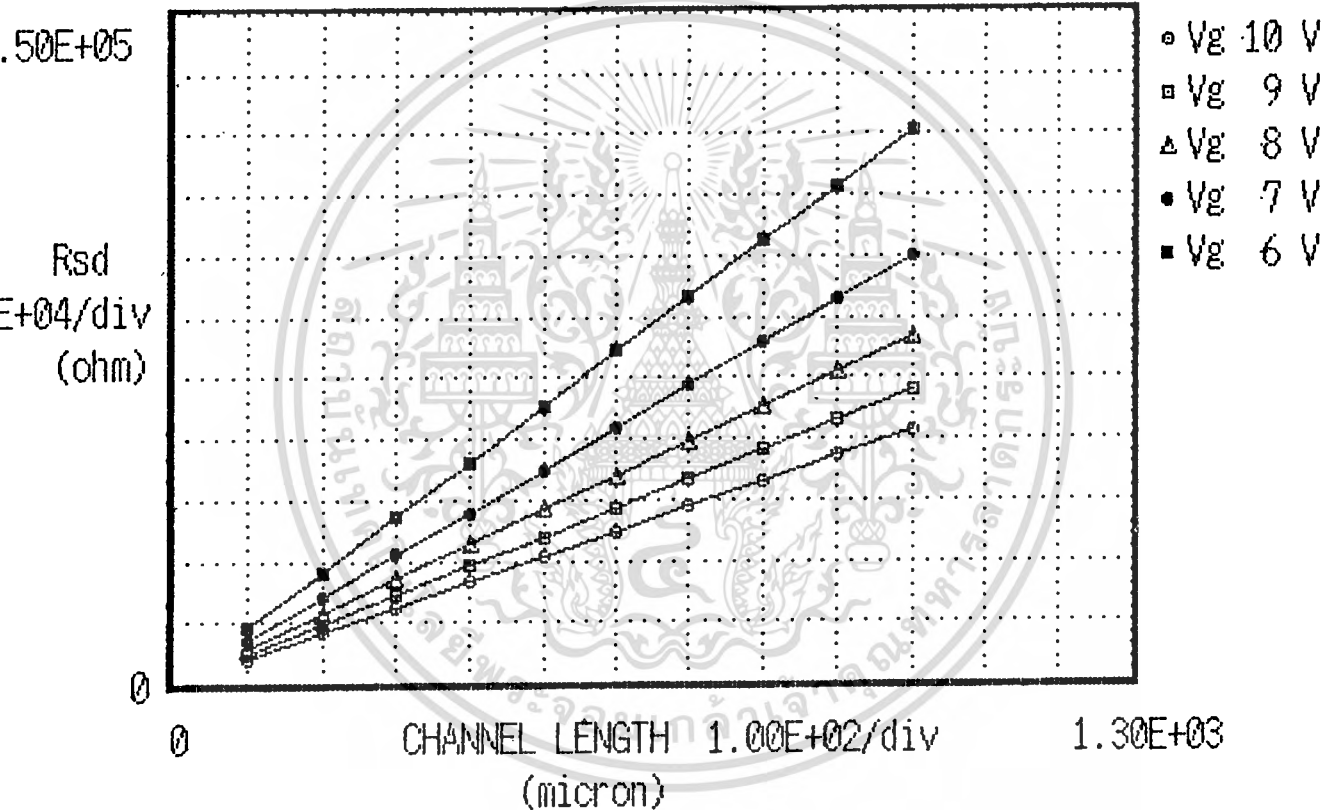
## $R_{sd}$ -CHANNEL LENGTH RELATION



รูปที่ 5.4 กราฟผลการทดลองค่า ความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) กับความยาวแชนแนล(L) ที่ความหนาเทออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700^\circ A$

# DATA PLOTTER (P-ch)

## R<sub>sd</sub>-Channel Length RELATION

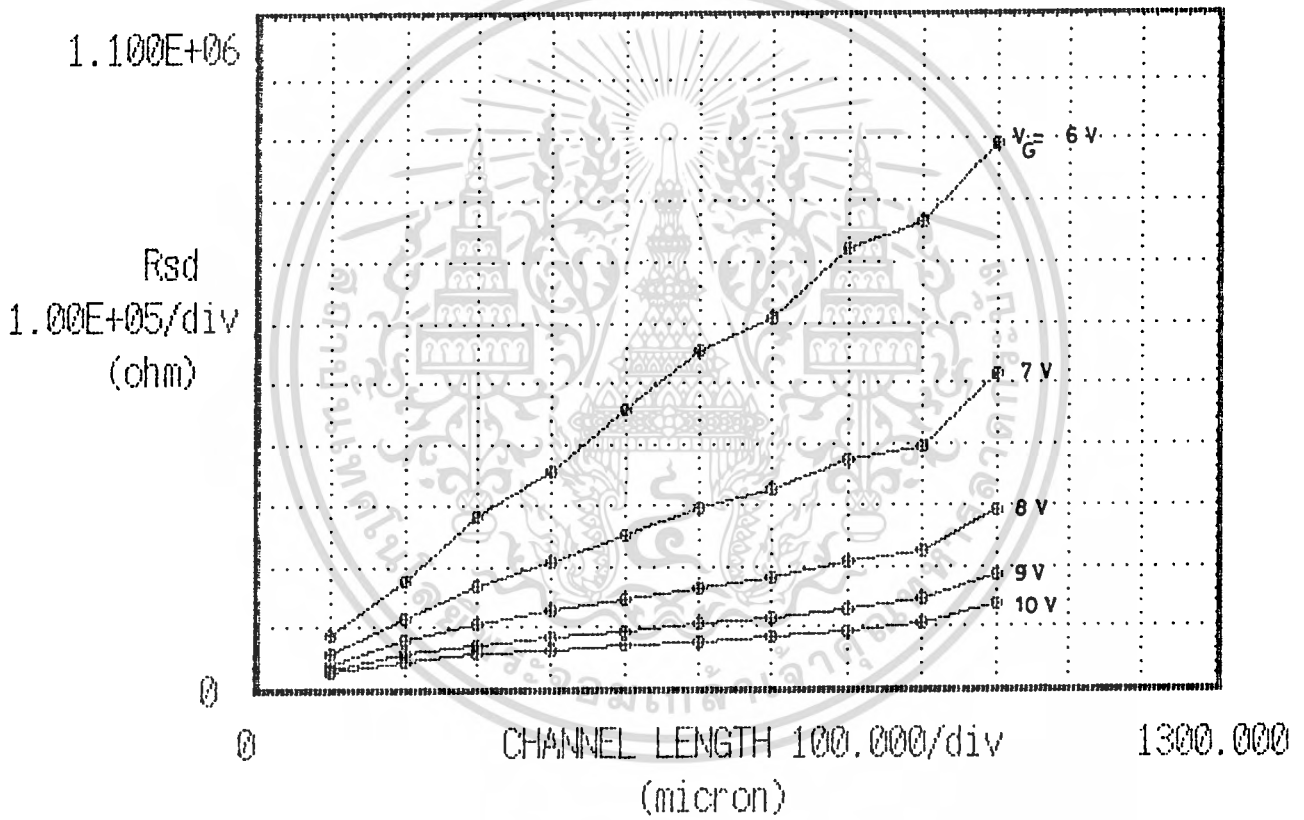


**VCR mos**      L = 100-1000 μm    W = 100 μm    Tox = 700 Å

รูปที่ 5.5 กราฟผลการคำนวณค่าความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) ที่ขึ้นกับความยาวแชนแนล (L) ที่ความหนาแกทออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 700 Å

# DATA PLOTTER

## $R_{sd}$ -CHANNEL LENGTH RELATION

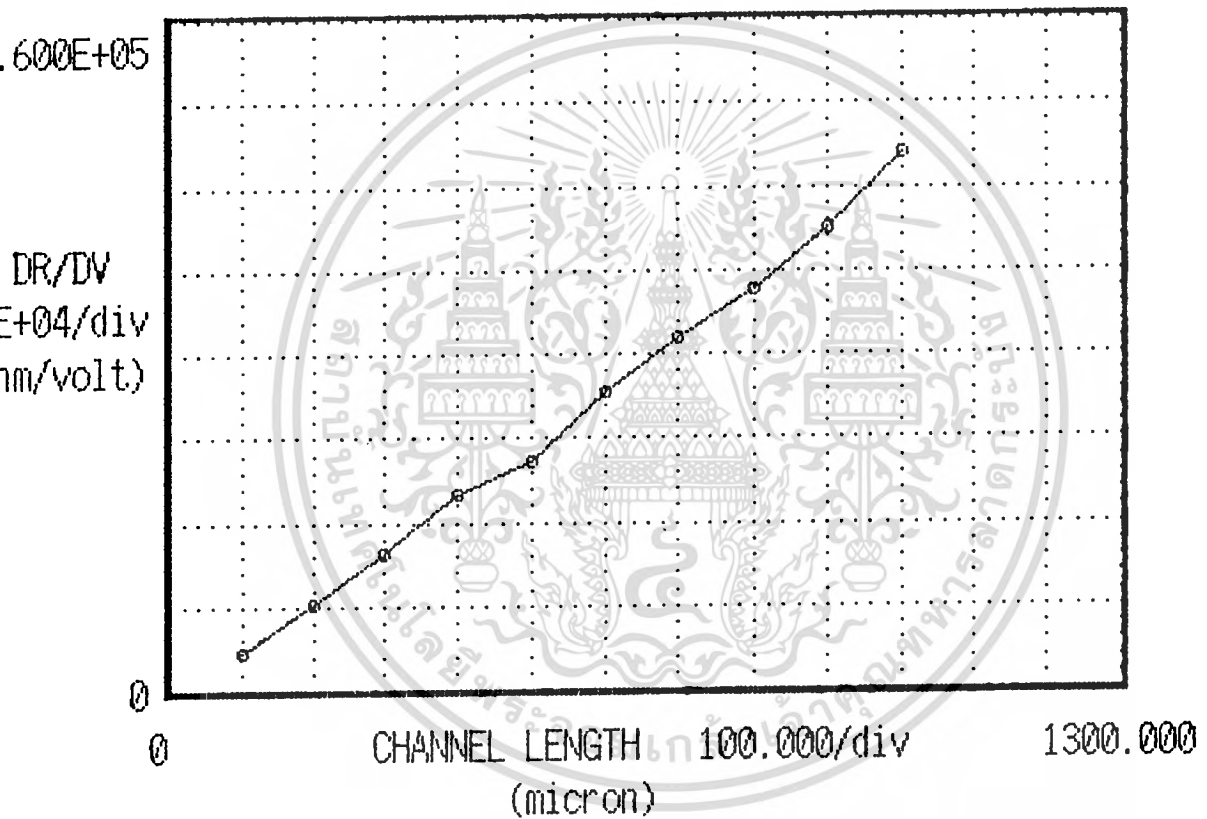


$T_{ox} = 1200^{\circ}A$

รูปที่ 5.6 กราฟผลการทดลองค่า ความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) กับความยาวแชนแนล (L) ที่ความหนาแกทออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $1200^{\circ}A$

# DATA PLOTTER (P-ch)

## DELTA R / DELTA V - L RELATION



T<sub>ox</sub> = 700 Å

รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta R_{sd} / \Delta V_G$  ที่ความยาวแชนแนล (L) ต่าง ๆ กัน ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ (T<sub>ox</sub>) 700 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ประมาณ 2 เทา) แต่ที่  $L = 1000 \mu m$   $R_{sd}$  เปลี่ยนแปลงจาก 100 k $\Omega$  เป็น 620 k $\Omega$  (ประมาณ 6 เทา)

5.3.2 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) กับ แรงดันเกต ( $V_G$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรตามรูปที่ 5.3 ทดลองเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 5.3.1 แต่นำข้อมูล  $R_{sd}$  ไปพล็อตกราฟกับ  $V_G$  ที่  $L$  ค่าต่าง ๆ เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{sd}$  กับ  $V_G$

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 5.8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{sd}$  กับ  $V_G$  ที่  $T_{ox} = 700 \text{ \AA}$  จากกราฟพบว่า  $R_{sd}$  แปรผกผันกับ  $V_G$  ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$R_{sd} \propto \frac{1}{V_G}$$

ในรูปที่ 5.9 เป็นผลการคำนวณทางทฤษฎีเทียบกับกราฟในรูปที่ 5.8 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ในรูปที่ 5.10 เป็นผลการทดลองที่  $T_{ox} = 1200 \text{ \AA}$  ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับรูป 5.8 แต่มีค่าความต้านทานสูงกว่า รูปที่ 5.11 เป็นการทดลองหาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_{sd}$  ต่อ  $L$  ที่แรงดัน  $V_G$  ค่าต่าง ๆ จากกราฟพบว่า ที่แรงดันเกต  $V_G$  ค่าน้อย ๆ เช่นที่  $V_G = 6 \text{ V}$  ค่าความต้านทานเปลี่ยนจาก 55 k $\Omega$  เป็น 620 k $\Omega$  (ประมาณ 10 เทา) ที่  $V_G = 10 \text{ V}$  ค่าความต้านทานเปลี่ยนจาก 20 k $\Omega$  เป็น 100 k $\Omega$  (ประมาณ 5 เทา)

ดังนั้น ที่แรงดันเกต  $V_G$  ต่ำ ๆ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า  $R_{sd}$  มากกว่า

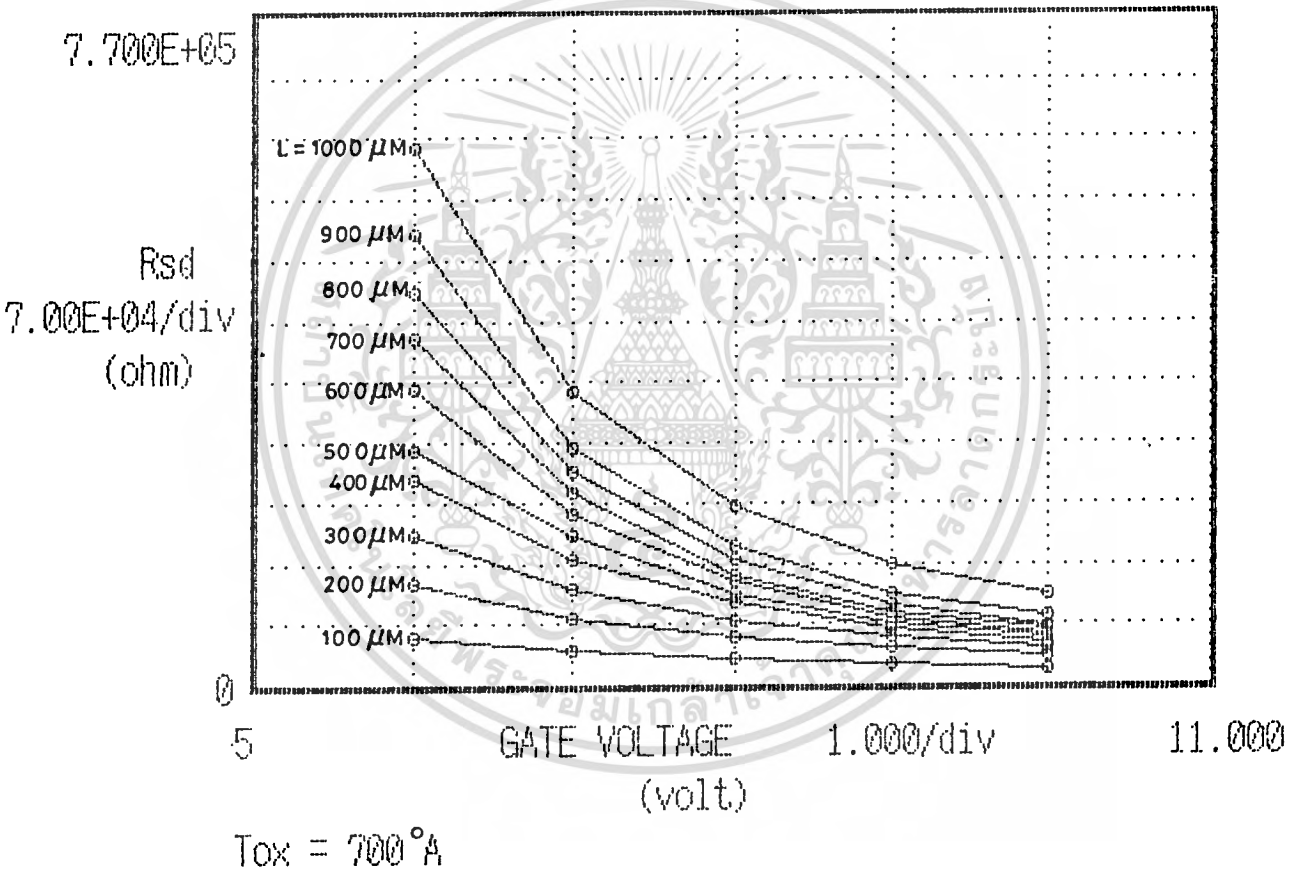
5.3.3 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่งผ่านความนำไฟฟ้า (Transconductance:  $g_m$ ) กับ ความยาวแชนแนล ( $L$ )

ต่อวงจรการทดลองตามรูป 5.3 ให้แรงดัน  $V_{DS}$  คงที่ที่ 2 V ซึ่งอยู่ในช่วง Triode region วัดค่า  $g_m$  โดยที่  $g_m = \Delta I / \Delta V_G$  ให้  $\Delta V_G = 4 \text{ V}$  ( 10V-6V ) ทำการวัดที่ความยาวแชนแนล ( $L$ ) ตั้งแต่ 100  $\mu m$  - 1000  $\mu m$  ความกว้างแชนแนล ( $w$ ) 100  $\mu m$  ความหนาชั้นเกตออกไซด์ 700  $\text{\AA}$  และ 1200  $\text{\AA}$  นำข้อมูลไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $g_m$  กับ  $L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER

## R<sub>sd</sub>-GATE VOLTAGE RELATION

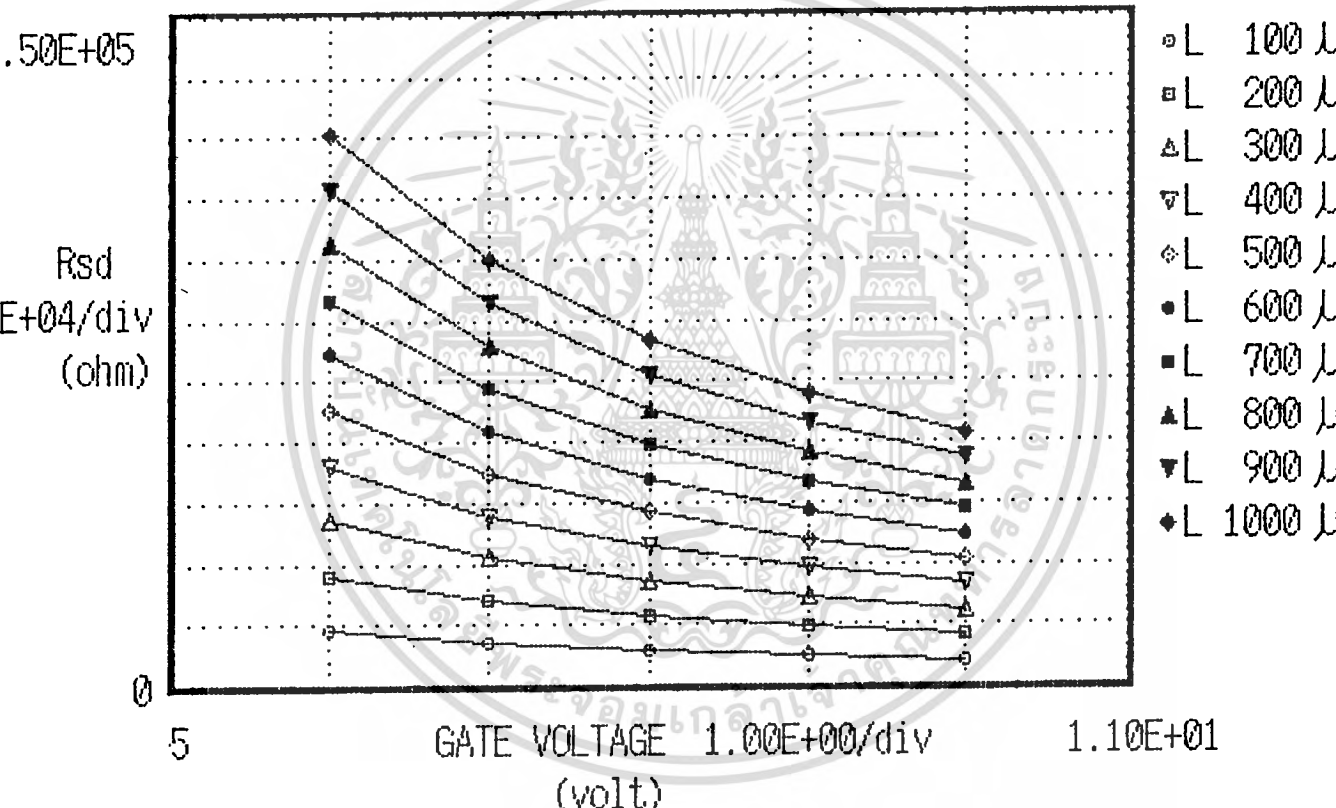


รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) กับ แรงดันไบอัสที่เกต ( $V_G$ ) ที่ความหนาเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 700 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### DATA PLOTTER (P-ch)

### Rsd=Gate Voltage RELATION

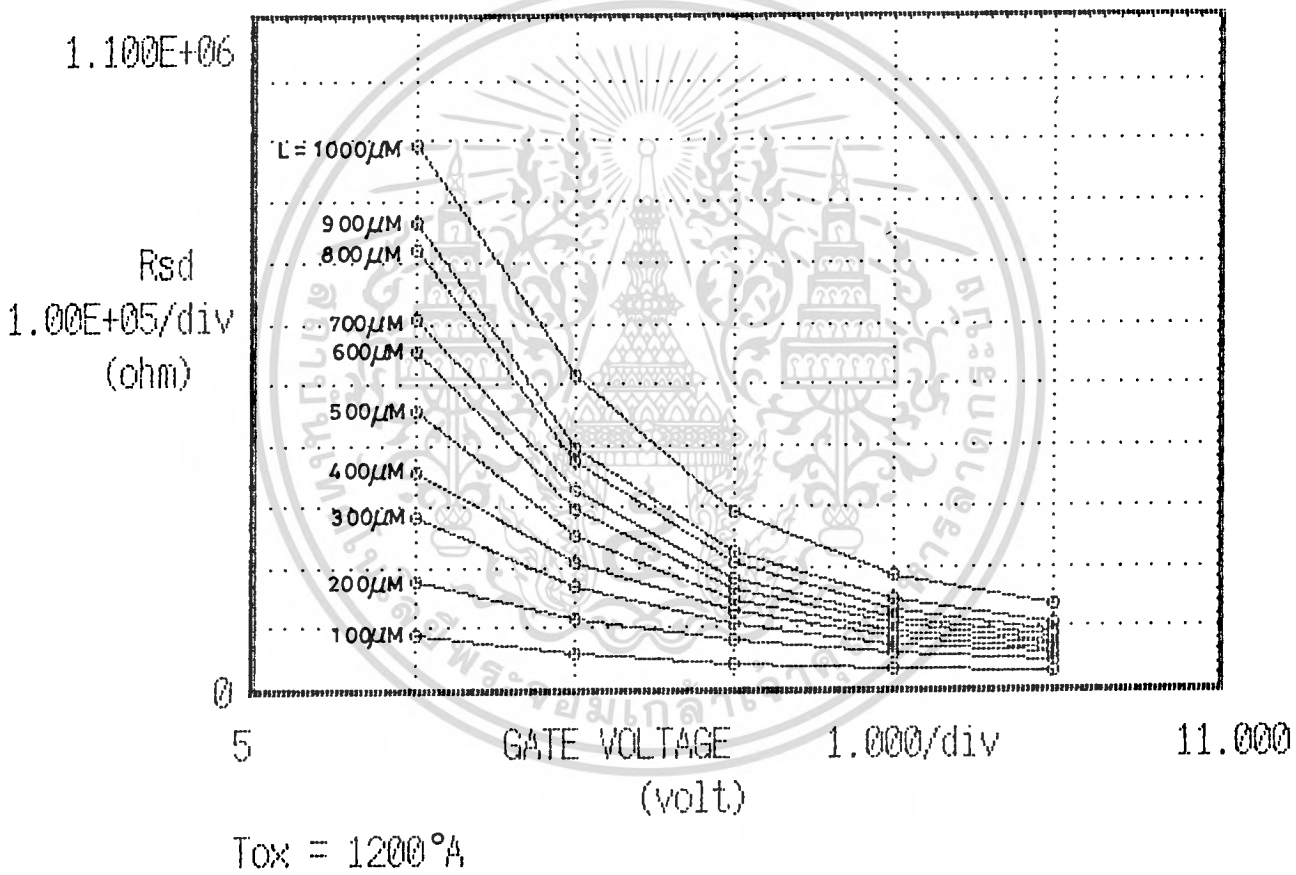


**VCR mos**      L = 100-1000 μm    W = 100 μm    T<sub>ox</sub> = 700 Å

รูปที่ 5.9 กราฟผลการคำนวณค่าความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) ที่ขึ้นกับแรงดันที่เกต ( $V_G$ ) ที่ความหนาแกทออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 700 Å

# DATA PLOTTER

## $R_{sd}$ -GATE VOLTAGE RELATION

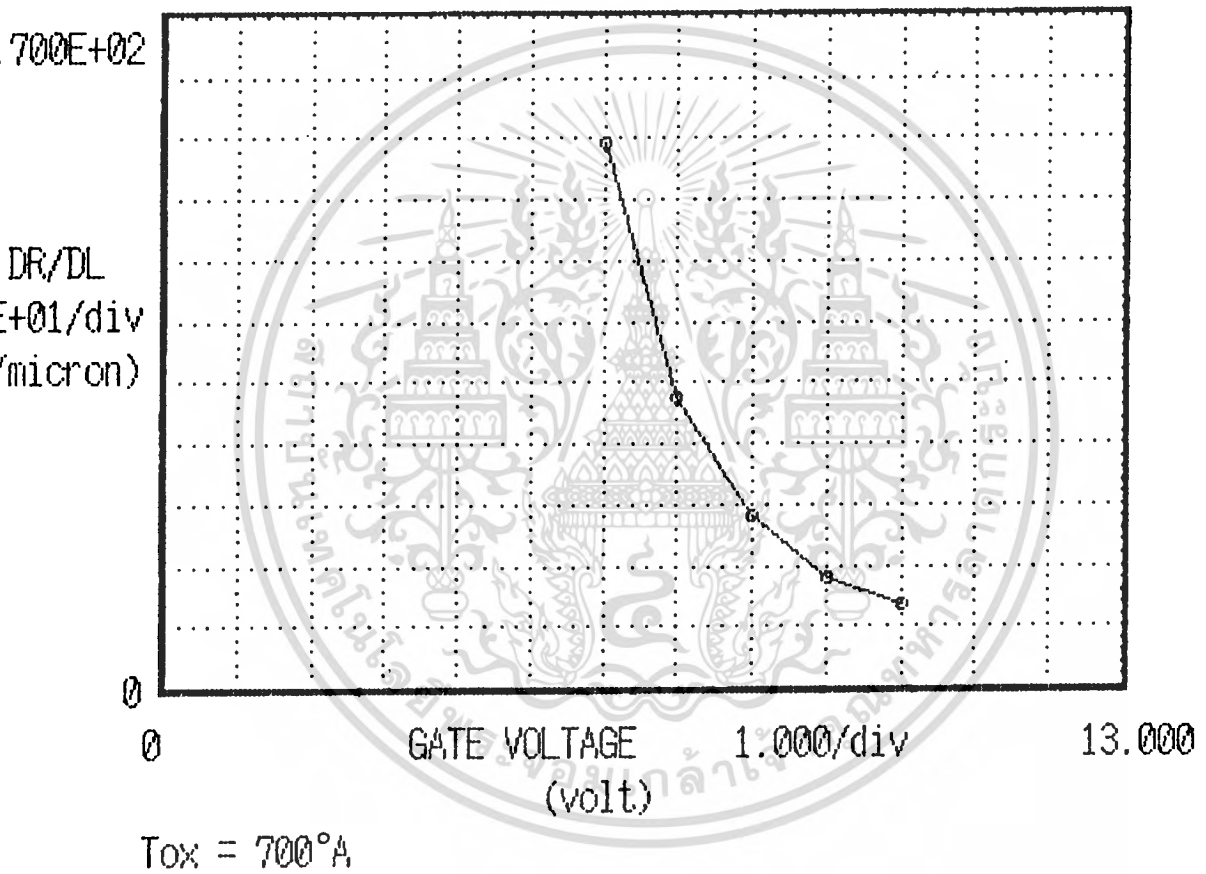


รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน ( $R_{sd}$ ) กับแรงดันไบอัสที่เกต ( $V_G$ ) ที่ความหนาเทออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $1200 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER (P-ch)

## DELTA R/DELTA L - V RELATION



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta R_{sd}/\Delta L$  ที่แรงดันไบอัสที่เกต ( $V_G$ )  
มีค่าต่าง ๆ กัน ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700 \text{ \AA}$

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงไค้ดังรูปที่ 5.12 จากกราฟพบว่าความยาว  $L$  ค่าน้อย ๆ  $g_m$  จะ มีค่าสูงและ เมื่อความยาว  $L$  มีค่ามากขึ้น ค่า  $g_m$  ลดลง ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ไค้ดังนี้

$$g_m \propto \frac{1}{L}$$

จะเห็นว่าเป็นไปตามสมการที่ (2.27) และเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นเกตออกไซด์มากขึ้น ค่า  $g_m$  จะ ลดลงนั่นไค้คือ

$$g_m \propto \frac{1}{T_{ox}}$$

สำหรับค่า  $g_m$  ที่วัดไค้ที่  $T_{ox} = 700 \text{ \AA}$  มีค่าตั้งแต่  $8 \mu\text{S} - 45 \mu\text{S}$  ในรูปที่ 5.13 เป็นกราฟ ที่ไค้จากการคำนวณทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ไค้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับการทดลอง และมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

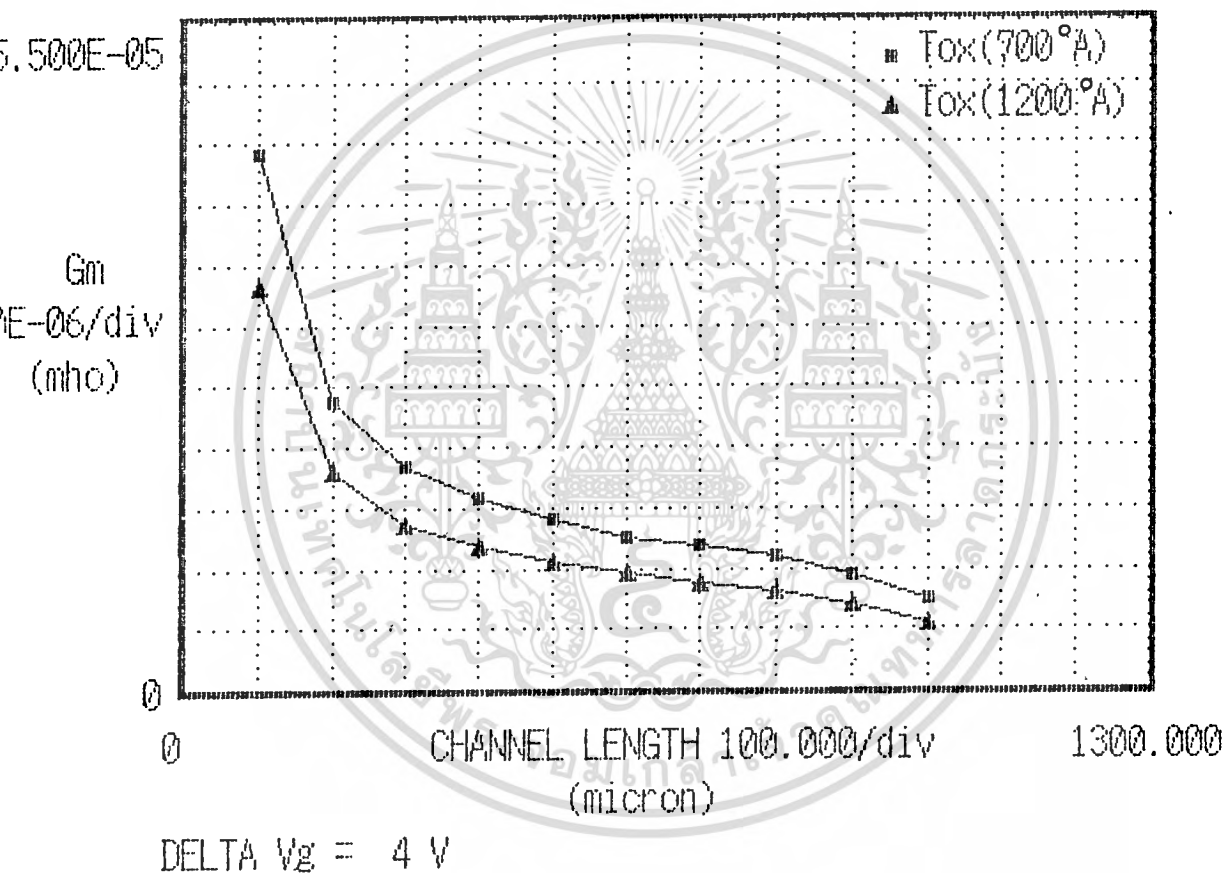
5.4 สรุปผลการทดลอง

จากหัวข้อการทดลอง 5.3.1 และ 5.3.2 เราสามารถสร้าง VCR ให้มีค่าความต้านทาน อยู่ในช่วง  $20 \text{ k}\Omega - 1 \text{ M}\Omega$  ไค้ โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่เกต  $V_G$  ถ้าให้  $V_G$  มีค่าสูง มอส เฟตนำกระแสไค้มาก ค่า  $R_{sd}$  ก็มีค่าน้อย และเมื่อให้  $V_G$  ต่ำ ๆ มอสเฟตนำกระแสไค้น้อย ค่า  $R_{sd}$  จึงมีค่ามากขึ้น นอกจากการควบคุมแรงดันของ VCR แล้วการกำหนดให้ VCR มีค่าตามต้องการ นั้น ถ้าปรับ  $V_G$  อย่างเดียวอาจจะลำบากในการควบคุมเราตอ้กำหนดโดยสร้างให้มีความต้านทาน อยู่ในช่วงพอเหมาะเสียก่อนไค้จะควบคุมไค้ได้ง่าย การออกแบบ VCR ให้มีความต้านทานอยู่ในช่วง  $\Omega$   $\text{k}\Omega$  และ  $\text{M}\Omega$  แสดงไค้ดังในรูปที่ 5.14 , 5.15 , 5.16 ตามลำดับ โดยมีค่าพารามิเตอร์แตก ต่างกัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่กำหนดไค้ตอ้ดูความเหมาะสมด้วย เช่น

1. ค่าความยาวแชนแนล ( $L$ ) ควรมีค่าประมาณ  $20 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$   
ถ้าให้  $L$  สั้นไปไค้จะเกิดผลของ Short channel effect ไค้จะกล่าวไค้ในตอนที่ 7  
ถ้า  $L$  มากไปไค้เปลืองเนื้อที่ในการสร้าง จึงควรหันมากำหนดพารามิเตอร์อื่นแทน
2. ความกว้างแชนแนล ( $W$ ) ควรมีค่าประมาณ  $20 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$

# DATA PLOTTER

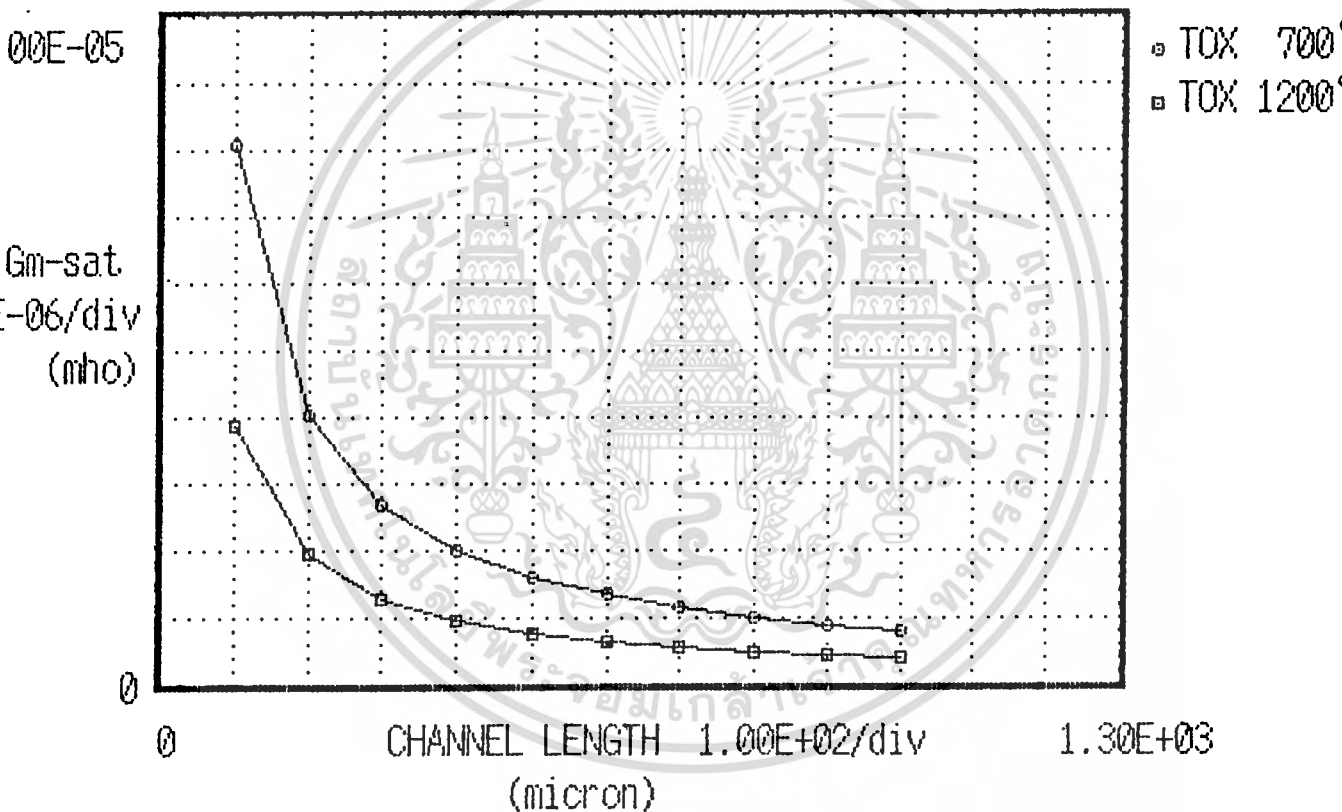
## G<sub>m</sub>-CHANNEL LENGTH RELATION



รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่งผ่านความนำไฟฟ้า ( $g_m$ ) กับความยาว  
แชนแนล (L)

### DATA PLOTTER (P-ch)

### G<sub>m</sub>-Channel Length RELATION



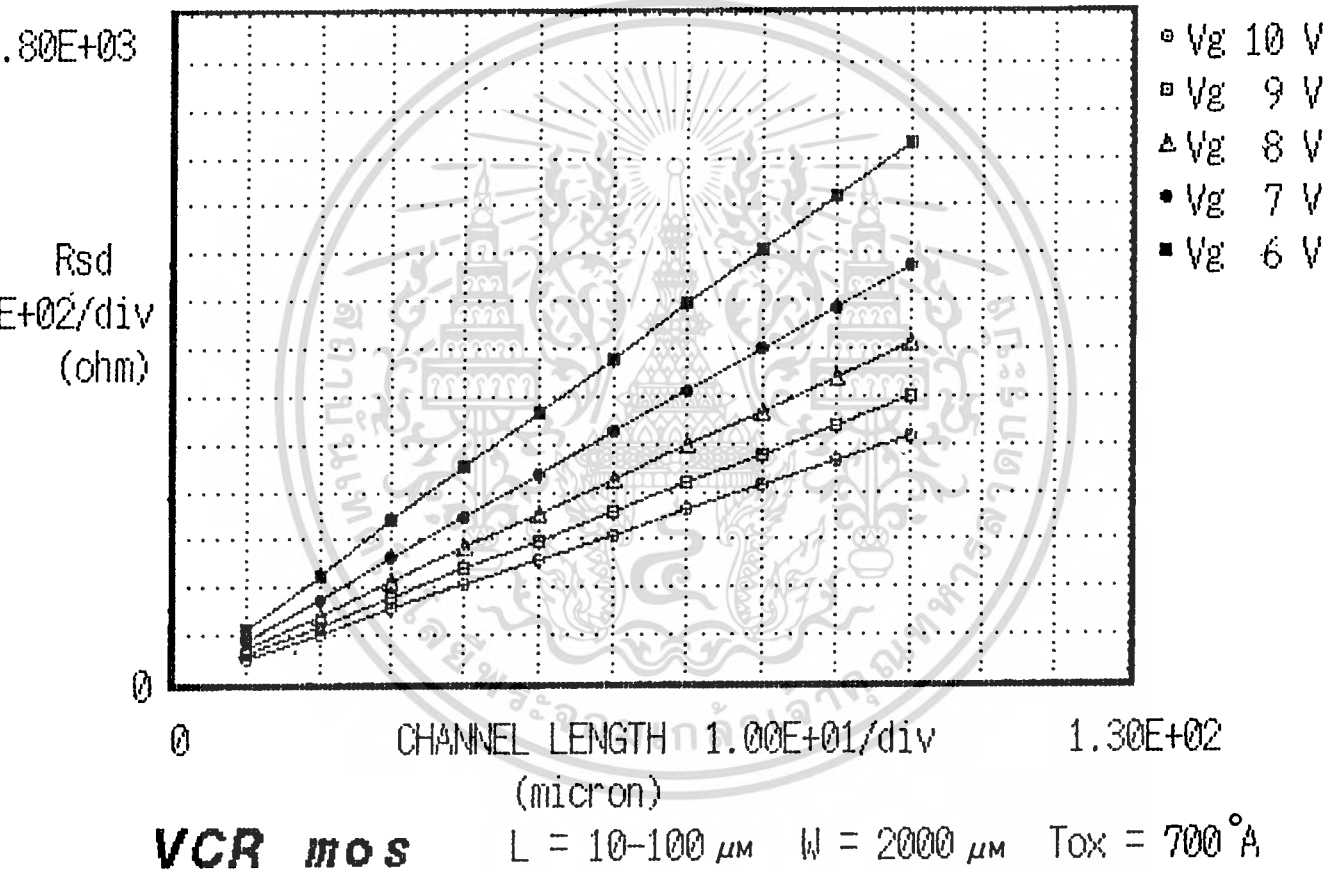
**VCR mos** L = 100-1000 μm W = 100 μm V<sub>g</sub> = 10 V

รูปที่ 5.13 กราฟผลการคำนวณค่าส่งผ่านความนำไฟฟ้า (g<sub>m</sub>) ที่ขึ้นกับ ความยาวแชนแนล (L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER (P-ch)

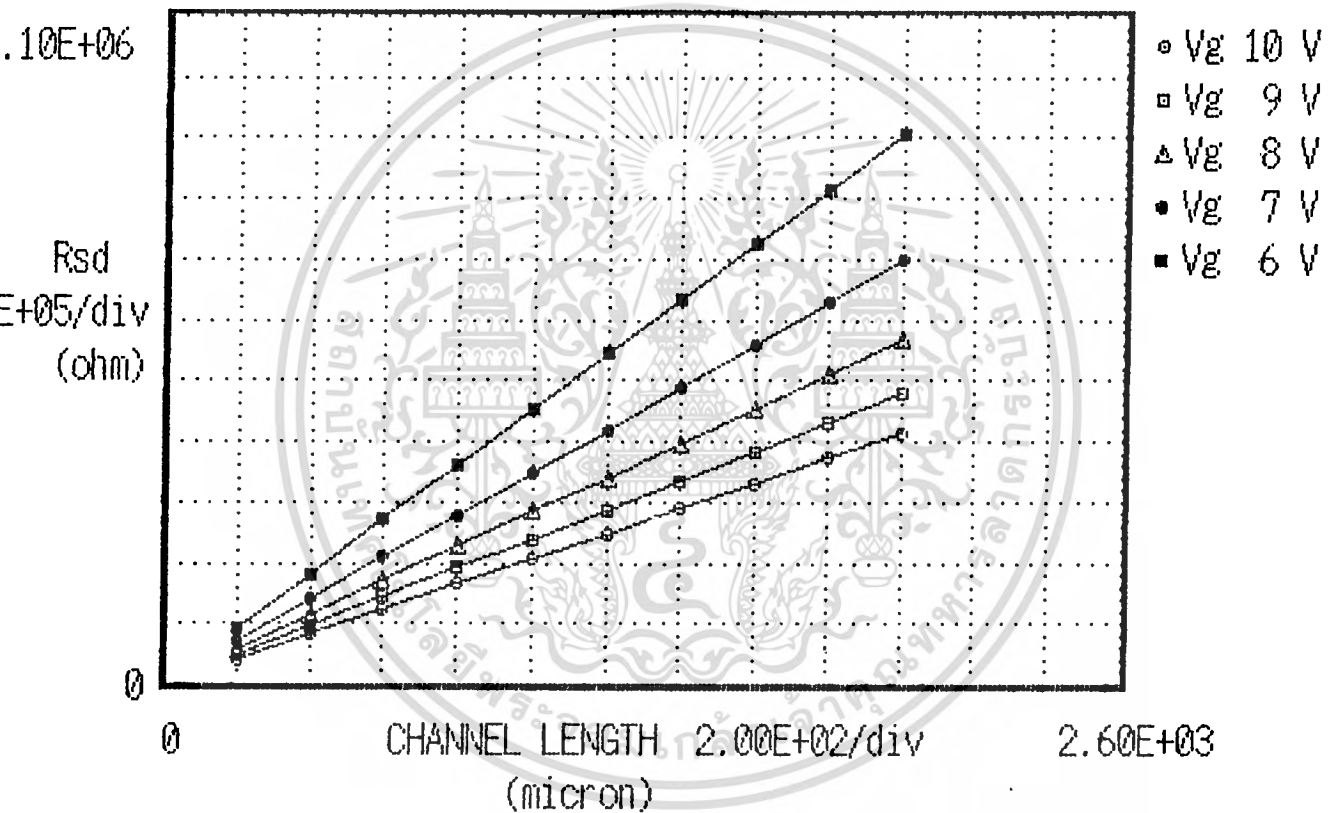
## Rsd=Channel Length RELATION



รูปที่ 5.14 กราฟผลการคำนวณออกแบบ vcr ใหม่ที่ค่าความต้านทานอยู่ในช่วง โทห์ม 100 Ω ประมาณ 2.2 kΩ

# DATA PLOTTER (P-ch)

## Rsd=Channel Length RELATION

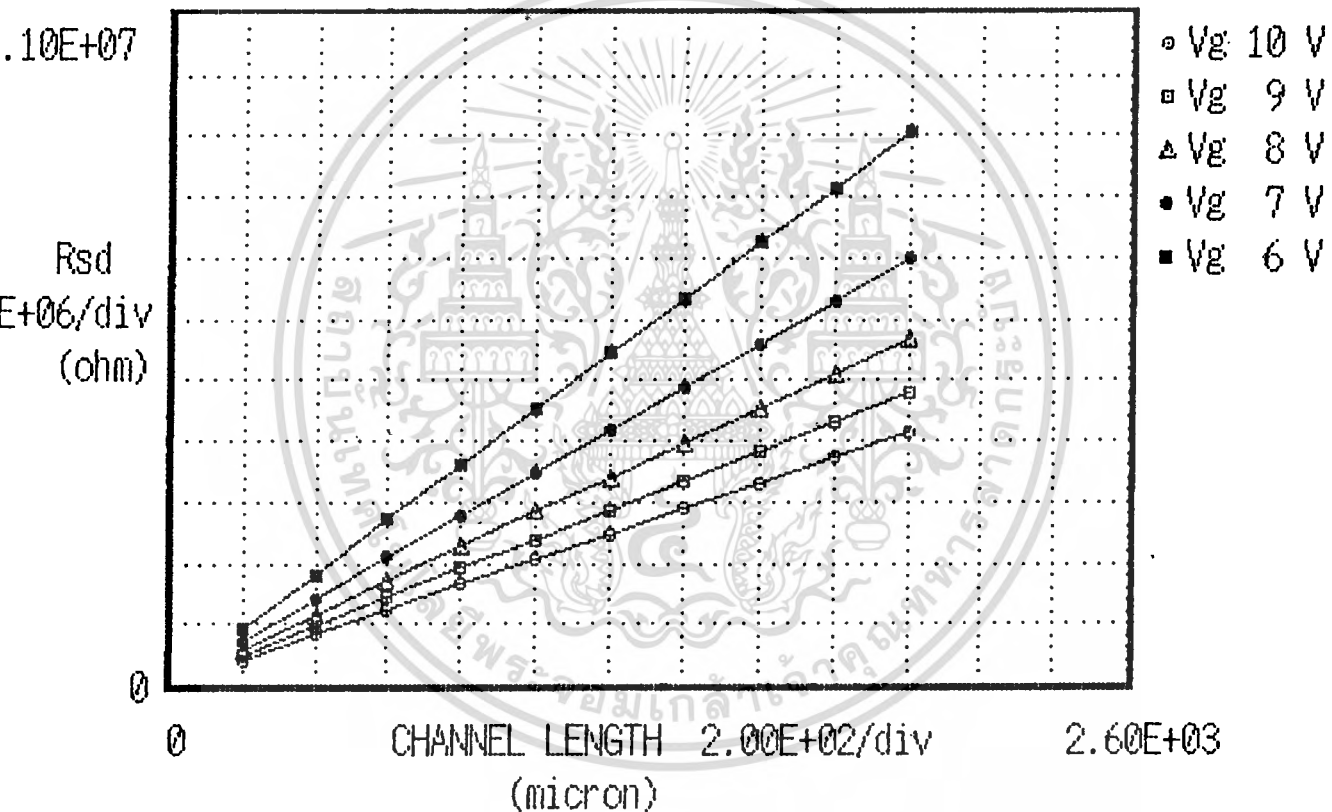


**VCR mos**      L = 200-2000  $\mu\text{m}$     W = 100  $\mu\text{m}$     Tox = 700  $\text{\AA}$

รูปที่ 5.15 กราฟผลการคำนวณออกแอม vcr ให้มีค่าความต้านทานอยู่ในช่วง  
กิโลโอห์ม (k $\Omega$ )    ประมาณ 20 k $\Omega$  - 900 k $\Omega$

### DATA PLOTTER (P-ch)

### Rsd=Channel Length RELATION



**VCR mos**       $L = 200-2000 \mu m$      $W = 10 \mu m$      $Tox = 700 \text{ \AA}$

รูปที่ 5.16 กราฟผลการคำนวณออกแบบ vcr ให้มีค่าความต้านทานอยู่ในช่วง  
 เมกกะโหลม (มอ) ประมาณ 400 kอ - 9 มอ

ถ้า  $w$  น้อยไปก็จะเป็นผลของ Narrow channel effect ก็จะทำให้  $\mu$  ที่ 8  
 ถ้า  $w$  มากไปก็จะเป็นผลของ  $\mu$  ที่ 8

3. ความหนาของชั้นออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) ควรมีในช่วงค่าประมาณ  $500\text{ \AA}$  ถึง  $1500\text{ \AA}$   
 ถ้าสร้าง  $T_{ox}$  บางเกินไปก็จะเป็นผลทำให้เกตทะลุได้ง่าย  
 ถ้าสร้าง  $T_{ox}$  หนามากเกินไป ต้องใช้แรงดันไบอัส  $V_G$  มีค่าสูง และการสร้าง  
 $T_{ox}$  หนา ต้องใช้เวลาในการสร้างนานทำให้สารเจือที่แพร่เข้าไปในเนื้อซิลิกอน  
 มีการแพร่กระจายออกไปอีก ซึ่งทำให้เกิดการแพร่กระจายออกไปทางด้านข้าง  
 (Side diffusion) เป็นผลทำให้ Short channel effect เกิดได้ง่ายขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{sd}$  กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

$$R_{sd} \propto \frac{L \cdot T_{ox}}{W \cdot V_G}$$

ความต้องการในการสร้างมอสเฟตให้ทำงานเป็น VCR นั้น คุณสมบัติของมอสเฟตที่จำเป็นอีกประการหนึ่ง  
 คือ การสร้างให้ช่วง Triode มีบริเวณกว้าง นั่นคือจุด  $V_T$  (Pinch-off voltage) ควรมีค่ามาก ๆ

$$V_P = V_G - V_T$$

$$V_T \propto \frac{T_{ox}}{W}$$

จะเห็นว่า  $V_T$  ต้องมีค่าน้อย ๆ ดังนั้นจึงต้องสร้างให้มีความหนาออกไซด์บาง ๆ แต่เมื่อพิจารณา  
 ค่า  $g_m$  ซึ่งส่งนำไปพิจารณาเกี่ยวกับความเร็ว ความถี่ และอัตราขยายด้วยพบว่ามีสัมพันธ์กับ  
 พารามิเตอร์ดังนี้

$$g_m \propto \frac{W}{L \cdot T_{ox}}$$

โดยที่ ากสมการ (2.29)

$$f_o = \frac{g_m}{2\pi C_G}$$

ดังนั้นการสร้าง VCR โดยกำหนดพารามิเตอร์ทางโครงสร้างที่เหมาะสมต่อค่า  $g_m$  ภาย



บทที่ 6

การสร้างวงจรรวมชิ้นพื้นฐาน (Basic Integrated Circuit)

6.1 วัตถุประสงค์

การนำมอสเฟตไปประยุกต์ใช้งาน ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทวงจรรวม (IC) มากกว่า เพราะมอสเฟตนั้นมีข้อดี คือ โครงสร้างมีขั้นตอนการสร้างแบบง่าย ๆ ใช้พื้นที่ต่อคิวซ์ 1 คิว น้อยมาก กำลังการสูญเสียต่ำ ฯลฯ และสำหรับวงจรรวมพื้นฐานของวงจรรวมที่นำมาเสนอนี้ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำงาน คือ ทำหน้าที่กลับสัญญาณอินพุต เช่น เมื่ออินพุตเป็น 1 เอาท์พุตจะเป็น 0 และเมื่ออินพุตเป็น 0 เอาท์พุตจะเป็น 1 โครงสร้างของมอสอินเวอร์เตอร์นี้มีหลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ที่ไวซ์ตัวกลางจะเป็นโหลด (load) และที่ไวซ์ตัวล่างจะเป็นตัวขับ (driver)

โหลดของมอสอินเวอร์เตอร์แบบที่แชนแนล มักเป็นตัวต้านทานหรือพวกมอสเฟต ที่ไบอัสให้ทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturate) หรือช่วงเชิงเส้น (Linear) ส่วนมอสตัวขับนั้นเป็นแบบที่แชนแนลเอ็นชันชันเมนต์โหมค คุณสมบัติการทำงานของมอสอินเวอร์เตอร์ แต่ละแบบจะแตกต่างกันในด้าน อัตราเร็วในการสวิช และอัตราการสูญเสียกำลังงาน

ไม่ว่าจะได้ออกแบบสร้างมอสอินเวอร์เตอร์ โดยใช้มอสเฟตที่มีโครงสร้างทางเรขาคณิตขนาดใหญ่มาก ๆ เพื่อต้องการลดผลของโครงสร้าง ที่ไวซ์ที่มีขนาดเล็ก (Small Geometry Effect) ดังสรุปตอนท้ายของบทที่ 4 โดยทำการสร้างมอสอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่แตกต่างกันของลักษณะการส่งผ่านสัญญาณ (Transfer characteristic) รวมทั้งการตอบสนองทรานเซียนท์ (Transient response) ซึ่งมีผลต่อซีลจำกัดความถี่ (Frequency limiting) และอัตราเร็วในการสวิช (Switching speed)

คุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของมอสอินเวอร์เตอร์ จะขึ้นอยู่กับแบบของมอสเฟตที่ใช้ประกอบกัน และลักษณะการให้ไบอัส เพื่อให้มีจุดทำงานต่างกัน<sup>[4]</sup> ซึ่งจะกล่าวเฉพาะแบบที่แชนแนลเอ็นชันชันเมนต์ โหมค เท่านั้น โดยคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเบต้า (Beta ratio):  $\beta_r$  โดยที่

$$\beta_r = \frac{\beta_D}{\beta_L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\beta_D$  คือ  $\beta$  ของมอสเฟตตัว driver

$\beta_L$  คือ  $\beta$  ของมอสเฟตตัว Load

$$\beta = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{OX} \epsilon_O}{T_{OX}} \frac{W}{L} \quad (6.1)$$

จากสมการที่ (2.26)  $g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_G} \Big|_{V_D \text{ คงที่}}$

สมการที่ (2.27)  $g_m = \beta |V_D|$

สมการที่ (2.28)  $g_{m \text{ sat}} = \beta |V_G - V_T|$

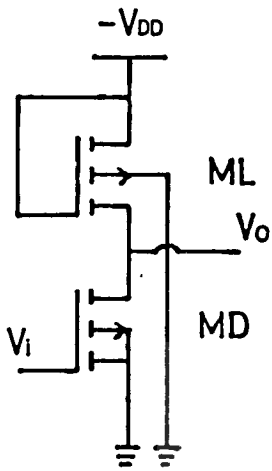
∴  $\beta_r = \frac{g_{mD}}{g_{mL}}$

ค่าอัตราส่วนเบต้า ( $\beta_r$ ) นี้ ตามค่าสูง อัตราการส่งผ่านสัญญาณจะเร็วขึ้นดูรูปที่ 6.2 จากสมการที่ (6.1) จะพบว่าค่า  $\beta$  ขึ้นกับ  $W/L$  ดังนั้นอัตรา  $W/L$  จะมีผลต่อการส่งผ่านสัญญาณ นอกจากอัตราส่วนเบต้าแล้วความต้านทานของโหนดก็มีผลต่อคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณด้วย ถ้าโหนดเป็นมอสเฟต ความต้านทานของโหนด คือความต้านทานของแซนแนล

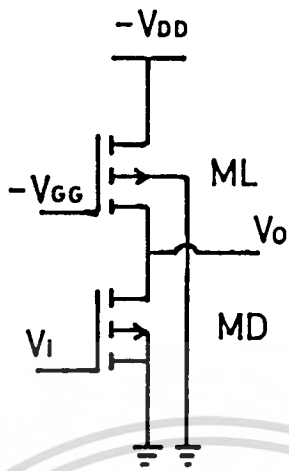
$$R_{sd} = \frac{1}{g_{sd}}$$

จากสมการที่ (2.19)  $g_{sd} = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_D} \Big|_{V_G \text{ คงที่}}$

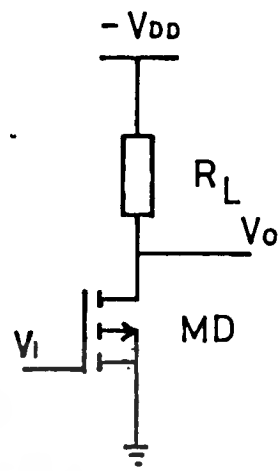
สมการที่ (2.21)  $g_{sd} = \beta |V_G - V_T - V_D|$



6.1 ก) แบบ PELS

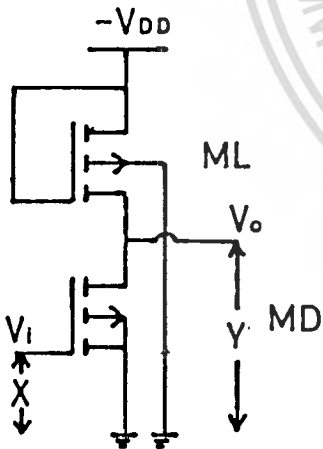


6.1 ข) แบบ PELT

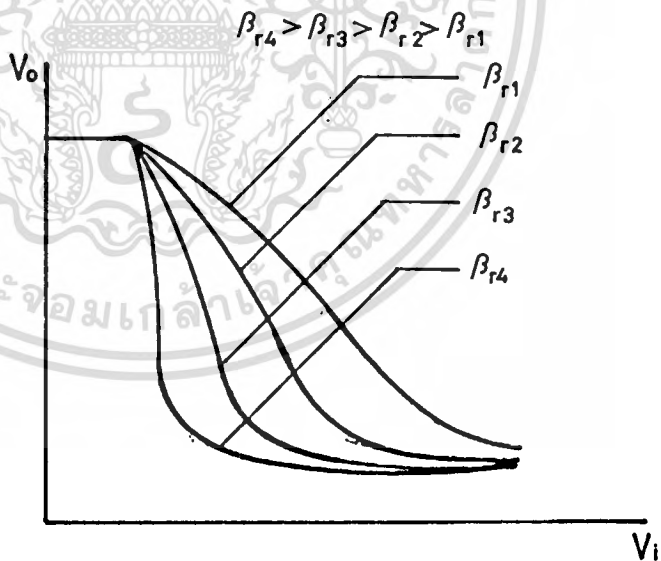


6.1 ค) แบบ PELR

รูปที่ 6.1 โครงสร้างมอสอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ



6.2 ก) วงจรที่ใช้วัด



6.2 ข) ผลที่ได้จากการวัด

รูปที่ 6.2 วงจรทดลองวัดหาค่าคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของ

PELS Inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.22)

$$g_{sd \text{ sat}} = \frac{I_{DSS} k_s}{2L [1 - (\Delta L/L)^2 (V_D - V_{D \text{ sat}})]^2}$$

ถ้าโหลดมีค่าความต้านทานสูง ( $R_{sd}$  มีค่าสูง) นั่นคือ  $g_{sd}$  มีค่าน้อย สภาพการส่งผ่านสัญญาณจะดีขึ้น คุณสมบัติการตอบสนองสัญญาณทรานเซียนต์ ช่วงทรานเซียนต์คือค่าเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณเอาต์พุต เช่น 1 เป็น 0 หรือ 0 เป็น 1 กรณีนี้เมื่อสัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 นั่นคือเวลา  $T_r$  (rise time) และช่วงเวลาที่เอาต์พุตเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 นั่นคือเวลา  $T_f$  (fall Time) ค่า  $T_r$  และ  $T_f$  จะขึ้นอยู่กับ Load Capacitance ( $C_L$ ) ที่เอาต์พุตด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6.3  $C_L$  จะถูกชาร์ทด้วยค่าเวลาคงที่  $T_r$  ซึ่งขึ้นกับมอสโพลดและ  $C_L$  จะถูกดิสชาร์ทด้วยค่าเวลาคงที่  $T_f$  ซึ่งจะขึ้นกับมอสต์วัชบี

นอกจากเวลาเหล่านี้แล้วยังคิดเวลาที่หน่วงไปในการส่งผ่านสัญญาณ (Propagational delay Time) ค่านี้จะวัดที่ระดับ 50% ของแรงดันอินพุตสูงสุด ( $V_i$ ) กับ 50% ของแรงดันเอาต์พุตสูงสุด ( $V_o$ )

ถ้าวัดที่ 50% ในช่วง  $T_r$  จะใช้สัญลักษณ์  $T_{pd+}$

ถ้าวัดที่ 50% ในช่วง  $T_f$  จะใช้สัญลักษณ์  $T_{pd-}$

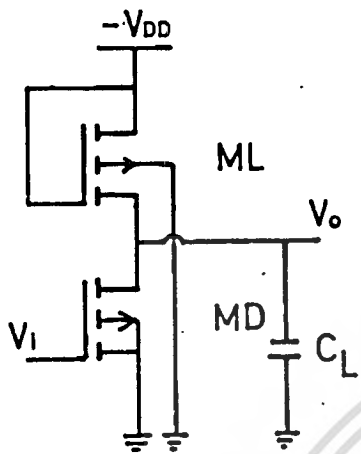
$T_{pd+}$  จะขึ้นกับมอสโพลด และ  $T_{pd-}$  จะขึ้นกับมอสต์วัชบี ( $T_r$  หรือ  $T_f$ ) สามารถไปคำนวณหา ซึ่งจำกัดความถี่ ( $f_g$ ) ได้ตามสมการดังนี้

$$f_g = \frac{0.35}{T} = \text{Hz}$$

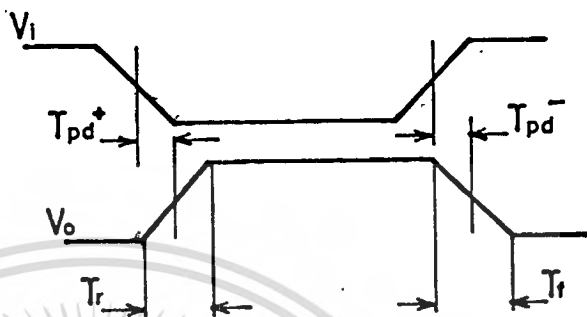
$T = T_r$  เมื่อเป็นค่า  $f_g$  ของมอสโพลด

$T = T_f$  เมื่อเป็นค่า  $f_g$  ของมอสต์วัชบี

ค่า  $f_g$  นี้จะขึ้นอยู่กับ  $C_L$  ด้วย ถ้า  $C_L$  ในวงจรมีค่ามาก  $f_g$  ก็จะมีค่าลดลง



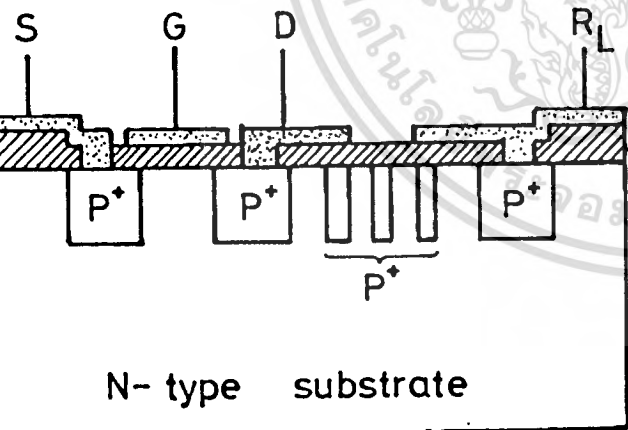
ก) วงจรการทดลอง



ข) ผลการทดลองการตอบสนองทรานเซียนท์

รูปที่ 6.3 วงจรการทดลองวัดการตอบสนองทรานเซียนท์

PELS Inverter



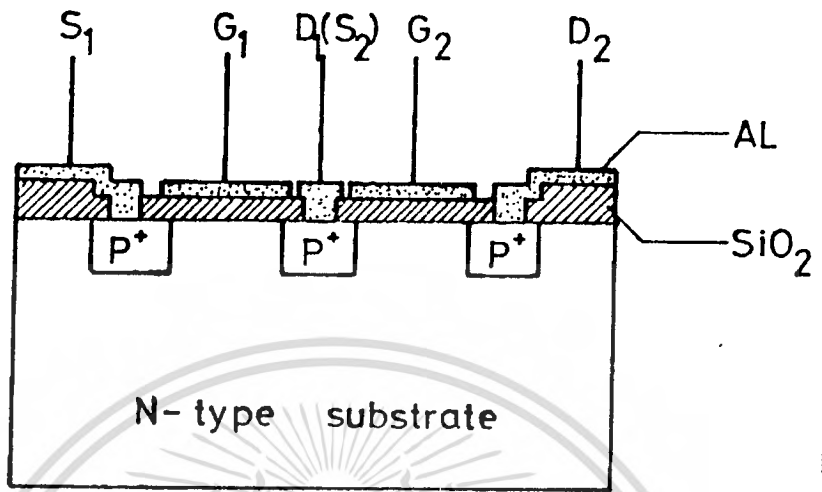
ก) ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้าง



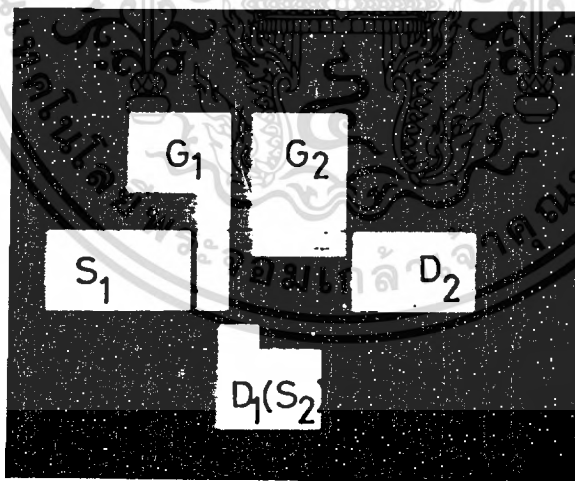
ข) ภาพถ่ายทางคาบมบน

รูปที่ 6.4 มอสอินเวอร์เตอร์แบบรีซิสเตอร์โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้าง



ภาพถ่ายทางค่านบน

รูปที่ 6.5 มอสอินเวอร์เตอร์แบบมอสโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบมอสอินเวอร์เตอร์ แบบพีแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (PMOS) เพื่อศึกษา  
 วงจรรวมขั้นพื้นฐาน ได้ออกแบบให้มีโครงสร้างต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 6.4 ซึ่งเป็นแอมป์ซิสเตอร์  
 โทลด์ และรูปที่ 6.5 ซึ่งเป็นแอมป์ซิสเตอร์ โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง  
 ที่ 6.1 ทำการตัดต้นแบบบนแผ่น peel coat แล้วฉายยอส่วน 50 ไมครอน พิมพ์ลวดวงจร ใช้ขั้นตอน  
 การสร้างในครั้งที่ 3 นำดีไวซ์ที่สร้างได้ไปทดลองวัดหาข้อมูล

## 6.3 การทดลองและผลการทดลอง

6.3.1 การวัดผลการทดลองการส่งผ่านสัญญาณของมอสอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถแยก  
 พิจารณาได้ดังนี้

6.3.1.1 มอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELS (P-channel Enhancement Mode Load Saturation region)

มอสตัวขับและมอสโหลดเป็นแบบพีแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ไบอัสให้  
 โทลด์มีจุดทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation region) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ก ทำการทดลองวัดโดย  
 วัดที่ค่าอัตราส่วนเบต้า ( $\beta_r$ ) ต่าง ๆ กันคือ 5, 10, 20, และ 40  $\mu_{PS} C_o$  ส่วนค่าเบต้าของโหลด  
 ( $\beta_r$ ) เป็น 0.5  $\mu_{PS} C_o$

### ผลการทดลอง

ผลการทดลอง แสดงได้ดังในรูปที่ 6.6 จะพบว่ามอสอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าอัตราส่วนเบต้า  
 มากกว่าจะสามารถส่งผ่านสัญญาณได้ดีกว่า

6.3.1.2 มอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELT (P-ch Enhancement Mode Load Triode region)

มอสตัวขับและมอสโหลดเป็นแบบพีแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด โทลด์ถูกไบอัส  
 ให้ทำงานในช่วงเชิงเส้น (Linear) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ข ทำการทดลองโดยวัดที่ค่าอัตราส่วน  
 เบต้าต่าง ๆ กัน คือ 5, 10, 20 และ 40  $\mu_{PS} C_o$  มีค่าเบต้าของมอสโหลดเท่ากับ 0.5  $\mu_{PS} C_o$

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 6.7 จะพบว่ามอสอินเวอร์เตอร์ที่ค่าอัตราส่วนเบต้ามากกว่าจะสามารถส่งผ่านสัญญาณได้ดีกว่าเช่นเดียวกัน

6.3.1.3 มอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELR (P-ch Enhancement Mode Load Resistor)

มอสตัวขับ เป็นแบบพีแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ส่วนโหลดเป็นดีควมต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ค ทำการทดลองวัดโดยวัดที่ค่าเบต้าของมอสตัวขับค่าต่าง ๆ กันคือ 2.5, 5, 10 และ 20  $\mu_{PSO}$  กำหนดให้โหลดมีค่าความต้านทาน 100 k $\Omega$  จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีก แต่ความต้านทานโหลดเป็น 24 k $\Omega$ , 50 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$  และ 200 k $\Omega$  ตามลำดับโดยมีค่า  $\beta_D$  ของมอสตัวขับ เป็น 10  $\mu_{PSO}$

ผลการทดลอง

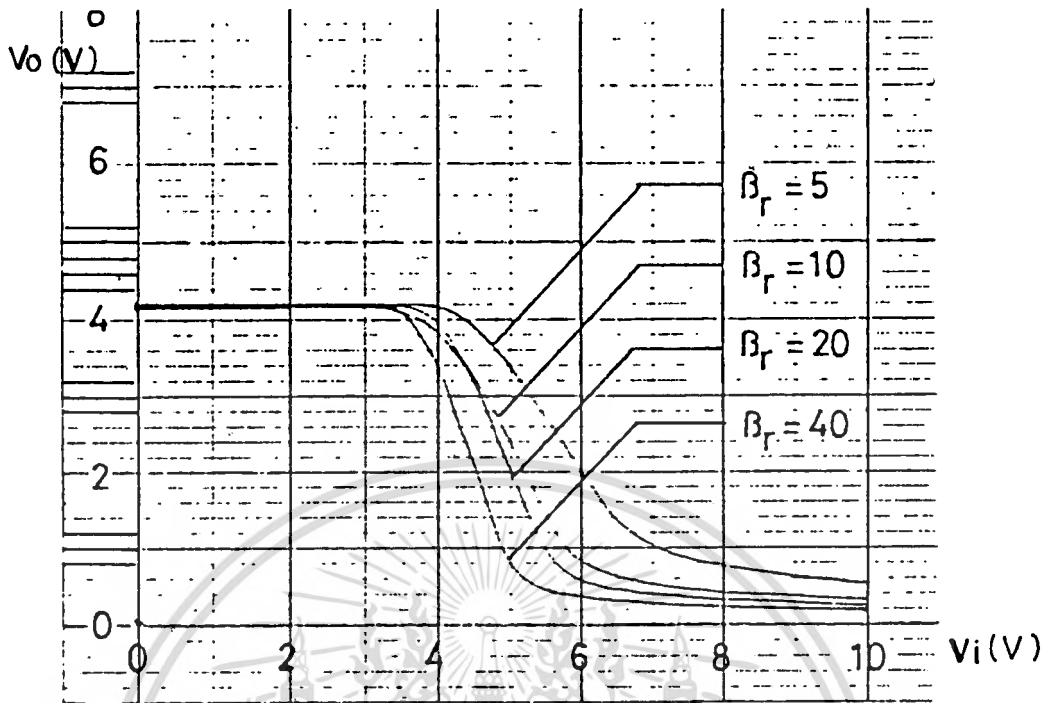
ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 6.8 และรูปที่ 6.9 จากรูปจะพบว่ามอสอินเวอร์เตอร์ที่มีค่า  $\beta_D$  ของมอสตัวขับมากกว่าจะมีการส่งผ่านสัญญาณได้ดีกว่า มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณเอาต์พุตได้เร็วกว่า และที่ค่า  $\beta_D$  ที่เท่ากันและค่าความต้านทานของโหลดที่มีค่ามากกว่าจะสามารถส่งผ่านสัญญาณได้ดีกว่า

6.3.1.4 การเปรียบเทียบการส่งผ่านสัญญาณระหว่างมอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELS/PELT/PELR

ทำการทดลองวัดคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของมอสอินเวอร์เตอร์แบบพีแชนแนล เอ็นฮานซ์-เมนต์ โหมดแบบต่าง ๆ โดยกำหนดค่าเบต้าของมอสตัวขับให้เท่ากันคือ 10  $\mu_{PSO}$  และค่าเบต้าของมอสโหลดแบบ PELS และ PELT มีค่าเบต้าของมอสโหลดเป็น 0.5  $\mu_{PSO}$  ส่วนแบบ PELR มีค่าความต้านทานโหลด 50 k $\Omega$

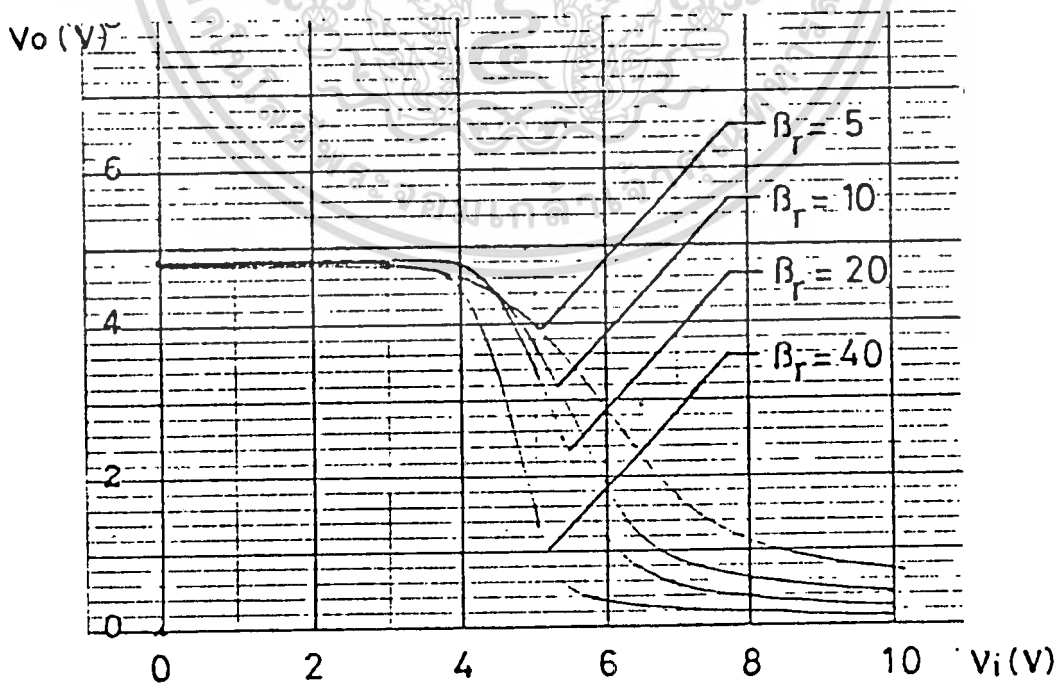
ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 6.10 จะพบว่าอัตราการส่งผ่านสัญญาณของมอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELS จะเร็วที่สุด และเมื่อวัดค่าคอนคัตแดนที่ระหว่าง ซอส-เทรน ( $g_{sd}$ ) ของมอสโหลด ในการไบอัสให้มอสโหลดมีจุดทำงานในช่วงเชิงเส้น ( $V_{GG} = 12V, V_{DD} = 5V$ ) ได้



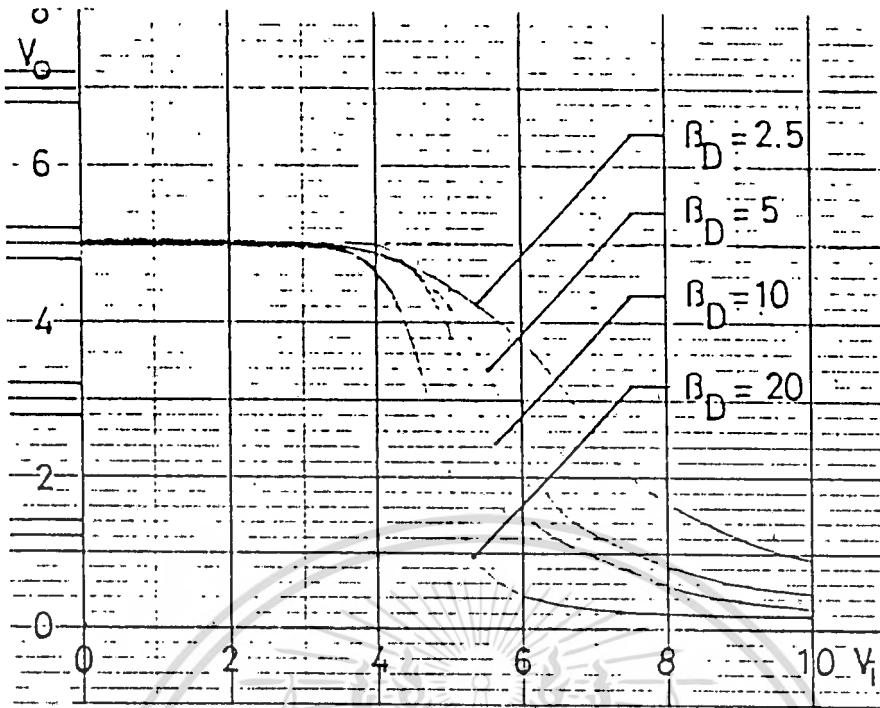
รูปที่ 6.6 คุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของมอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELS

$V_{GG} = V_{DD} = 10V$  ; Ver. = 1V/Div ; Hor. = 1V/Div



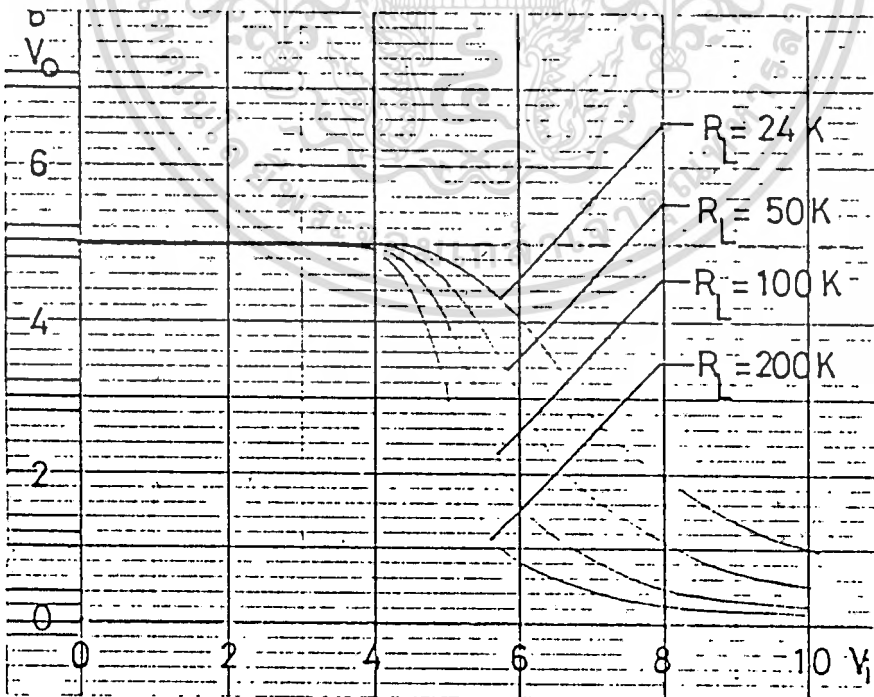
รูปที่ 6.7 คุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของมอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 $V_{GG} = 12V$   $V_{DD} = 5V$  ; Ver. = 1V/Div ; Hor. = 1V/Div



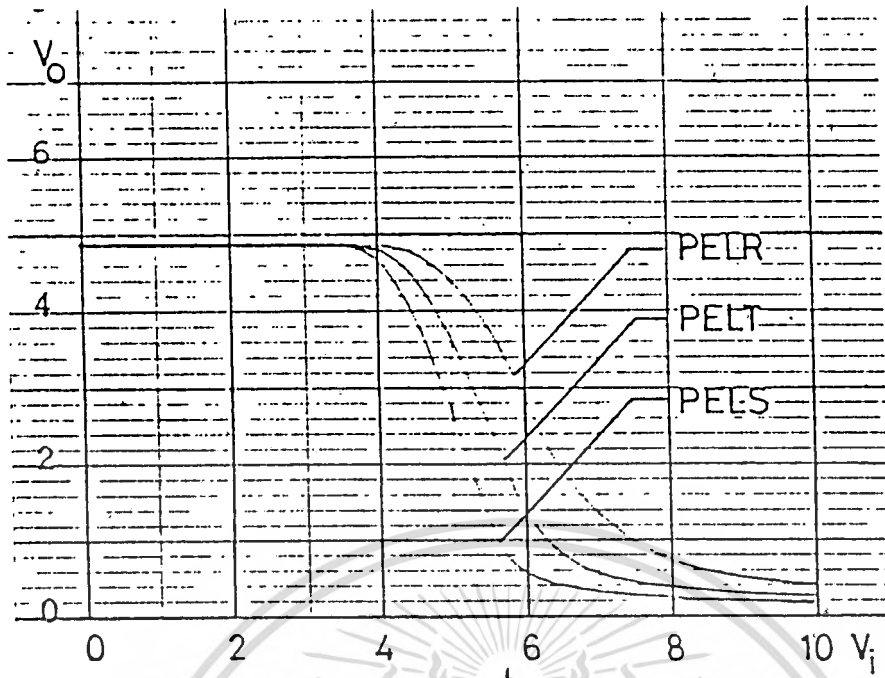
รูปที่ 6.8 คุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของมอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELR

$V_{DD} = 5 \text{ V}$  ;  $R_L = 100 \text{ k}\Omega$  ; Ver = 1 V/Div ; Hor = 1 V/Div



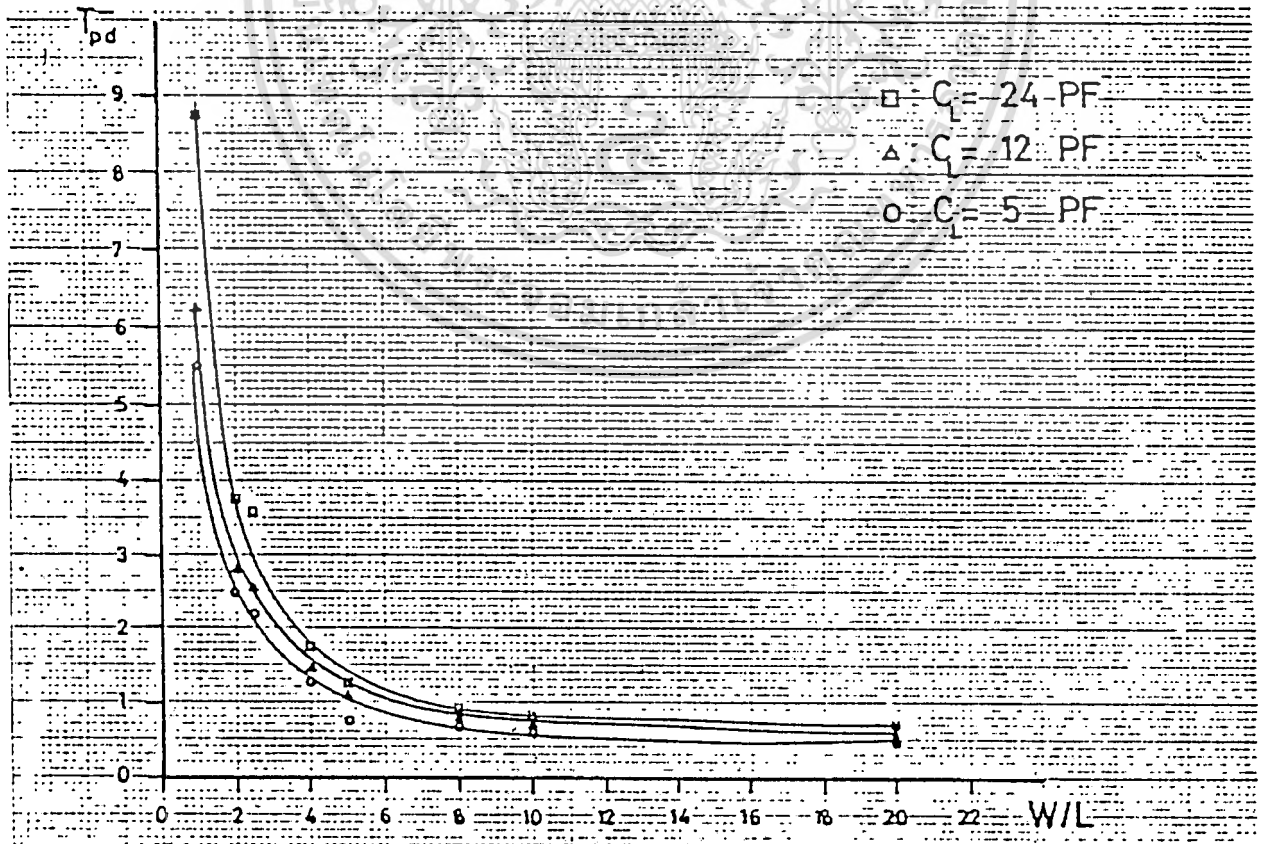
รูปที่ 6.9 คุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของมอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELR

$V_{DD} = -5 \text{ V}$  ;  $\beta_D = 10$  ;  $I_{PSO}$  ; Ver = 1 V/Div ; Hor = 1 V/Div



รูปที่ 6.10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณระหว่างมอสอินเวอร์เตอร์แบบ

PELS/PELT/PELR; Ver = 1 V/Div ; Hor = 1 V/Div



รูปที่ 6.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_{pd}$  กับ  $w/L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับครูโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ข้อมูลที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $g_{sd} = 2 \mu\text{v}$  เมื่อไบอัสให้มอสโพลกมีคทำงานในช่วงอิมิตัว ( $v_{GG} = v_{DD} = 10\text{v}$ )  
 จะมีค่า  $g_{sd} = 0.2 \mu\text{v}$  จะเห็นว่าค่าคอนคักแทนทีในช่วงอิมิตัวนี้มีค่าน้อยกว่าในช่วงเชิงเส้น ซึ่ง  
 จากผลการทดลองวัดอัตราการส่งผ่านสัญญาณในหัวข้อที่ 6.3.1.3 รูปที่ 6.9 พบว่ามอสอินเวอร์เตอร์  
 ที่มีค่าความต้านทานโพลสูงกว่า สามารถส่งผ่านสัญญาณได้เร็วกว่า ค่า  $g_{sd}$  ก็คือส่วนกลับของค่า  
 ความต้านทานคั้งนั้น มอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELS ซึ่งมีค่าความต้านทานโพลมากที่สุด ( $\frac{1}{0.2\mu\text{v}} = 5\text{M}\Omega$ )  
 จึงส่งผ่านสัญญาณได้เร็วที่สุด

### 6.3.2 การวัดผลการทดลองการตอบสนองทรานเซียนท์ (Transient response)

#### 6.3.2.1 มอสอินเวอร์เตอร์แบบ PELS

ตัวอย่างการทดลองตามรูปที่ 6.3 โดยมอสตัวขับและมอสโพลเป็นแบบ  
 พีแชนแนล เอ็นชานซ์เมนต์โหมดไบอัสให้มอสโพลกทำงานในช่วงอิมิตัว ที่เอาท์พุทอยู่กับโพล ซึ่งเป็น  
 ตัวเก็บประจุ ( $C_L$ ) มีขนาดความจุ 5 PF วัดค่า  $T_{pd}$  โดยวัดที่อัตราส่วน w/L ของมอสตัวขับที่มี  
 ค่าเป็น 1, 2, 2.5, 4, 5, 8, 10, และ 20 จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยใช้  $C_L$  เป็น 12 PF  
 และ 24 PF ทำการวัด  $T_{pd}$  แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 6.11 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_{pd}$  กับ  
 w/L ของมอสตัวขับ ที่ w/L มีค่ามาก ๆ  $T_{pd}$  มีค่าน้อยแสดงว่าความเร็ว (Speed) ในการตอบ  
 สอนงสัญญาณเร็วขึ้น

#### 6.3.2.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองตอบสนองทรานเซียนท์ระหว่างมอสอิน เวอร์เตอร์แบบ PELS/PELT/PELR

ตัวอย่างการทดลองเช่นเดียวกับรูปที่ 6.3 ให้โพลคตัวเก็บประจุ ( $C_L$ )  
 มีขนาด 5 PF ค่า w/L ของมอสตัวขับมีค่าเป็น 10 วัดหาค่า  $T_F$

ผลการทดลอง

$$T_f \text{ ของ PELS} = 0.95 \mu\text{S} ; f_g = 368 \text{ KHz}$$

$$T_f \text{ ของ PELT} = 0.95 \mu\text{S} ; f_g = 368 \text{ KHz}$$

$$T_f \text{ ของ PELR} = 0.95 \mu\text{S} ; f_g = 368 \text{ KHz}$$

เปรียบเทียบค่า  $T_f$  ของมอสอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบ

จากผลการทดลองจะพบว่า ค่า  $T_f$  มีค่าเท่ากัน เพราะว่า  $T_f$  ขึ้นอยู่กับมอสต์วัชพ์เท่านั้น ไม่เกี่ยวกับ โหลด

6.4 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของการส่งผ่านสัญญาณ (Transfer characteristic) และการตอบสนองทรานเซียนท์ (Transient response) ในมอสอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงข้อดีข้อเสียของมอสอินเวอร์เตอร์ได้ โดยในการสร้างมอสอินเวอร์เตอร์นั้น ส่วนมอสโพลกมีการใช้ทั้งแบบ เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดและดีเฟลทชันทโหมด ส่วนมอสต์วัชพ์นั้นนิยมใช้แบบ เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด เพราะเกทและเดรนมีขั้วไฟฟ้าตรงกันจึงสะดวกแก่การให้ไบอัส

เมื่อให้มอสต์วัชพ์ เป็นพีเชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดเหมือนกัน แต่ให้ไบอัสมอสโพลกต่างกัน ปรากฏว่าถ้าไบอัสให้มอสโพลกทำงานในช่วงอิมพัลส์ จะมีค่าคอนคักแตนท์น้อยกว่าไบอัสให้ทำงานช่วงเชิงเส้น ซึ่งมอสอินเวอร์เตอร์ที่ โพลกควรมีค่าคอนคักแตนท์น้อย (ควมต้านทานสูง) และมอสอินเวอร์เตอร์แบบมอสโพลกมีข้อดีกว่าแบบ โพลกตัวควมต้านทาน คือใช้พื้นที่ในการสร้างน้อยกว่าหลายเท่าตัว เมื่อต้องการให้มีความต้านทานเท่ากัน ดังนั้นในมอสอินเวอร์เตอร์แบบพีเชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์ โหมดนี้แบบ PELS จึงเป็นแบบที่ดีที่สุด

บทที่ 7

ผลของขนาดความยาวแชนแนล (Channel length effect)

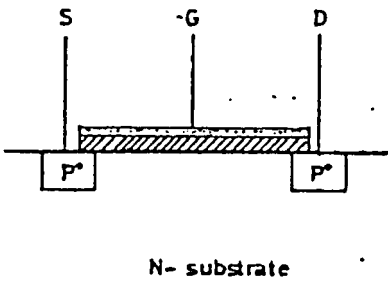
7.1 วัตถุประสงค์

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MOSFET แบบพีแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดที่เกี่ยวข้องกับกระแสเดรน ( $I_D$ ) และค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ซึ่งปกติจะขึ้นกับขนาดโครงสร้างทางเรขาคณิต โดยค่ากระแสเดรน จะขึ้นอยู่กับเทอม  $w/(L \cdot T_{ox})$  ในที่นี้  $w$  คือความกว้างของแชนแนล  $L$  คือ ความยาวของแชนแนล  $T_{ox}$  คือความหนาของชั้นเกทออกไซด์ แต่ปรากฏว่าที่ขนาดความยาวแชนแนลสั้นลงมาก ๆ ค่ากระแสเดรน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าที่คำนวณไว้มาก และแรงดันวิกฤติก็มีค่าลดลง ดังนั้นในบทที่ 7 นี้ จะเป็นการศึกษาผลของขนาดความยาวแชนแนลที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับ

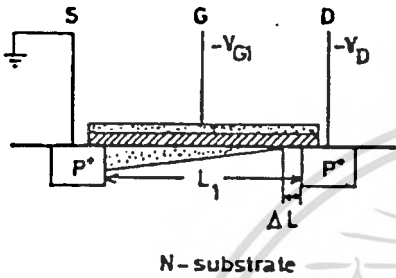
กระแสเดรน ( $I_D$ ) และแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ซึ่งผลนี้เกิดจากบริเวณปลดพาหะ (depletion region) ที่ด้านเดรนและซอสขยายกว้างออกมา เป็นผลทำให้ความยาวแชนแนลจริง ( $L_{eff}$ ) ลดลง ปรากฏการณ์ที่ความยาวแชนแนลลดลงเนื่องจากความกว้างของบริเวณปลดพาหะสามารถอธิบายได้ ดัง

รูปที่ 7.1 โดยในรูปที่ 7.1(ก) และ (ข) แสดงลักษณะภายในของ MOSFET ขณะที่ยังไม่ได้รับแรงดันไบอัสและขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตามลำดับ เมื่อ MOSFET ได้รับไบอัสแชนแนลจะถูกเหนี่ยวนำด้วยแรงดัน  $-V_{G1}$  ทำให้ทางด้านเดรนเกิดบริเวณปลดพาหะ มีขนาดความกว้าง  $\Delta L$  เพราะมีแรงดันย้อนกลับ (reverse bias) ระหว่างเดรนกับซบ์เทรท ( $V_{DS}$ ) ส่วนด้านซอสนั้นมีบริเวณปลดพาหะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับด้านเดรนเพราะแรงดันไฟฟ้าระหว่างซอสกับซบ์เทรทมีค่าเท่ากัน (ต่างก็เท่ากับ ground) แต่  $\Delta L$  นี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $L_1$  เพราะฉะนั้นความยาวของแชนแนลจึงยังคงมีค่าเกือบเท่าเดิม คือเท่ากับ  $L_1$  ( $L_{eff} = L_1$ ) แต่เมื่อเราออกแบบให้ความยาวแชนแนลมีค่าน้อย ๆ โดยเฉพาะเมื่อมีค่าใกล้เคียงกับความกว้างของบริเวณปลดพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 7.1 ง ถ้าความยาวแชนแนลที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่า  $L_{eff} = L_3 - \Delta L$

ดังนั้นที่ความยาวแชนแนล ( $L$ ) สั้นลงค่ากระแสเดรน ( $I_D$ ) จึงมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อค่าความยาวแชนแนล มีค่าสั้นมาก ๆ จนมีขนาดเข้าใกล้ขนาดความกว้างของบริเวณปลดพาหะที่รอยต่อของซอสกับซบ์เทรทและเดรนกับซบ์เทรท ค่ากระแสเดรนจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว มากกว่าที่คำนวณได้มาก ๆ



7.1 ก P-channel MOSFET

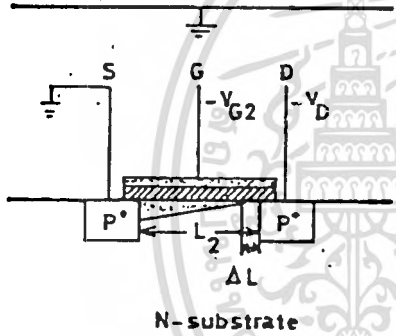


7.1 ข  $\Delta L =$  บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ  
ตรงกับ ขั้วเกต

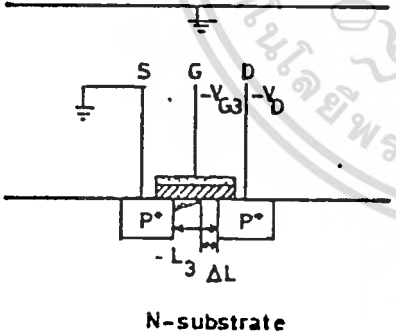
$$L_1 \gg \Delta L$$

$$L_{eff} = L_1 - \Delta L$$

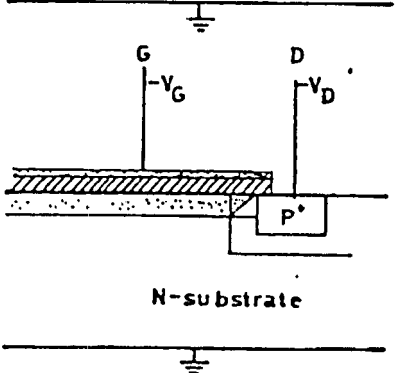
$$\approx L_1$$



7.1 ค  $L_2 < L_1$   
 $L_2 \gg \Delta L$   
 $L_{eff} = L_2 - \Delta L$   
 $\approx L_2 ; |V_{G2}| \leq |V_{G1}|$



7.1 ง  $L_3 < L_2 < L_1$   
 $L_3 > \Delta L$   
 $L_{eff} = L_3 - \Delta L ; |V_{G3}| < |V_{G2}| \leq |V_{G1}|$



7.1 จ บริเวณปลอดพาหะด้วยเทรกับขั้วเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
รูปที่ 7.1 แสดงผลของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ( $\Delta L$ ) ที่มีต่อความยาวแชนแนลจริง  
ไม่ว่ากรณีใดทางสั้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
( $L_{eff}$ )

ค่าความกว้างของบริเวณปลูกพาหะมีค่าประมาณ  $0.1-1.0 \mu m$  [22]  
เตรนค่าความกว้างของบริเวณปลูกพาหะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ขึ้นกับแรงดันไบอัสที่ขอสและ

$$x_d = \frac{\sqrt{2\epsilon_s \epsilon_o |2\phi_f|}}{qN_D} \quad (7.1)$$

เมื่อให้ไบอัสมอสเฟตดังรูปที่ 7.2

จะได้ค่าความกว้างของบริเวณปลูกพาหะที่รอยต่อขอสกับซับเตรท

$$y_s = \frac{\sqrt{2\epsilon_s \epsilon_o |V_{Bi} - 2\phi_f|}}{qN_D} \quad (7.2)$$

ความหนา-ซับเตรท

$$y_D = \frac{\sqrt{2\epsilon_s \epsilon_o |V_{Bi} - 2\phi_f + V_{DS}|}}{qN_D} \quad (7.3)$$

$V_{Bi}$  = Built in voltage

v.

$$= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{N_i^2}$$

$\phi_f$  = ความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานชั้นอินทรีนซิกกับระดับพลังงานเฟอร์มิ

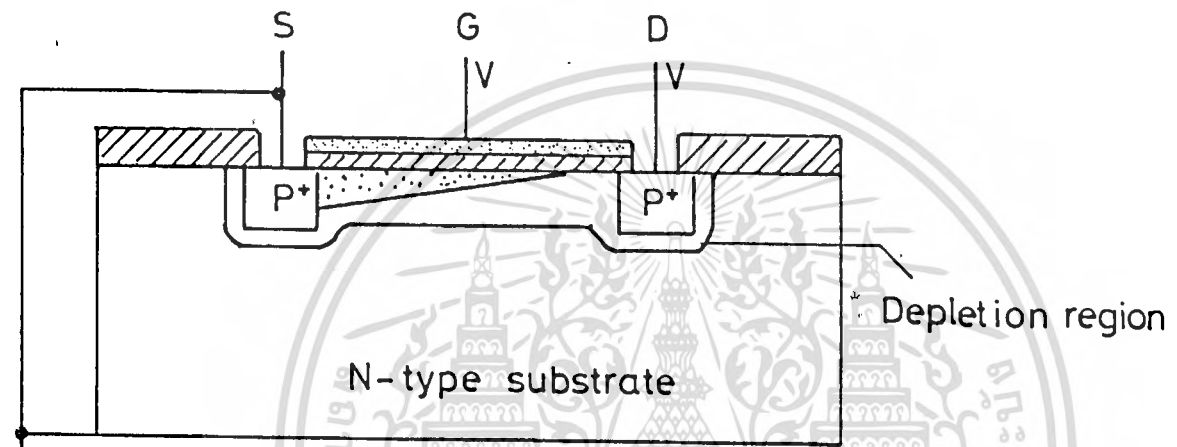
$$= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{N_i}$$

$$\cong -0.29 \text{ V ที่ } 300^\circ\text{K}$$

ดังนั้นความยาวแชนแนลที่เกิดขึ้นจริง (effective channel length :  $L_{eff}$ )

$$L_{eff} = L - y_s - y_D \quad \dots(7.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทำงานในช่วงอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการหาค่าแรงดันวิกฤติ

$$\text{จากสมการที่ (2.6)} \quad V_T = \phi_{MS} - Q_{ss} - \frac{Q_{ox}}{C_o} + \phi_s - \frac{Q_B}{C_o} + \Delta V_{DT}$$

$$\text{จากสมการที่ (2.16) ได้ } V_T \propto T_{ox}$$

ดังนั้นค่า  $V_T$  จะขึ้นอยู่กับความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) เท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับความยาวแชนแนลแต่อย่างใด แต่ที่ความยาวแชนแนลสั้นลงมาก ๆ จะมีผลต่อค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) โดยพิจารณาจากสมการที่ (2.1)

$$\text{จากสมการ (2.1)} \quad I_D = \frac{K W}{L_{eff}} \left[ (V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2} \right]$$

ขณะที่ความยาวแชนแนล ( $L_{eff}$ ) มีค่าลดลง กระแส  $I_D$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่  $L_{eff}$  คงที่เท่าเดิมค่ากระแส  $I_D$  เพิ่มขึ้นได้ เพราะฉะนั้นเทอม  $(V_G - V_T)$  ต้องเพิ่มขึ้น นั่นคือ  $V_T$  มีค่าลดลง

นอกจากผลของบริเวณปลายพาดที่ทำความยาวแชนแนลสั้นลงแล้ว ผลของขั้นตอนการสร้างแบบแพร์ด้วยความร้อนนี้ ทำให้สารเจือ (Impurity) ที่เคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อซิลิกอน จะเคลื่อนที่ลงไปพร้อมกับการแพร่กระจายออกทางด้านข้างด้วย (side-diffusion) [22] เราจะสามารถคำนวณค่า  $L$  ที่เกิดการแพร่ออกทางด้านข้างที่ทำให้ความยาวแชนแนลจริงลดลงได้

$$L_{eff} = L - \Delta L \tag{7.5}$$

ถ้า  $L_{eff} = 0$  โดยที่  $L \neq 0$  จะได้ว่า

$$L = \Delta L \quad (7.6)$$

จากสมการที่ 2.5

$$I_{DSS} = \beta (V_G - V_T)^2$$

$$\beta = \frac{\mu_{PS} \epsilon_{ox} \epsilon_o W}{2T_{ox} \cdot L_{eff}} \quad (7.7)$$

จากสมการ (7.7) กำหนดให้  $\beta$  กับ  $T_{ox}$  คงที่ ดังนั้นค่า  $L_{eff}$  ที่เป็น 0 จะทำให้  $\frac{1}{\beta} = 0$  ถ้าพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ของ  $\frac{1}{\beta}$  กับ  $L$  ก็จะสามารถหาค่า  $\Delta L$  ได้ โดยค่า  $\frac{1}{\beta}$  หาได้จากสมการ (2.5)

$$\sqrt{I_{DSS}} = \sqrt{\beta} (V_G - V_T) \quad (7.8)$$

$$= \sqrt{\beta} \cdot V_G - \sqrt{\beta} \cdot V_T \quad (7.9)$$

จากสมการเชิงเส้น  $Y = mx + c$  :  $m =$  สโลป :  $c =$  จุดตัดแกน  $Y$

เพราะฉะนั้นสมการ (7.9) หาสโลปได้

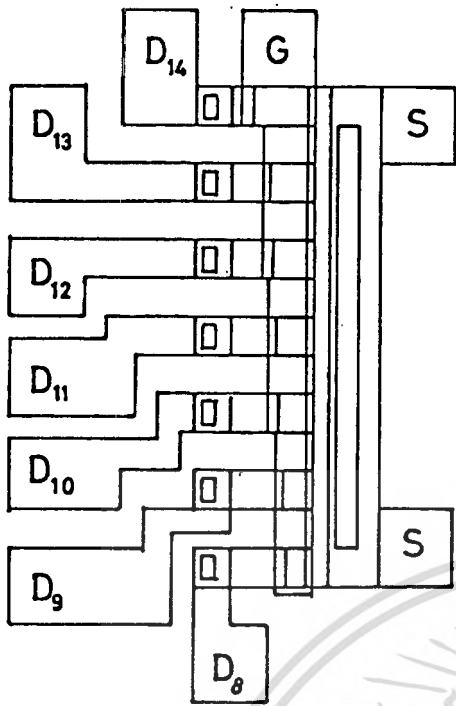
$$\sqrt{\beta} = \frac{\Delta \sqrt{I_{DSS}}}{V_G} \quad (7.10)$$

$$\frac{1}{\beta} = \left| \frac{\Delta V_G}{\Delta \sqrt{I_{DSS}}} \right|^2 \quad (7.11)$$

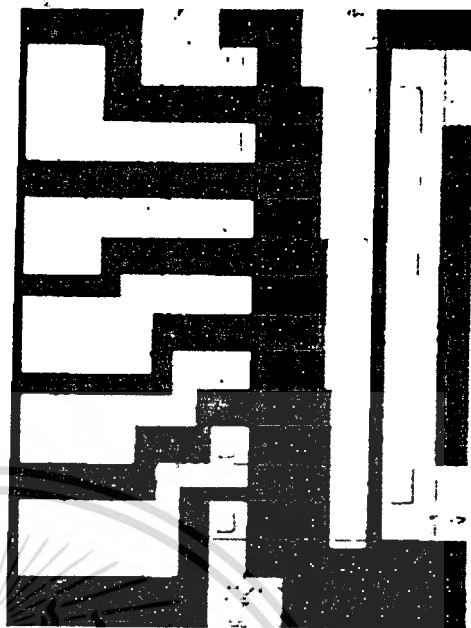
## 7.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบมอสเฟตเพื่อศึกษาผลของความยาวแขนแนลที่สั้นมาก ๆ ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟต (Short channel effect) ได้ออกแบบให้มีโครงสร้างต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 7.3

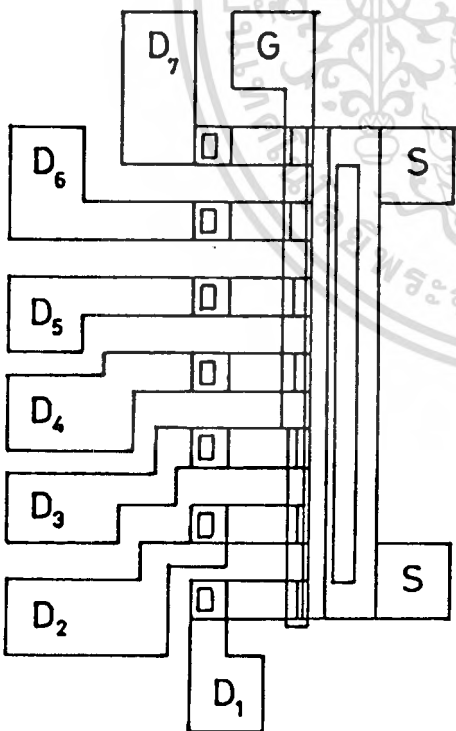
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



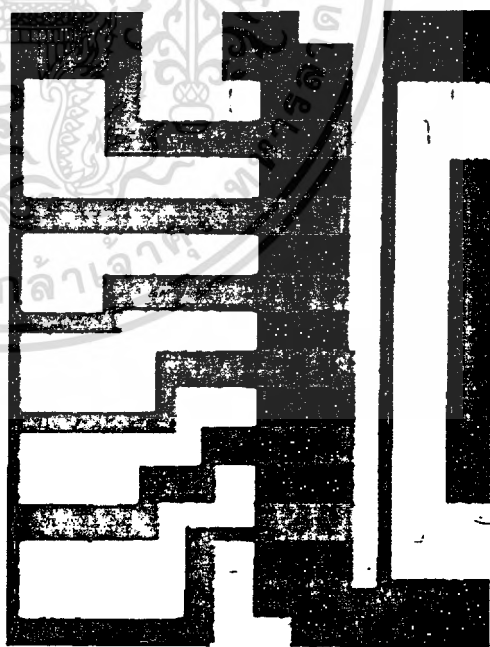
ภาพเขียนจากต้นแบบ



รูปถ่ายจากชิ้นงาน



ภาพเขียนจากต้นแบบ



รูปถ่ายจากชิ้นงาน

รูปที่ 7.3 Pattern MOSFET ทดสอบผลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Short Channel effect

ตารางที่ 7.1

พารามิเตอร์	L( $\mu\text{m}$ )	W( $\mu\text{m}$ )	T <sub>ox</sub> (Å)
D <sub>1</sub>	10	100	700, 1200
D <sub>2</sub>	15		
D <sub>3</sub>	20		
D <sub>4</sub>	25		
D <sub>5</sub>	30		
D <sub>6</sub>	35		
D <sub>7</sub>	40		
D <sub>8</sub>	50		
D <sub>9</sub>	60		
D <sub>10</sub>	70		
D <sub>11</sub>	80		
D <sub>12</sub>	90		
D <sub>13</sub>	100		
D <sub>14</sub>	140		

แต่ละตัวจะเป็นชิพ 1 ชิพ ซึ่งประกอบด้วยมอสเฟตที่มีพารามิเตอร์แตกต่างกัน 7 ตัว โดยทั้ง 7 ตัวจะแยกส่วนเครนออกจากกัน และใช้สัญลักษณ์เป็น  $D_1, D_2, D_3 \dots D_7$  หรือ  $D_8, D_9, D_{10} \dots D_{14}$  แต่สำหรับส่วนเกทและซอสยังคงใช้รวมกัน พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันแสดงได้ดังในตารางที่ 7.1 โดย ออกแบบใหม่มีความยาวแขนแนลตั้งแต่  $10 \mu\text{m} - 140 \mu\text{m}$  มีความกว้างแขนแนล ( $w$ )  $100 \mu\text{m}$  และสร้างให้เกทอ็อกไซด์หนา  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  ตามลำดับ เขียนแบบลงบนแผ่นกราฟ แล้วตัดแผ่น peel coat ตามแบบ ถ่ายยอคบนแบบลงบนมาสค์กรรจก 50 เท่า นำคัมเบที่ได้ไปสร้างตามขั้นตอนการสร้างในบทที่ 3 ซึ่งขั้นตอนในหัวข้อที่ 6 ในรูปที่ 3.2 ได้ออกแบบสร้างใหม่มีความหนาของเกทอ็อกไซด์ แตกต่างกัน 2 ค่า คือ

$$T_{\text{ox}} = 700 \text{ \AA} \quad \text{และ} \quad T_{\text{ox}} = 1200 \text{ \AA}$$

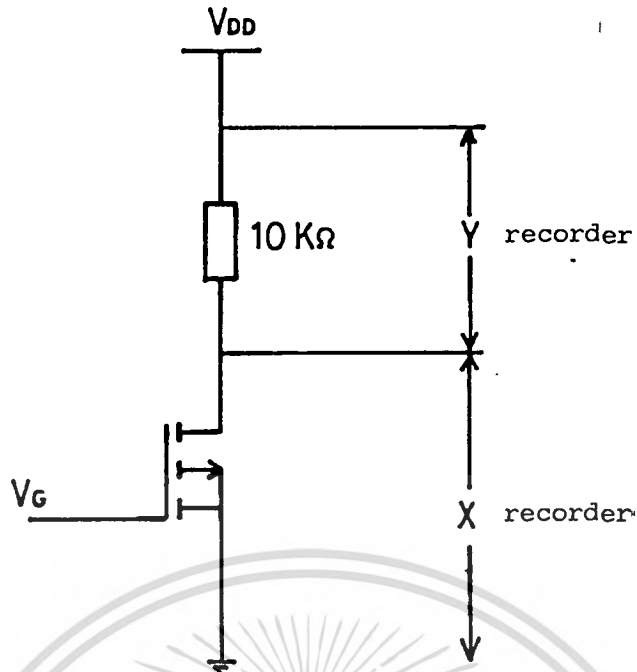
### 7.3 การทดลองและผลการทดลอง

#### 7.3.1 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเกรน ( $I_D$ ) กับความยาวแขนแนล ( $L$ )

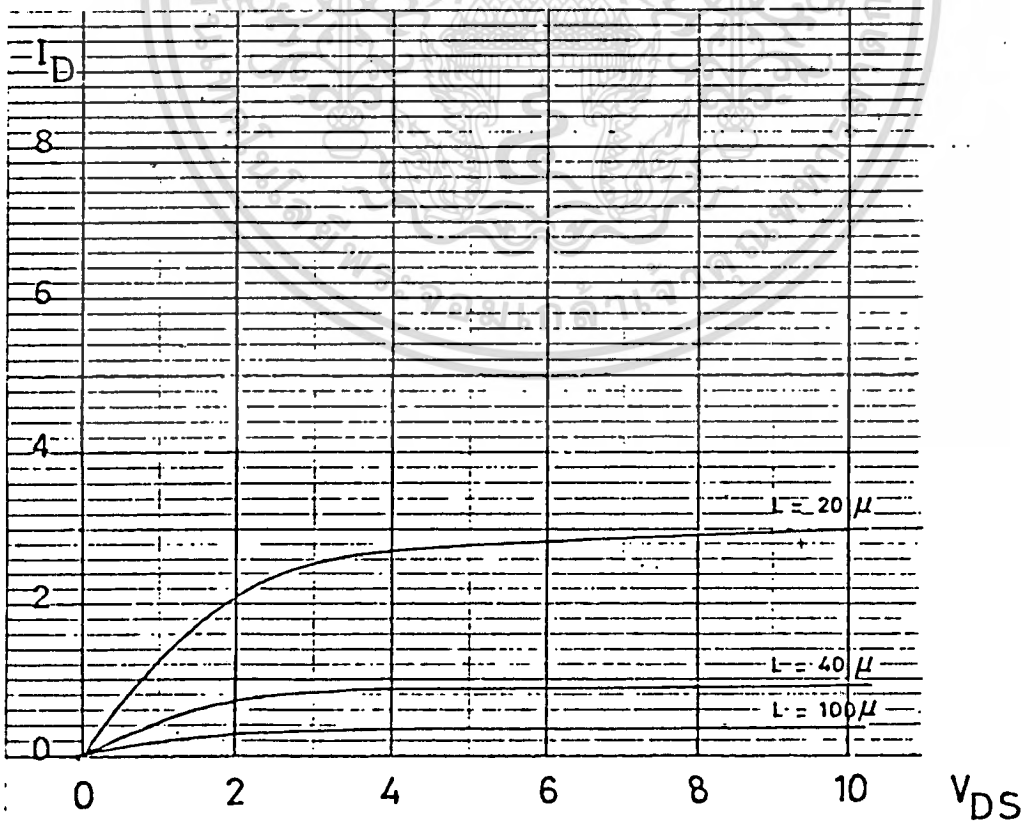
ทำการทดลองโดยต่อวงจรตามรูป 7.4 ให้แรงดันไบอัสที่เกท 7V วัดค่ากระแสเกรนอิมิตัว ( $I_{DSS}$ ) ที่  $V = 10V$  โดยเลือกใช้ความยาวแขนแนลค่าต่าง ๆ กันตั้งแต่  $10 \mu\text{m} - 140 \mu\text{m}$  ตามตารางที่ 7.1 มีความกว้างแขนแนล ( $w$ )  $100 \mu\text{m}$  ความหนาของเกทอ็อกไซด์  $1200 \text{ \AA}$  นำค่ากระแส  $I_{DSS}$  ที่ได้ไปพล็อตกราฟกับความยาวแขนแนล  $L$

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 7.5 พบว่าขณะที่ให้แรงดันเกทเท่ากับ 7V มอสเฟตที่มีความยาวแขนแนลยาวมากจะให้กระแส  $I_{DSS}$  ไหลน้อยกว่ามอสเฟตที่มีความยาวแขนแนลน้อย กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{DSS}$  กับ  $L$  แสดงได้ในรูปที่ 7.6 โดยใช้คอมพิวเตอร์พล็อต ที่  $L$  แต่ละค่า จะแสดงค่ากระแส  $I_{DSS}$  สูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยม ส่วนเส้นทึบเป็นค่าที่ได้อากการคำนวณนำมาเปรียบเทียบข้อมูลการทดลอง จากรูปจะพบว่ากระแส  $I_{DSS}$  ขณะที่ความยาวแขนแนลมาก ๆ นั้นมีค่าเกือบเท่ากัน แต่เมื่อลดความยาวแขนแนลสั้นลง ปรากฏว่ากระแส  $I_{DSS}$  จากข้อมูลการทดลองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าค่าที่คำนวณได้ ยิ่งความยาวแขนแนลสั้นลงมาก ๆ จนถึง  $10 \mu\text{m}$  กระแส  $I_{DSS}$  จะไหลเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว มากกว่าค่าที่คำนวณได้หลายเท่าตัว

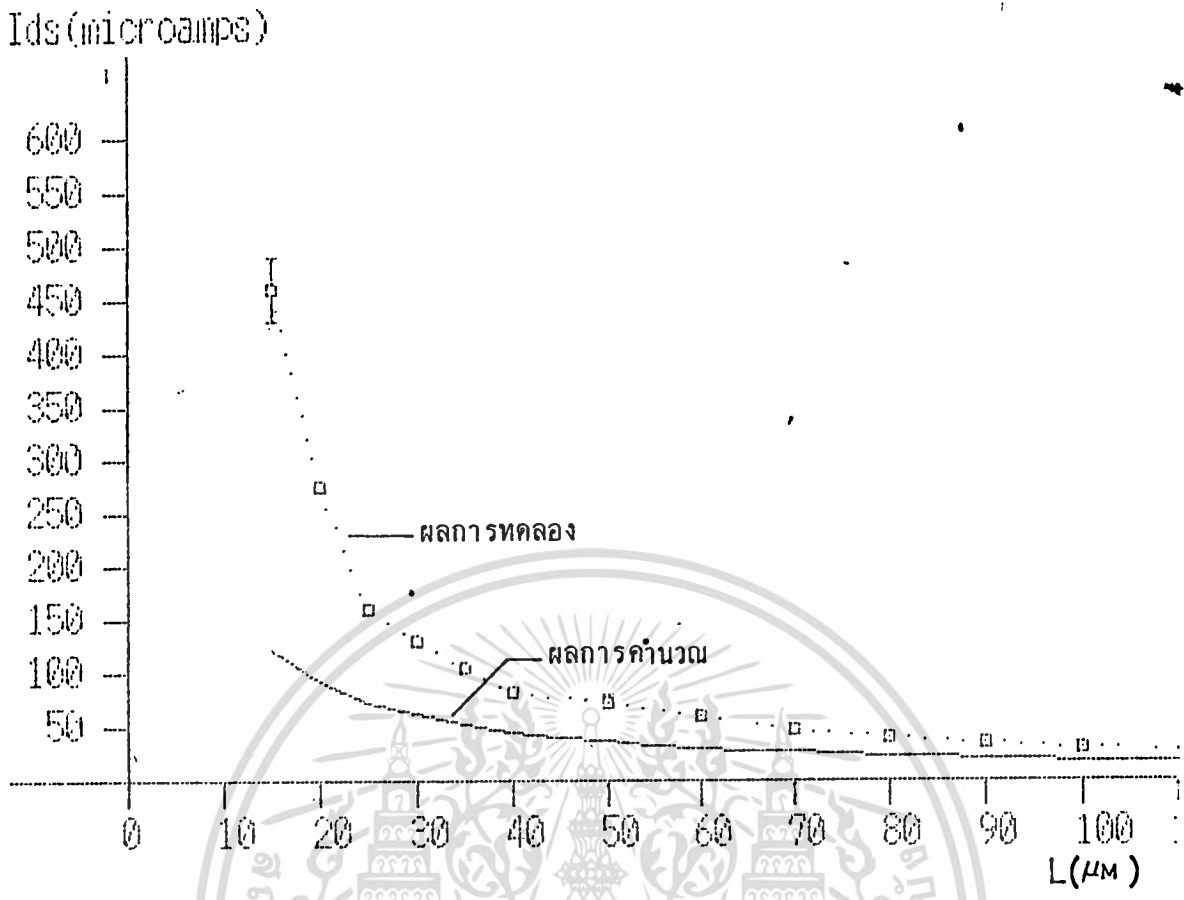


รูปที่ 7.4 วงจรทดลองวัดค่ากระแส  $I_D$  กับแรงดัน  $V_{DS}$

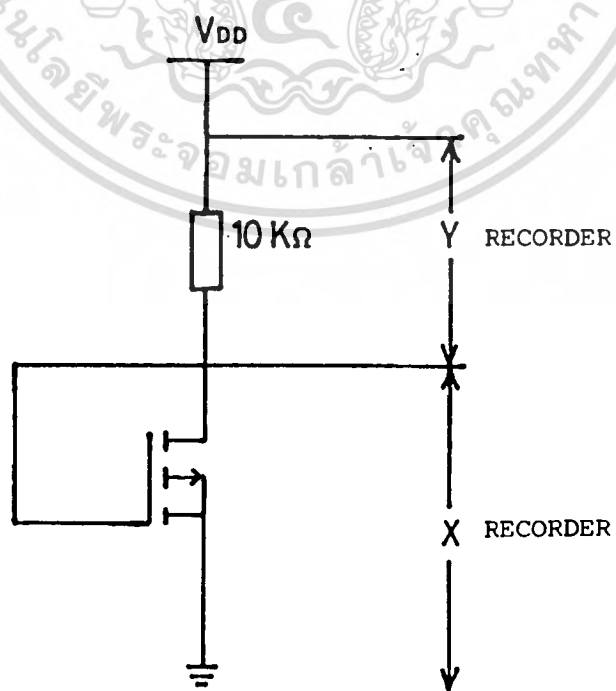


รูปที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_D$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  ที่ความยาวของแชนแนล  $L$  มีค่าต่าง ๆ กันที่  $V_G = 7\text{V}$  ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $1200\text{ \AA}$  ใช้

$V : 0.1\text{ mA/Div} ; H : 1\text{ V/Div}$



รูปที่ 7.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_D$  กับ ความยาวแชนแนล  $L$  ที่ความหนาเทออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $1200 \text{ \AA}$   $w = 100 \text{ \mu m}$  ;  $V_G = 7 \text{ V}$  ;  $V_{DS} = 10 \text{ V}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 7.7 วงจรการทดลองวัดแรงดันวิกฤติ  
 ไม่เว้นกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

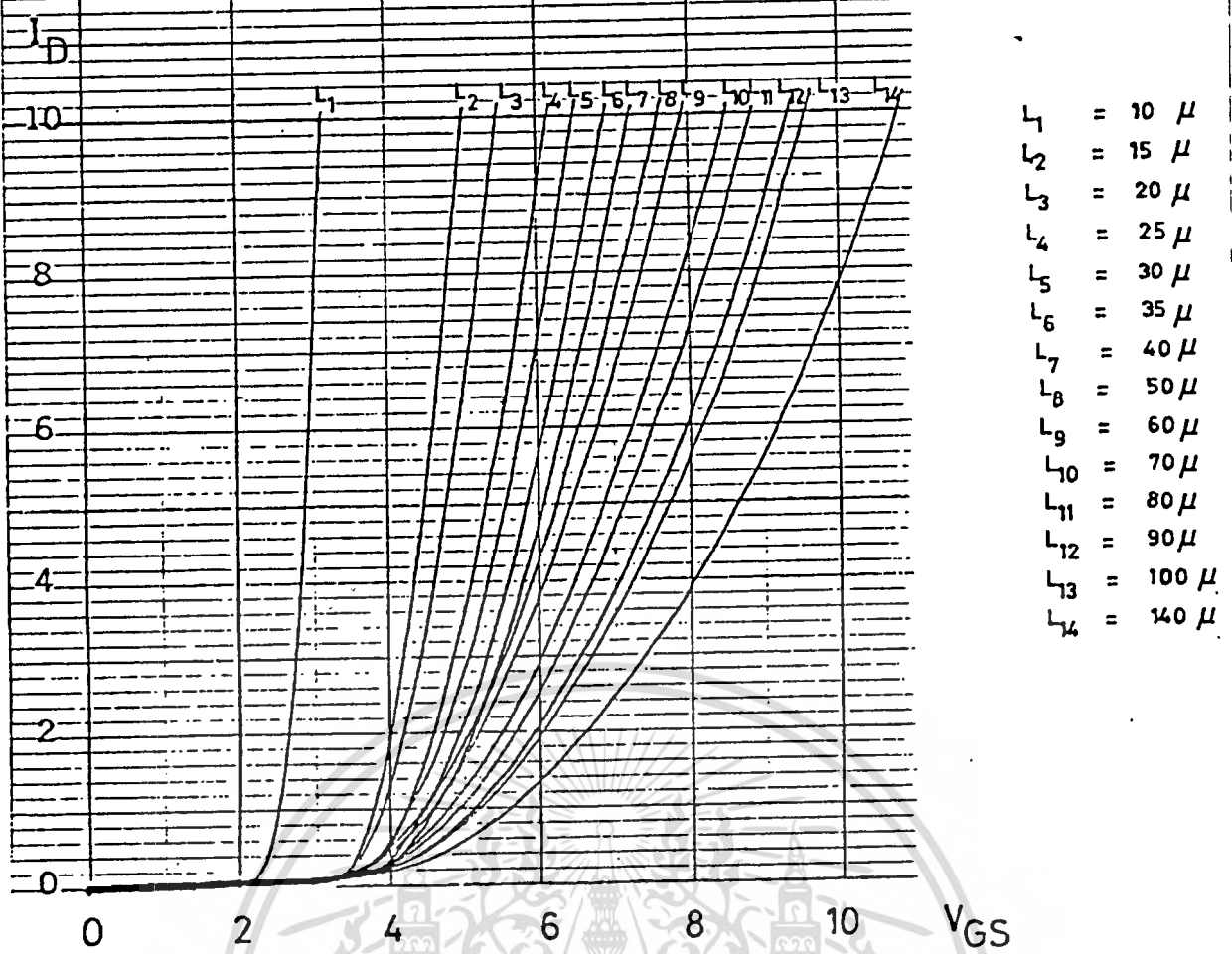
เมื่อมาพิจารณาจากทฤษฎีปรากฏการณ์การกระแสวิกฤตที่เพิ่มมากขึ้นนั้นเกิดจากค่าความยาวแขนแนลจริง  $L_{eff}$  มีค่าน้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากผลของความกว้างบริเวณลวดพาหะทั้งด้านแคโรนและซอส และผลของการแพร่กระจายของสารเจือออกทางด้านข้าง ซึ่งค่า  $L$  ที่เกิดจากผลเหล่านี้จะยังมีผลมากขึ้น เมื่อความยาวแขนแนลที่ออกแบบไว้สั้นมาก ๆ

### 7.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤต ( $V_T$ ) กับความยาวแขนแนล ( $L$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรตามรูปที่ 7.7 วัดหาค่าแรงดันวิกฤต ( $V_T$ ) ที่ความยาวแขนแนลค่าต่าง ๆ กัน ตั้งแต่  $10 \mu m - 140 \mu m$  ตามตารางที่ 7.1 ที่ความกว้างแขนแนล ( $W$ )  $100 \mu m$  ความหนาของเกตออกไซด์  $1200 \text{ \AA}$  นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างแรงดันวิกฤต ( $V_T$ ) กับความยาวแขนแนล ( $L$ ) จากนั้นเปลี่ยนเอาดีไวซ์ที่มีความหนาของเกตออกไซด์เป็น  $700 \text{ \AA}$  มาทำการวัดซ้ำแบบเดียวกัน นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ

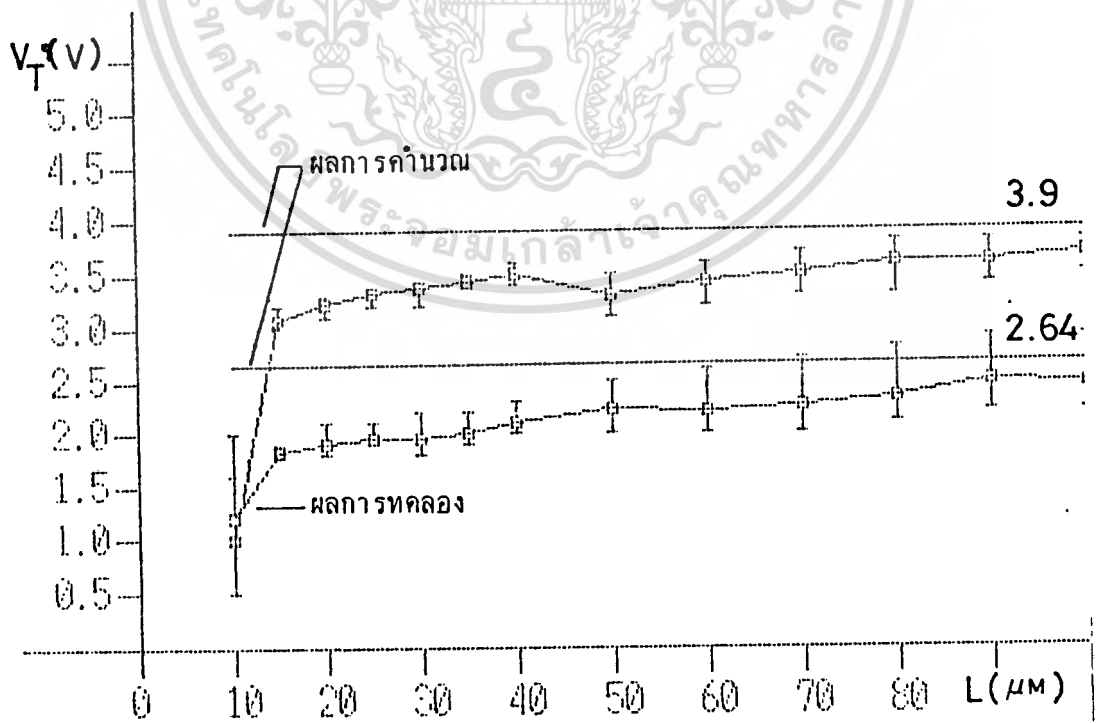
#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 7.8 จะพบว่าที่ความยาวแขนแนลมีค่ามากแรงดันวิกฤต ( $V_T$ ) จะมีค่าเท่ากัน ไม่ขึ้นกับความยาวแขนแนล แต่เมื่อลดความยาวแขนแนลให้มีความสั้นลงจนถึง  $10 \mu m$  ค่าแรงดันวิกฤต ( $V_T$ ) จะตกลงมาก เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟในรูปที่ 7.9 ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์พล็อตที่  $L$  แต่ละค่าโดยแสดงค่าแรงดันวิกฤตสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยเป็นรูปสี่เหลี่ยม ส่วนเส้นตรงเป็นค่าที่ได้อากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง จากรูปพบว่าที่ความยาวแขนแนล ( $L$ ) มีค่าต่าง ๆ กัน แต่ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) เท่ากันจะมีแรงดันวิกฤต ( $V_T$ ) เท่ากัน แต่เมื่อเปลี่ยนมาวัดที่ความหนาเกตออกไซด์ต่างกัน จะได้ค่าแรงดันวิกฤตต่างกัน ซึ่งจากการคำนวณค่าแรงดันวิกฤตที่ความหนาเกตออกไซด์  $T_{ox} = 700 \text{ \AA}$  ได้  $V_T = 2.64 \text{ v}$  และที่ความหนาของเกตออกไซด์  $T_{ox} = 1200 \text{ \AA}$  ได้  $V_T = 3.90 \text{ v}$  ดังนั้นค่าแรงดันวิกฤต ( $V_T$ ) จะขึ้นกับความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) เท่านั้น เมื่อความยาวแขนแนล ( $L$ ) มีค่ามาก แต่ที่ความยาวแขนแนลมีค่าสั้นลงเช่นที่  $20 \mu m$  ค่าแรงดันวิกฤต ( $V_T$ ) จะลดลงอย่างรวดเร็ว อันเป็นผลมาจากบริเวณลวดพาหะด้านแคโรนและซอส และการแพร่กระจายออกทางด้านข้างของสารเจือ โดยขบวนการแพร่กระจายความร้อน ตามที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 7.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_D$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  ที่ความยาวแชนแนล(L)

ซึ่งค่าต่าง ๆ กัน ที่ความหนาเทออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $1200 \text{ \AA}$   $V : 0.01 \text{ mA/Div}$   $H : 1V/Div$



รูปที่ 7.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ  $V_T$  กับความยาวแชนแนล L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$W = 100 \mu\text{m}$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.3.3 การวัดค่าความยาวแขนแนลจริง (L effective : $L_{eff}$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรตามรูปที่ 7.7 วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DSS}$  กับ  $V_G$  โดยใช้ curve tracer วัดที่ความยาวแขนแนล (L) ค่าต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 10  $\mu m$  - 140  $\mu m$ . ความกว้างแขนแนล (w) 100  $\mu m$  ความหนาของเกตออกไซด์ 1200 Å วัดค่า  $\Delta\sqrt{I_{DSS}}$  โดยเลือก  $I_{DSS}$  ที่มีค่า 9  $\mu A$  กับ 36  $\mu A$  เพื่อสะดวกในการคำนวณ แล้ววัดค่า  $\Delta V_G$  นำมาคำนวณหาค่า ตามสมการที่ (7.11) นำค่า ไปพล็อตกราฟกับความยาวแขนแนล (L) ที่มีค่าต่าง ๆ กัน โดยมี  $\frac{1}{L}$  เป็นแกนตั้ง L เป็นแกนนอน

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 7.10 จะพบว่าค่าพล็อตกราฟที่ L มีค่าต่าง ๆ กันนี้เกือบเป็นเส้นตรง เมื่อลากเส้นตรงเจี่ยข้อมูลทุกจุดไปตัดกับแกนความยาวแขนแนลแล้ว นั่นคือจุดที่ค่า L ที่ได้คือค่าของ  $\Delta L$  ซึ่งมีค่า 10  $\mu m$  แสดงว่าเกิดการแพร่กระจายสารเจือทางด้านข้างที่ขอสและเตรนประมาณค่านละ 5  $\mu m$  (บริเวณปลอดพาหะมีผลน้อยกว่าการแพร่สารเจือออกทางด้านข้าง)

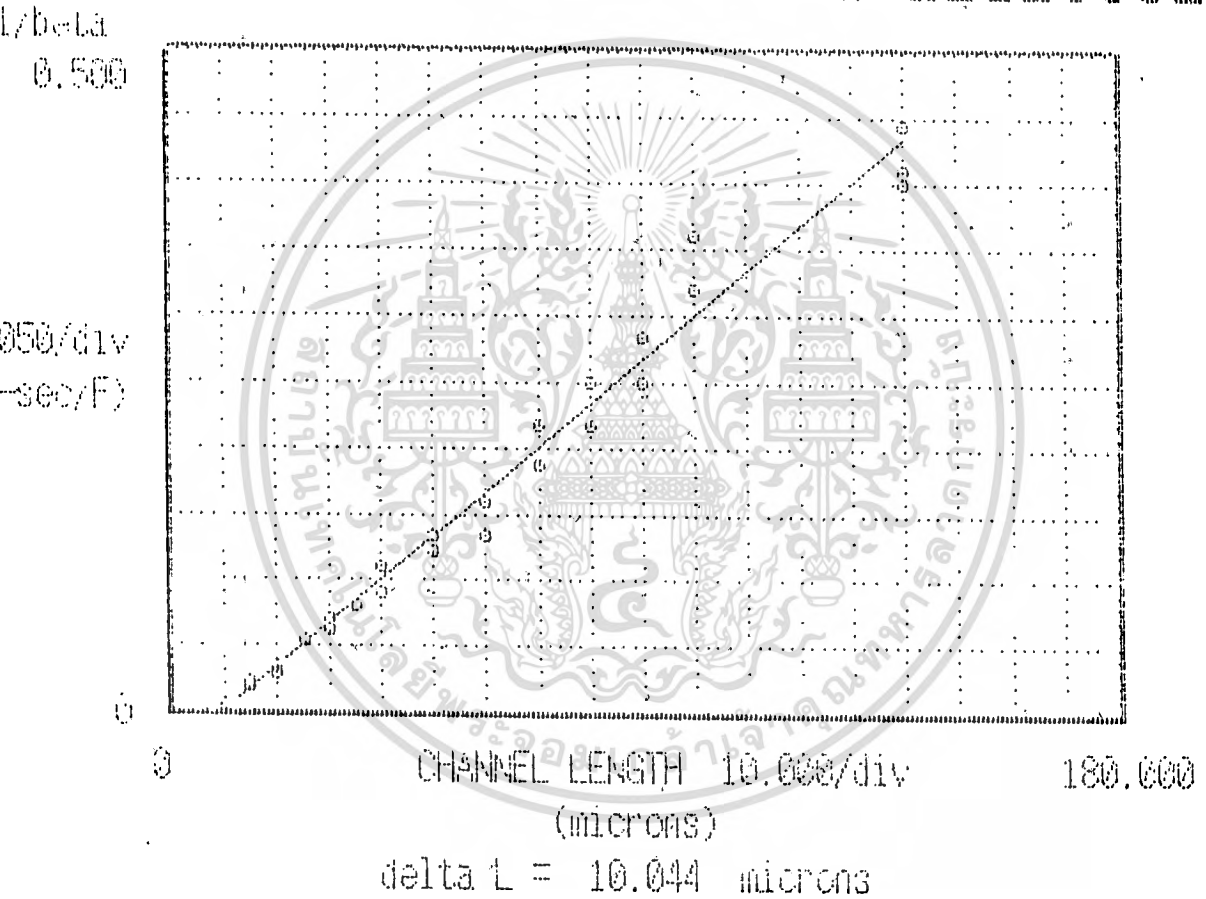
เมื่อดูจากข้อมูลที่วัดได้ ปรากฏว่าที่ความยาวแขนแนล (L) ออกแบบไว้ 10  $\mu m$  ส่วนมากมักจะเกิดการช็อคกันระหว่างขอสและเตรน ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามอสเฟตแบบพีแขนแนล เอ็นชันซ์เมนต์โทมค ที่สร้างขึ้นมีการแพร่สารเจือออกทางด้านข้าง ได้ระยะ  $\Delta L$  ประมาณ 10  $\mu m$

#### 7.4 สรุปผลการทดลอง

สำหรับผลการออกแบบสร้างมอสเฟตแบบพีแขนแนล เอ็นชันซ์เมนต์โทมค เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟสที่เปลี่ยนไป เมื่อความยาวแขนแนลสั้นมาก ๆ นั้น ปรากฏว่าที่ความยาวแขนแนลมีค่าน้อยกว่า 20  $\mu m$  ค่ากระแสเตรน ( $I_D$ ) มีค่าเพิ่มมากขึ้นดังผลการทดลองในรูป 7.6 จะเห็นว่าค่ากระแสเตรนอิ่มตัว ( $I_{DSS}$ ) เพิ่มมากขึ้นกว่าค่าที่คำนวณได้หลายเท่าตัว เพราะค่าความยาวแขนแนล (L) ที่ใช้ในการคำนวณ กับความยาวแขนแนลที่เกิดขึ้นจริง ( $L_{eff}$ ) แตกต่างกันมาก ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากบริเวณปลอดพาหะด้านเตรนและขอสขยายออกมารวมทั้งผลของการแพร่สารเจือออกทางด้านข้างของขบวนการแพร่ด้วยความร้อนอีกด้วย

# DATA PLOTTER

## $\alpha/\beta$ CHANNEL LENGTH RELATION



รูปที่ 7.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{\beta}$  กับความยาวแชนแนล L

นอกจากกระแสเดรน ( $I_D$ ) แล้ว ค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ที่ความยาวแชนแนลสั้นมาก ๆ นี้ ก็มีค่าลดลงด้วย ซึ่งถ้าพิจารณาจากทฤษฎีแล้ว ค่า  $V_T$  นี้จะไม่ขึ้นกับความยาวแชนแนล ( $L$ ) แต่อย่างไร แต่สำหรับผลที่เกิดขึ้นที่ทำให้  $V_T$  ลดลงนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.1)

$$I_D = \frac{kW}{L_{eff}} \left[ (V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right]$$

เมื่อ  $L_{eff}$  ลดลงจากค่าที่ออกแบบไว้จริง ดังนั้นกระแส  $I_D$  จึงต้องมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่  $I_D$  คงที่เท่าเดิม เพราะฉะนั้นเทอม  $(V_G - V_T)$  ต้องเพิ่มขึ้น นั่นคือ  $V_T$  มีค่าลดลง หรือพิจารณาจากกราฟรูปที่ 7.9 ก็ได้เช่นกัน โดยที่  $L_{eff}$  ลดลงนั้น  $I_D$  มีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาที่  $L_{eff}$  เท่าเดิมคือเท่ากับที่ออกแบบไว้ ค่ากระแส  $I_D$  เพิ่มขึ้นได้ เทอม  $(V_G - V_T)$  ต้องมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ  $V_T$  มีค่าลดลง ในรูปผลการทดลองที่ 7.9 นี้ พบว่าค่า  $V_T$  ที่ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) = 1200 Å จะลดลงมากกว่า  $V_T$  ของ  $T_{ox}$  ที่หนา 700 Å เมื่อ  $L = 10 \mu m$  ทั้งนี้เป็นเพราะผลของการแพร่สารเจือกระจายออกทางด้านข้างของ  $T_{ox} = 1200 \text{ Å}$  มีค่ามากกว่า เพราะต้องเพิ่มเวลาเพื่อสร้างเกตออกไซด์ให้หนาขึ้น ผลดังกล่าวนี้จะทำให้  $L_{eff}$  หดสั้นลงมากกว่า  $V_T$  จึงลดลงมากกว่าโดยในการทดลองหัวข้อ 7.3.3 เราสามารถวัดค่า  $\Delta L$  ที่ทำให้  $L_{eff}$  ลดลงได้  $\Delta L = 10 \mu m$  ซึ่งค่านี้จะป็นชี้วัดสำคัญในการสร้างมอสเฟตขนาดเล็ก ๆ ที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการสร้าง ที่กล่าวมาแล้ว

ผลการทดลองครั้งนี้จะนำมาพิจารณาในการออกแบบสร้างมอสเฟตให้มีขนาดความยาวแชนแนลให้สั้นที่สุดเพื่อที่จะนำไปต่อกับดีไวซ์อื่นในลักษณะของวงจรรวมโมโนลิติก สำหรับผลจากการทดลองที่ได้ มอสเฟตที่มีขนาดความยาวแชนแนลที่สั้นที่สุดที่ยังสามารถทำงานได้ตามต้องการมีค่า  $L = 20 \mu m$

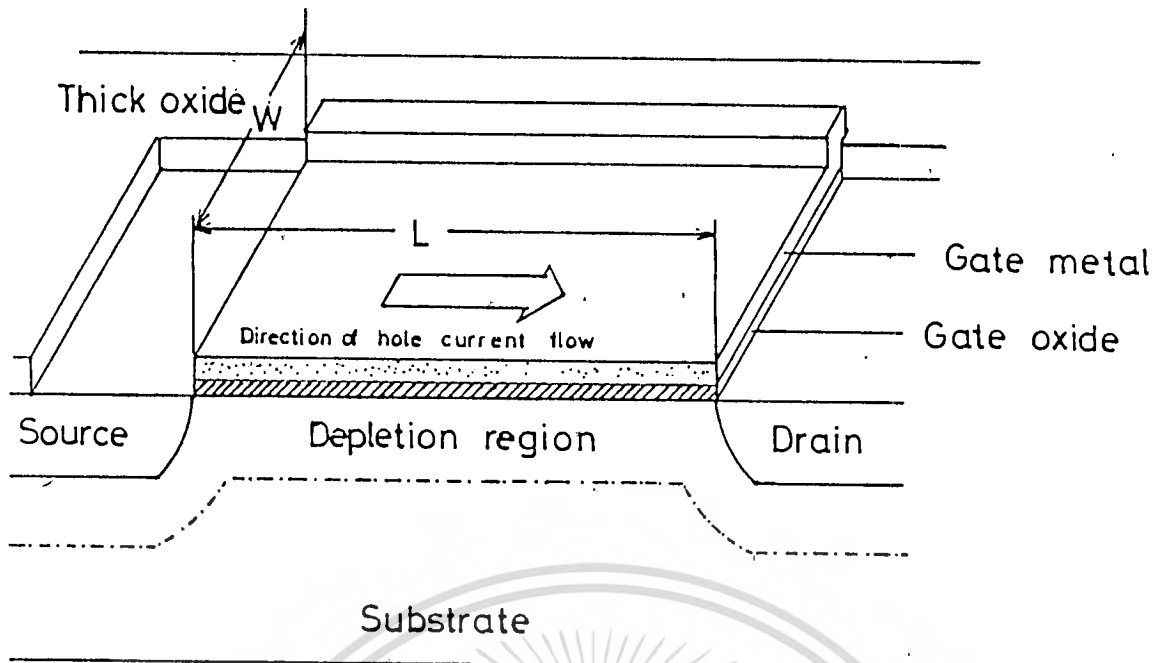
บทที่ 8

ผลของขนาดความกว้างแชนแนล (Channel width effect)

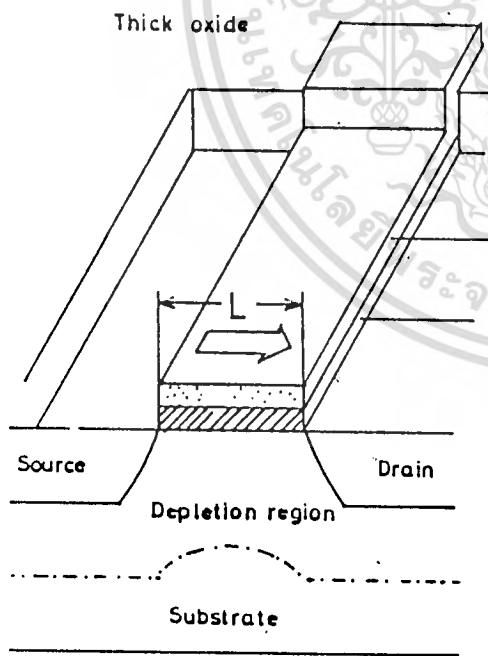
8.1 วัตถุประสงค์

จุดประสงค์ในการสร้างวงจรรวม (IC) จำเป็นต้องลดขนาดตัวชิพที่นำมาประกอบเป็นวงจรรวมให้เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะสร้างจำนวนตัวชิพให้ได้มากที่สุด ในเนื้อที่ขนาดเดียวกันแต่อย่างไรก็ตามการลดขนาดตัวชิพให้เล็กมาก ๆ โดยการลดขนาดความยาวแชนแนล จะทำให้เกิดผลของ Short channel effect ซึ่งจากการศึกษาผลของขนาดความยาวแชนแนล ในบทที่ 7 ปรากฏว่าขณะที่ลดความยาวแชนแนลให้สั้นลงมาก ๆ จนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของบริเวณปลดพาหะที่คานาเดรนและซอสจะทำให้ ค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) มีค่าลดลง

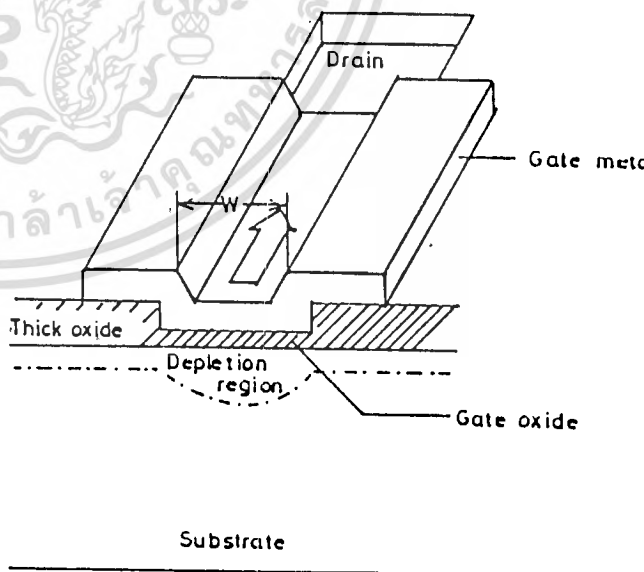
นอกจากปรากฏการณ์ของ Short channel effect แล้วการลดขนาดความกว้างแชนแนลให้แคบมาก ๆ จะเกิดผลของ Narrow channel effect ด้วย ซึ่งจะให้ผลตรงกันข้ามกับปรากฏการณ์ของ Short channel effect นั่นคือค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) จะเพิ่มมากขึ้นขณะที่ลดขนาดความกว้างแชนแนล ในบทที่ 8 นี้จะได้ทำการศึกษาผลของขนาดความกว้างแชนแนล (Channel width effect) เพื่อต้องการหาความกว้างแชนแนลที่แคบที่สุดที่ไม่ทำให้เกิด ผลของ Narrow channel effect โดยที่ผลนี้จะเกิดขึ้นเมื่อขนาดความกว้างของแชนแนลมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของบริเวณปลดพาหะที่ใต้เกต รูปที่ 8.1 จะเป็นรูปของโครงสร้างมอสเฟตที่ขนาดความกว้างความยาวของแชนแนลมีค่ามาก รูปที่ 8.2 แสดงโครงสร้างมอสเฟตที่มีความยาวแชนแนลสั้นมาก ๆ ในขณะที่ให้ไบอัสซอสและเดรนเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดบริเวณปลดพาหะที่คานาเดรนและซอสเท่ากัน และเชื่อมต่อกับบริเวณปลดพาหะที่ใต้เกตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากให้แรงดันไบอัสเกตมีค่าน้อย ๆ ในขณะที่มอสเฟตอยู่ในภาวะ off เมื่อให้ไบอัสที่เกตมากขึ้น (ลบมากขึ้น) จนถึงค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_{Tn}$ ) เกิดการเหนี่ยวนำโฮลขึ้นเป็นแชนแนล กระแสสามารถไหลผ่านได้ ขนาดของแชนแนลที่เกิดขึ้นบริเวณปลดพาหะที่ใต้เกตนี้ จะขยายเข้าไปในขั้วเดรนมีค่า ๆ หนึ่งแล้วจึงจะไม่ขยายตัวออกไปอีก ถึงแม้ว่าจะเพิ่มแรงดันที่เกตอีกก็ตาม แต่จะเหนี่ยวนำโฮลได้มากขึ้นกระแสไหลผ่านได้มากขึ้น ขณะเดียวกันที่บริเวณปลดพาหะคานาซอสและเดรนก็จะยื่นเข้าไปบริเวณใต้เกตมากขึ้นด้วย ผลอันนี้จะทำให้แรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) มีค่าลดลงเมื่อเทียบ



รูปที่ 8.1 โครงสร้างของ MOSFET มีขนาดความกว้างยาวของแชนแนล  
 ใหญ่มาก (large geometry)



รูปที่ 8.2 Short channel



รูปที่ 8.3 Narrow channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กับมอสเฟตที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่

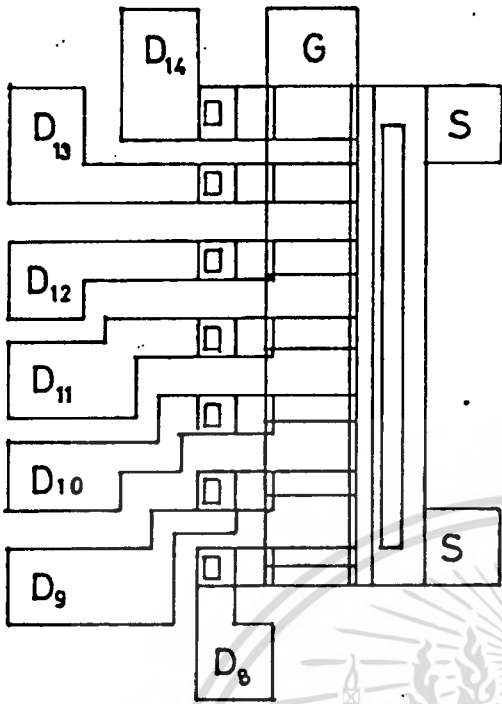
ผลของ Narrow channel effect จะให้ผลตรงกันข้ามโดยพิจารณา จากรูปที่ 8.3 สมมุติว่า เกทโลหะขอสัมกับบริเวณออกไซด์หนาที่ด้านข้าง เมื่อให้ไบอัสที่เกทน้อย ๆ จะเกิดบริเวณปลอดพาหะที่ใต้เกทและเกิดบริเวณปลอดพาหะข้างใน ๆ ใต้ออกไซด์หนาที่ด้านข้างด้วย เพราะว่าแรงดันวิกฤติของออกไซด์หนามีค่ามากกว่าและผลของ  $\phi_{MS}$ ,  $Q_{SS}$  และ  $\sigma_s$  เมื่อให้แรงดันไบอัสที่เกทมากขึ้น บริเวณปลอดพาหะจะขยายเข้าไปในชั้น เดรท แต่การขยายของบริเวณปลอดพาหะนี้จะถูกป้องกันโดยบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นชั้นใน ๆ ของบริเวณใต้ออกไซด์หนาทั้ง 2 ข้างทำให้การขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะเป็นไปไต่ยาก เพราะว่ามีสนามไฟฟ้าที่ศทางเดียวกับ เกทกระจายอยู่บริเวณปลอดพาหะจึงขยายเข้าไปในฐานรองมากกว่าที่จะขยายออกทางด้านข้าง  $\psi$  จึงมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น เมื่อเปรียบเทียบกับมอสเฟต ที่โครงสร้างขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มความแรงดันที่เกท เพื่อชดเชยผลที่เกิดขึ้น

ดังนั้นค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ที่แขนแนลแคบ ๆ จะมีความมากกว่า เมื่อเทียบกับมอสเฟตที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่

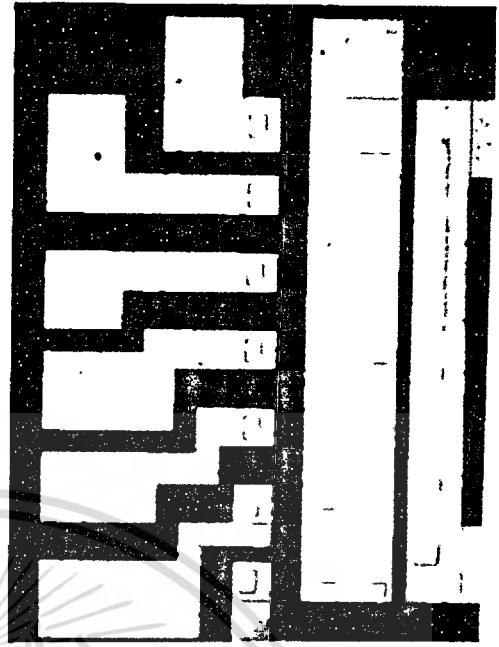
### 8.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบมอสเฟต เพื่อศึกษาผลของความกว้างแขนแนลที่แคบมาก ๆ ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟต (Narrow channel effect) ได้ออกแบบใหม่มีโครงสร้างต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 8.4 (ก) และ (ข) โดยที่แต่ละชิพจะประกอบด้วยมอสเฟตที่มีพารามิเตอร์แตกต่างกัน 7 ตัว โดยทั้ง 7 ตัว จะมีส่วนเดรนแยกออกจากกันซึ่งให้สัญลักษณ์เป็น  $D_1, D_2, D_3, \dots, D_7$  หรือ  $D_8, D_9, D_{10}, \dots, D_{14}$  แต่ยังคงใช้ขั้วเกทและขอสร์ร่วมกัน พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันแสดงได้ในตารางที่ 8.1 ความกว้างแขนแนลที่ออกแบบมีค่าตั้งแต่  $10 \mu m - 140 \mu m$  มีความยาวแขนแนลเท่ากับ  $L = 200 \mu m$  และสร้างให้เกทออกไซด์มีขนาดหนาเป็น  $700 \text{ \AA}$  และ  $1200 \text{ \AA}$  ตามลำดับ นำต้นแบบเขียนลงบนแผ่นกราฟ แล้วตัดแผ่น peel coat ตามแบบ ถ่ายยอต้นแบบบนมาสค์กระจก 50 ไมครอนต้นแบบไปสร้างตามขั้นตอนการสร้างในเมทที่ 3 จนถึงหัวข้อ 3.6 ในรูป 3.2 ได้ออกแบบใหม่มีความหนาของเกทออกไซด์แตกต่างกัน 2 ค่า คือ  $T_{ox} = 700 \text{ \AA}$  และ  $T_{ox} = 1200 \text{ \AA}$

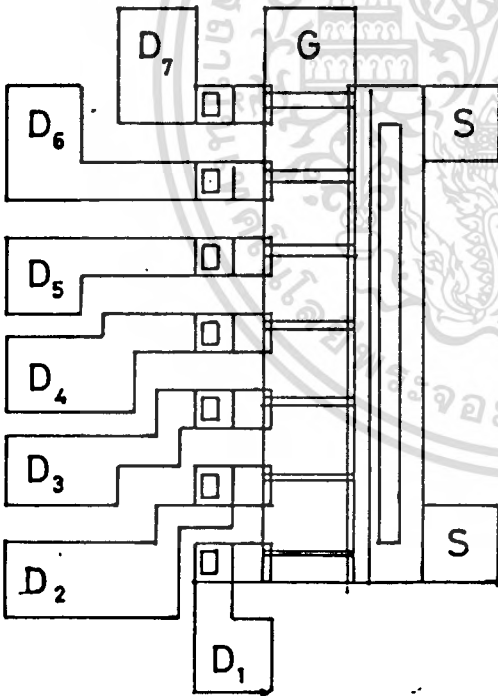
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



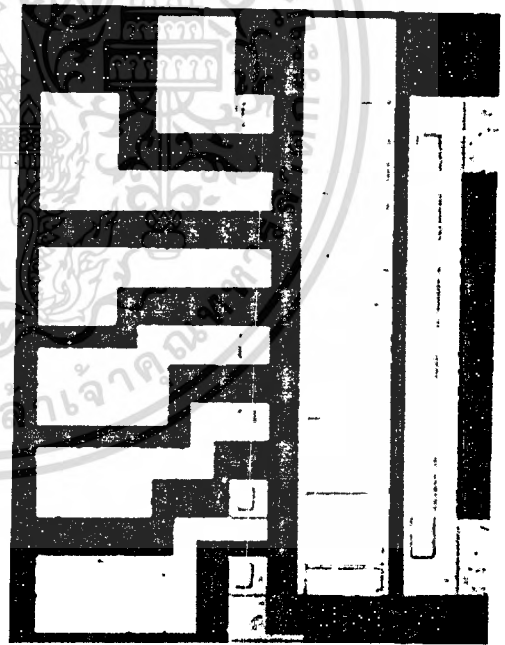
ภาพวาดจากต้นแบบ



ภาพถ่ายจากชิ้นงาน



ภาพวาดจากต้นแบบ



ภาพถ่ายจากชิ้นงาน

รูปที่ 8.4 Pattern MOSFET ทดลองผลของ Narrow channel effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.1

พารามิเตอร์	W ( $\mu\text{m}$ )	L ( $\mu\text{m}$ )	T <sub>ox</sub> ( $^{\circ}\text{A}$ )
D <sub>1</sub>	10		
D <sub>2</sub>	15		
D <sub>3</sub>	20		
D <sub>4</sub>	25		
D <sub>5</sub>	30	200	700
D <sub>6</sub>	35		1200
D <sub>7</sub>	40		
D <sub>8</sub>	50		
D <sub>9</sub>	60		
D <sub>10</sub>	70		
D <sub>11</sub>	80		
D <sub>12</sub>	90		
D <sub>13</sub>	100		
D <sub>14</sub>	140		

### 8.3 การทดลองและผลการทดลอง

#### 8.3.1 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_D$ ) กับความกว้างแชนแนล ( $w$ )

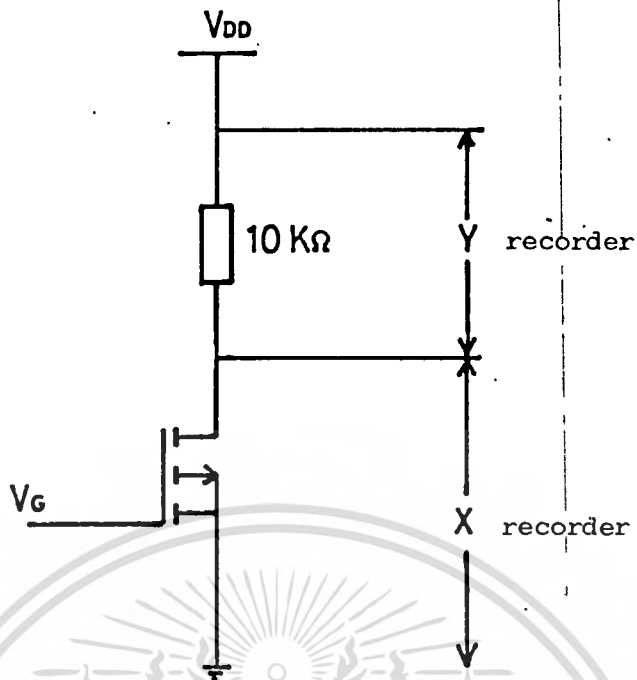
ทำการทดลองต่อวงจรตามรูปที่ 8.5 โดยให้แรงดันไบอัสที่เกต  $7V$  วัดค่ากระแสเดรนอิ่มตัว ( $I_{DSS}$ ) ที่  $v = 10V$  เลือกใช้มอสเฟตที่มีความกว้างแชนแนลต่าง ๆ กันตั้งแต่  $10 \mu m - 140 \mu m$  ตามตารางที่ 8.1 แต่มีความยาวแชนแนลเท่ากัน  $L = 200 \mu m$  ความหนาเกทออกไซด์  $1200 \text{ \AA}$  นำค่ากระแส  $I_{DSS}$  ไปพล็อตกราฟกับความกว้างแชนแนล  $w$

#### ผลการทดลอง

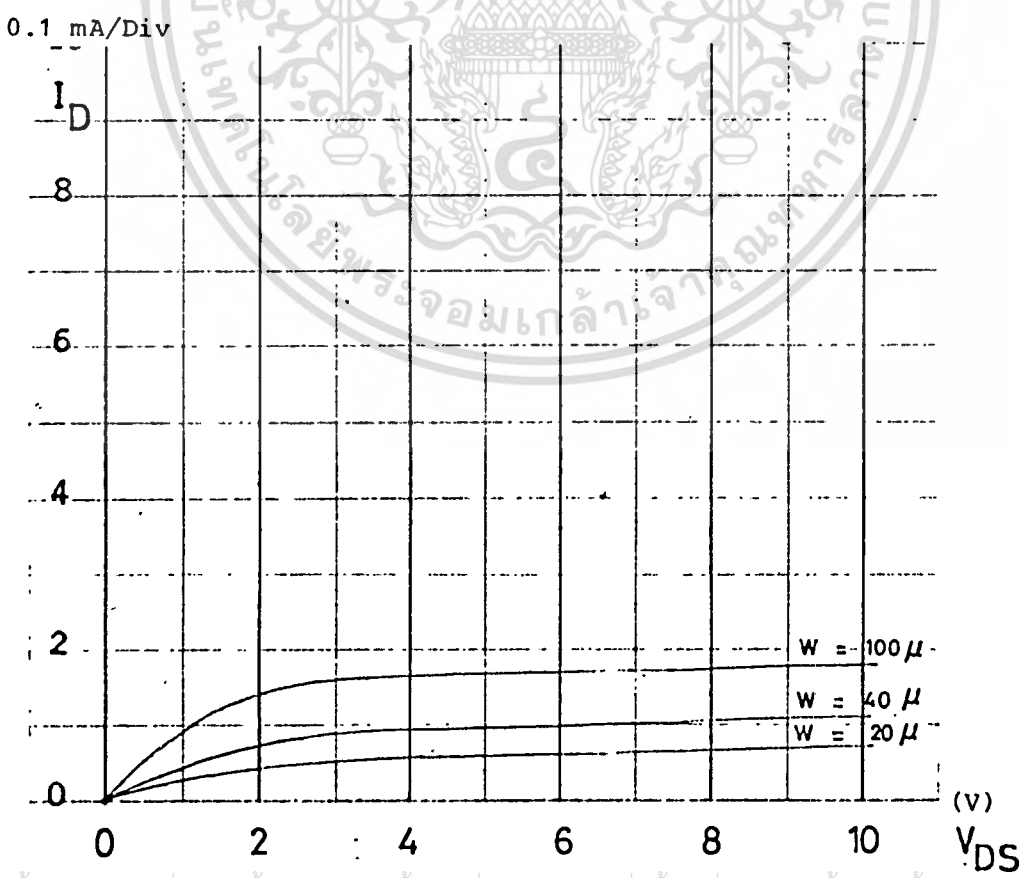
ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 8.6 พบว่าค่าความกว้างของแชนแนลมีค่ามาก กระแสเดรนอิ่มตัว ( $I_{DSS}$ ) จะมีความมากกว่า มอสเฟตที่มีความกว้างแชนแนลน้อยกว่า ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.5) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{DSS}$  กับ  $w$  แสดงได้ในรูปที่ 8.7 โดยใช้คอมพิวเตอร์พล็อตที่  $w$  แต่ละค่าจะมีแสดงกระแส  $I_{DSS}$  สูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยเป็นรูปสี่เหลี่ยม ส่วนเส้นทึบเป็นค่าที่ไล่จากการคำนวณนำมาเปรียบเทียบ ผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก และมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน หากแต่ค่าความกว้างแชนแนลมีค่ามาก ๆ ค่าที่ไล่จากการวัดมีค่ามากกว่าค่าที่ไล่จากการคำนวณ เป็นเพราะที่โครงสร้างของมอสเฟตจะขนาดใหญ่ ผลของบริเวณปลดพาหะที่คานเดรนและซอส รวมทั้งที่ได้ออกไซด์หนาดานข้างของแชนแนลจะมีผลน้อยมาก แต่ค่าความกว้างแชนแนลแคบมาก ๆ จำเป็นต้องคิดผลของบริเวณปลดพาหะด้วย เมื่อขีดเขียนผลดังกล่าวกับค่าผิดพลาดต่าง ๆ อันเนื่องมาจากการสร้างจึงทำให้ค่ากระแส  $I_{DSS}$  มีค่าใกล้เคียงกันทางทฤษฎี

#### 8.3.2 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความกว้างแชนแนล ( $w$ )

ทำการทดลองต่อวงจรตามรูปที่ 8.8 วัดค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ที่ความกว้างแชนแนลค่าแตกต่างกัน  $10 \mu m - 140 \mu m$  ตามตารางที่ 8.1 โดยมีความยาวแชนแนลลงที่  $100 \mu m$  ความหนาของเกทออกไซด์  $1200 \text{ \AA}$  นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความกว้างแชนแนล ( $w$ ) จากนั้นเอาดีไวซ์ที่มีความหนาของเกทออกไซด์  $700 \text{ \AA}$  มาทำการวัดซ้ำแบบเดียวกัน นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ

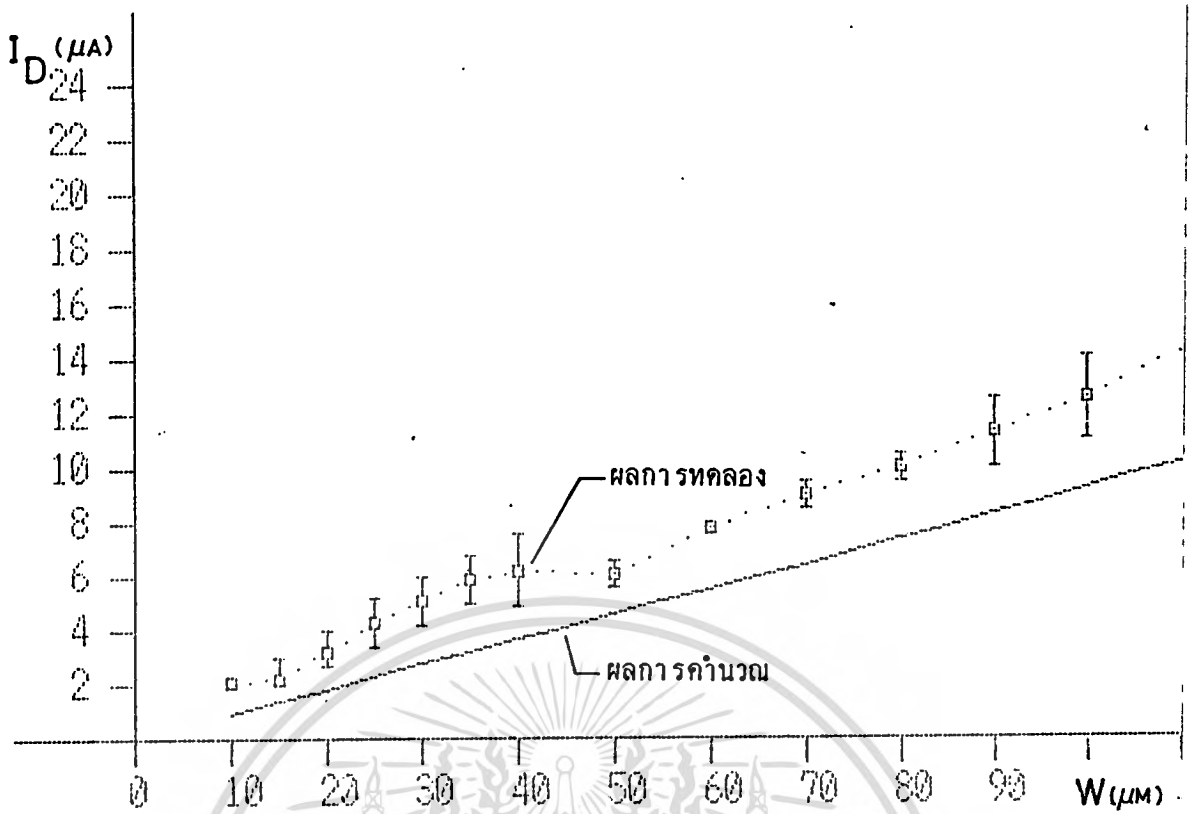


รูปที่ 8.5 วงจรการทดลอง  $I_D - V_{DS}$

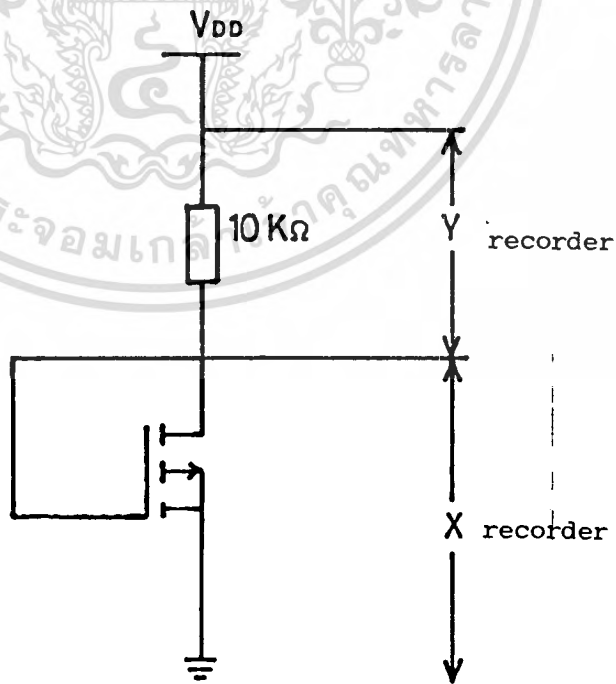


รูปที่ 8.6 ผลการทดลอง plot ด้วย xy recorder  $I_D - V_{DS}$  ที่  $W$  ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการพิมพ์หรือการอื่น ๆ อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอยู่ใต้อาณัติของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_D$  กับ  $w$  ที่  $T_{ox} = 1200 \text{ \AA}$ ,  $L = 200 \text{ \mu m}$ ;  $V_G = 7 \text{ V}$ ;  $V_D = 10 \text{ V}$



รูปที่ 8.8 วงจรการทดลอง  $I_D - V_{GS}$  วัด  $V_T$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 8.9 จะพบว่าค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) มีค่าเท่ากันในช่วงที่ความกว้างแชนแนลมีค่ามาก ๆ แต่เมื่อความกว้างแชนแนลมีขนาดแคบลงมาก ๆ (เช่น  $10 \mu m$ ) ค่าแรงดันวิกฤติจะเพิ่มขึ้น นำข้อมูลค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ไปพล็อตกราฟกับความกว้างแชนแนล ( $w$ ) ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 8.10 โดยใช้คอมพิวเตอร์พล็อต ที่  $w$  แต่ละค่าจะแสดงค่า  $V_T$  สูงสุดค่าสุดและค่าเฉลี่ย ซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยม เส้นตรงเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าที่ความกว้างแชนแนลมีค่าแตกต่างกัน แต่มีความหนาออกไซด์เท่ากัน ค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) จะมีค่าคงที่เท่ากันตลอด แต่เมื่อเปลี่ยนค่าความหนาของเกตออกไซด์ ค่าแรงดันวิกฤติก็จะเปลี่ยนไปโดยที่

$$\text{ที่ความหนาของเกตออกไซด์ } T_{ox} = 700 \text{ \AA} \text{ ได้ } V_T = 2.64 \text{ V}$$

$$\text{ที่ความหนาของเกตออกไซด์ } T_{ox} = 1200 \text{ \AA} \text{ ได้ } V_T = 3.90 \text{ V}$$

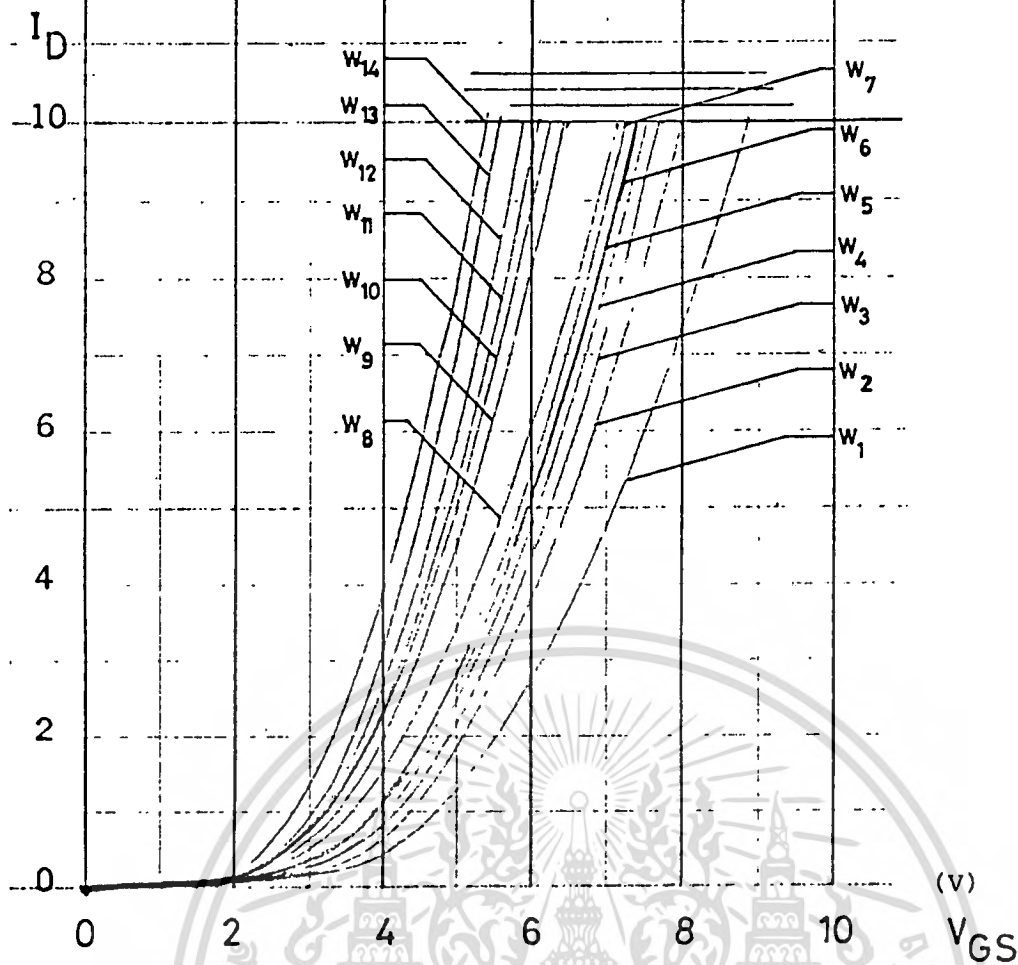
ดังนั้นแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) จะขึ้นกับความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) เท่านั้นเมื่อความกว้างแชนแนล ( $w$ ) มีค่ามาก แต่ถ้ามความกว้างแชนแนลมีขนาดแคบลงมากกว่า  $40 \mu m$  ปรากฏว่าค่าแรงดันวิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากบริเวณปลดพาหะที่ไดออกไซด์หนาด้านข้างแชนแนลทำหน้าที่เป็นส่วนป้องกันการขยายตัวออกด้านข้างของบริเวณปลดพาหะได้ เกต ดังที่ได้อธิบายแล้ว ทำให้ต้องเพิ่มค่าแรงดันที่เกตให้สูงขึ้นเพื่อเอาชนะผลกระทบดังกล่าว ดังนั้นค่าแรงดันวิกฤติจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

8.4 สรุปผลการทดลอง

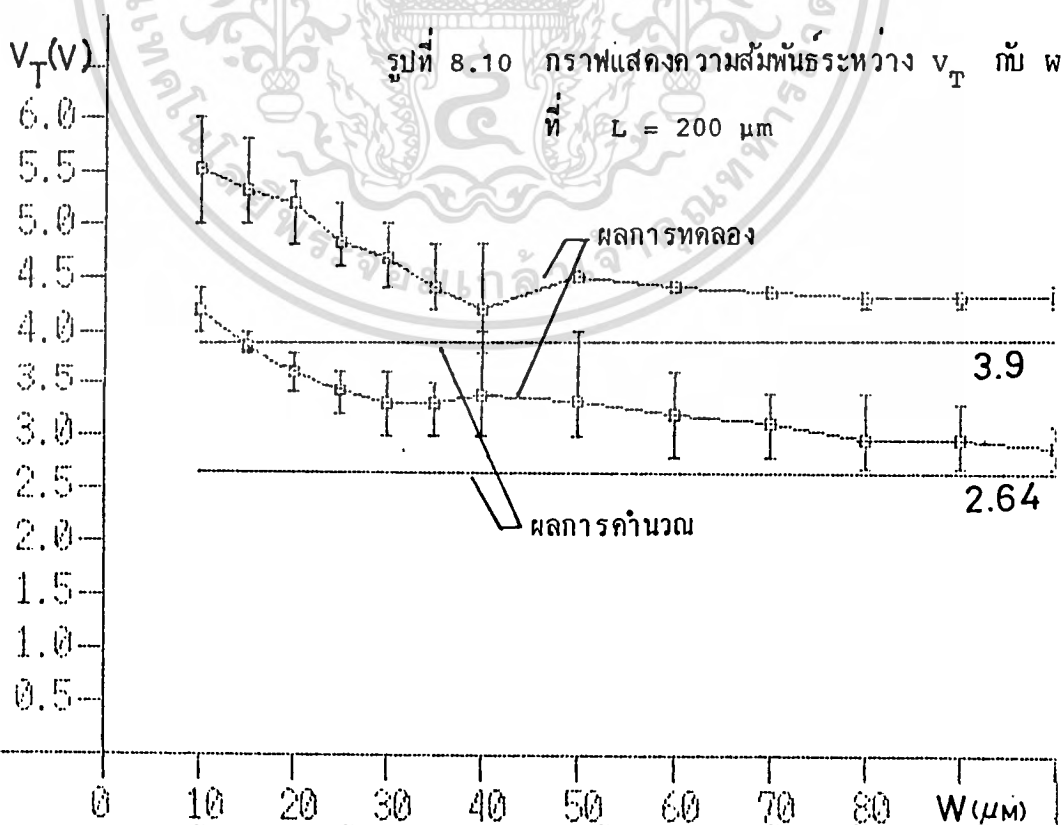
สำหรับการออกแบบสร้างมอสเฟตแบบพีแชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อความกว้างแชนแนลแคบมาก ๆ หรือเรียกว่าเป็นผลของ Narrow channel ซึ่งให้ผล ตรงกันข้ามกับ Short channel ในบทที่ 7 ปรากฏว่าที่ความกว้างแชนแนลแคบมากกว่า  $40 \mu m$  แนวโน้มของกระแสเดรนอิ่มตัว ( $I_{DSS}$ ) นั้นเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 8.7 แต่ไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณอันเป็นผลมาจากบริเวณปลดพาหะที่อยู่บริเวณไดออกไซด์หนาด้านข้างแชนแนลป้องกันการขยายตัวของแชนแนล เมื่อแชนแนลแคบมาก ๆ ค่านี้จะมีผลมากทำให้  $I_{DSS}$  น้อยลงกว่าที่ควรจะไหลได้จริง ๆ ดังนั้นเมื่อชดเชยกับค่าผิดพลาดต่าง ๆ แล้ว ทำให้กระแส  $I_{DSS}$  ไหลได้มีค่าเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการคำนวณ นอกจากกระแสเดรน ( $I_D$ ) แล้วค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ที่ความกว้างแชนแนลแคบ ๆ ก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีแล้ว  $V_T$  นี้จะไม่ขึ้นกับความกว้างแชนแนลแต่

0.01

mA/Div



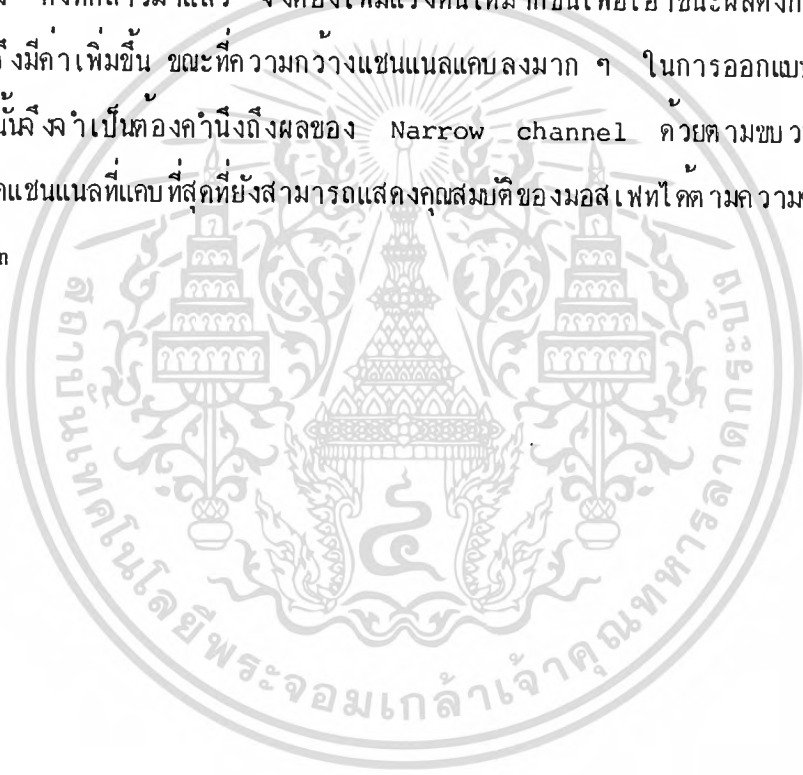
รูปที่ 8.9 ผลการทดลอง plot ด้วย xy recorder  $I_D - V_{GS}$  ที่  $w$  ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 8.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_T$  กับ  $w$  ที่  $L = 200 \mu m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไร สำหรับผลที่เกิดขึ้นนี้อาจพิจารณาจากทางกายภาพได้ คือขณะที่ขนาดความกว้างของแชนแนล มีขนาดแคบมาก ๆ นี้ เมื่อให้โวลต์ที่เกตด้วยแรงดันค่าน้อย ๆ จะเกิดบริเวณปลอดพาหะที่ใต้เกต และเกิดบริเวณปลอดพาหะที่บริเวณใต้ออกไซด์หนาด้านข้างของแชนแนล เป็นชั้นบาง ๆ ด้วย อันเนื่องมาจากประจุที่ผิวสัมผัส  $Q_{SS}$  (Interface charge) ระหว่าง Si กับ  $SiO_2$  และสนามไฟฟ้าจากเกตโลหะ (Metal Gate) ที่ซ้อนทับบนชั้นออกไซด์หนาด้านข้าง ผลของบริเวณปลอดพาหะชั้นบาง ๆ นี้ จะป้องกันการเกิดแชนแนลที่ใต้เกต ดังนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันที่เกตมากขึ้น บริเวณปลอดพาหะจะขยายเข้าไปในชั้นสเตรทโทรมกับการเหนี่ยวนำโฮลให้เกิดแชนแนล แต่การขยายนี้จะถูกป้องกันจากบริเวณปลอดพาหะด้านข้าง ดังที่กล่าวมาแล้ว จึงต้องเพิ่มแรงดันให้มากขึ้นเพื่อเอาชนะผลดังกล่าว ดังนั้นแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ความกว้างแชนแนลแคบลงมาก ๆ ในการออกแบบสร้างมอสเฟตให้มีขนาดเล็กที่สุดนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงผลของ Narrow channel ด้วยตามขบวนการสร้างดังที่กล่าวมาแล้ว ขนาดแชนแนลที่แคบที่สุดที่ยังสามารถแสดงคุณสมบัติของมอสเฟตได้ตามความต้องการ นี้มีค่าประมาณ  $40 \mu m$



บทที่ 9

ผลของระยะทางระหว่าง MOSFET 2 ตัวที่ใกล้กัน (Space leakage)

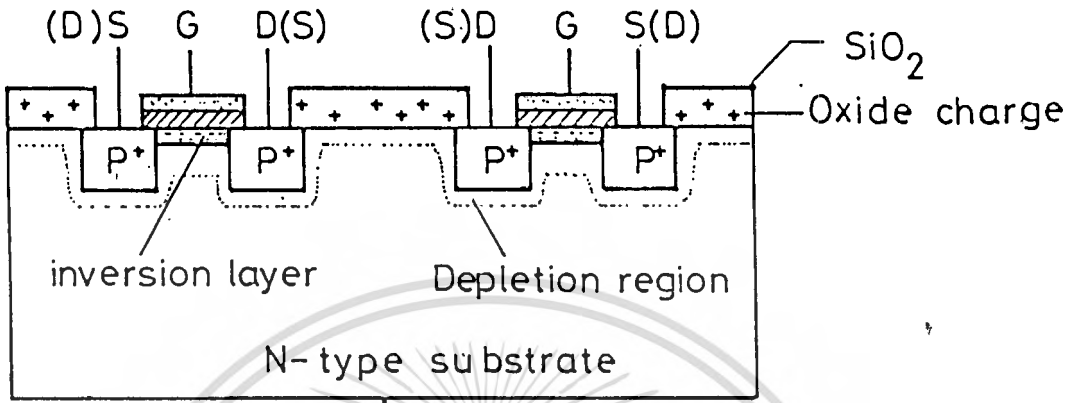
9.1 วัตถุประสงค์

นอกจากปัญหาการลดขนาดของดีไวซ์ให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยไม่เกิดผลของ Short channel effect หรือ Narrow channel effect ภายในตัวดีไวซ์เองแล้ว ในการทำวงจรรวม (IC) ยังต้องคำนึงถึงอิทธิพลของดีไวซ์ข้างเคียงที่มีต่อการทำงานภายในตัวดีไวซ์ด้วย ปัญหาของอิทธิพลของไวซ์ข้างเคียงนั้นจะมีผลต่อกระแส, แรงดัน, สนามไฟฟ้า ฯลฯ

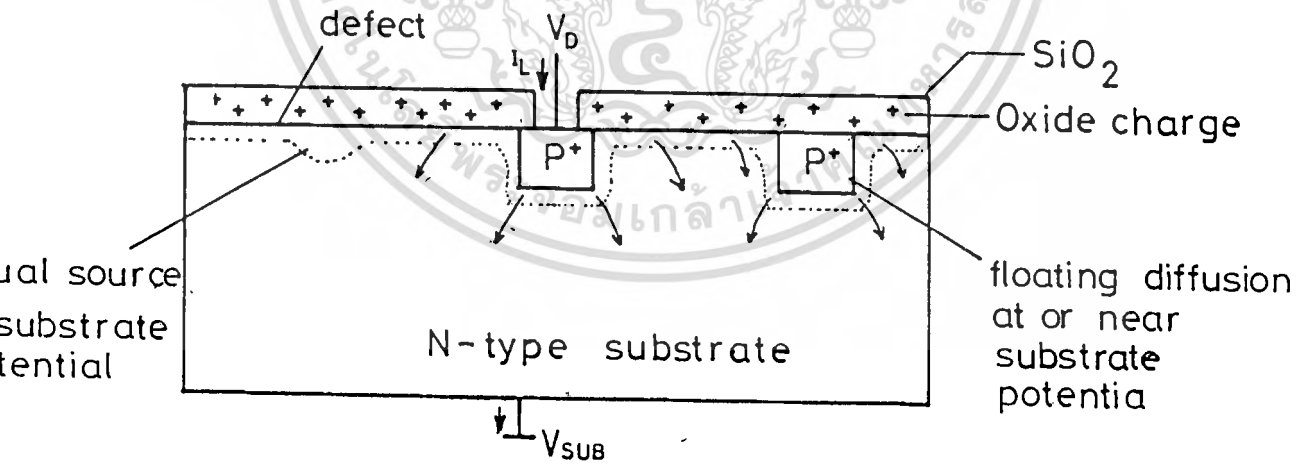
ในบทที่ 9 นี้ เราจะมาพิจารณาเฉพาะผลของกระแสอย่างเดี่ยว ผลของกระแสที่เรียกว่าคือค่ากระแสรั่วไหล (Leakage current) ระหว่างดีไวซ์ข้างเคียง (Neighbour devices) ซึ่งมีสาเหตุมาจากตัวแปรหลายอย่างด้วยกัน จากรูปที่ 9.1 จะเห็นว่าในชั้น  $SiO_2$  จะเกิดประจุบวก (Positive charge) อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของ  $SiO_2$  เอง และโซเดียมไอออน ( $Na^+$ ) ประจุบวกใน  $SiO_2$  จะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลที่บริเวณผิว (Surface leakage) ได้ โดยถ้าดีไวซ์ 2 ตัวที่อยู่ใกล้ ๆ กันนี้ ถูกไบอัสให้แรงดันต่างกัน ซึ่งอาจจะเป็นระหว่างเกนของดีไวซ์ตัวหนึ่งกับเกนของดีไวซ์อีกตัวหนึ่งหรือเกนกับซอสส์ก็ได้ กระแสรั่วไหล ( $I$ -leakage) ซึ่งเป็นกระแสที่เราไม่ต้องการก็จะสามารถไหลไปมาได้ ทำให้ดีไวซ์ 2 ตัวนี้ อาจจะทำงานผิดปกติไปหรือไม่ทำงานก็ได้ ขึ้นกับค่ากระแสเกน ( $I_D$ ) ภายในตัวดีไวซ์ว่ามีค่ามากกว่ากระแสรั่วไหลนี้มากน้อยแค่ไหน ซึ่งในการผลิตวงจรรวมก็จะต้องมีการระบุค่ากระแสเกน ( $I_D$ ) ว่ามีค่าเท่าไรมากกว่ากระแสรั่วไหลเป็นที่เท่าตัว โดยทั่วไปจะตรวจสอบมากกว่าประมาณ 10 เท่าขึ้นไป แต่โดยที่เรากำหนดวิธีการวัดค่าแรงดันวิกฤติในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3 เป็นแบบ  $1 \mu A$  Method ดังนั้นกระแสรั่วไหลที่ยอมรับได้ควรจะมีความไม่เกิน  $0.1 \mu A$

นอกจากกระแสรั่วไหลระหว่างดีไวซ์ข้างเคียงเนื่องจากผลของประจุบวกใน  $SiO_2$  แล้ว ยังมีสาเหตุมาจากตัวแปรอื่น ๆ อีก จากรูป 9.2 จุด defect ต่าง ๆ อันเกิดจากขั้นตอนการสร้างก็มีผลมากโดยเฉพาะดีไวซ์พวก MOSFET จึงต้องระวังเรื่องความสะอาดเป็นอย่างมาก กระแสรั่วไหลอื่น ๆ ก็ได้แก่กระแสรั่วไหลจากขั้วเกนไปฐานรองซึ่งจะไปรบกวนการทำงานของดีไวซ์ข้างเคียงได้เช่นกัน กระแสรั่วไหลส่วนนี้เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.1 ภาวะกระแสรั่วไหลอันเนื่องมาจากคิโพ  
ข้างเคียง ใน MOSIC



รูปที่ 9.2 ภาวะกระแสรั่วไหลใน MOSIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสรั่วไหลผ่านรอยต่อ พี-เอ็น (P-N junction)
- บริเวณที่เกิดชั้นกลับที่เกิดจุด defect ในผลึกซิลิกอน หรือ defect ที่ผิว
- บริเวณที่เกิดชั้นกลับไปเชื่อมต่อระหว่าง แหล่งจ่ายพลังงาน (active source) หรือ ขั้วเดรน (drain region) ต่อกับขั้วเดรน หรือ ตัวรับพลังงาน (inactive source)

ปัญหาของกระแสรั่วไหล ตามที่ได้อธิบายมาแล้วสามารถป้องกันได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่สะดวกและประหยัดที่สุดก็คือการแยกตัวดีไวซ์ แต่ละตัวให้มีระยะห่างกันพอที่จะไม่ไห้กระแสรั่วไหล ไหลผ่านไปยังดีไวซ์ตัวอื่นได้ หรือไหลได้แต่มีปริมาณน้อยมากจนไม่มีผลต่อการทำงานของดีไวซ์ตัวข้างเคียงนั้น ในเมื่อนี้จะได้ทำการศึกษาทดลองหาระยะห่าง (space) น้อยที่สุด ที่ไม่ทำให้เกิดผลเสียดังกล่าว เพื่อที่จะได้จำนวนดีไวซ์ที่มีปริมาณหนาแน่นต่อพื้นที่มากที่สุดที่ยังทำงานได้ตามปกติ

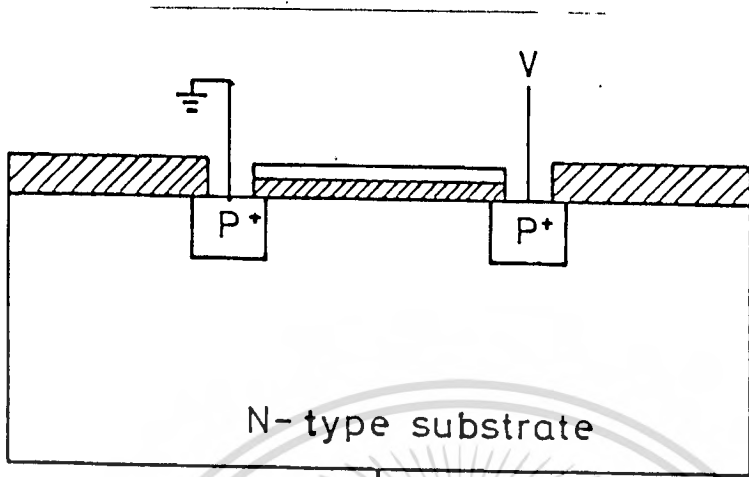
### 9.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบมอสเฟตเพื่อทดลองหาค่ากระแสรั่วไหล (I-leakage) นี้ เราสามารถใช้แบบการทดลองของการทดลอง Short channel effect ในบทที่ 7 รูปที่ 7.3 ได้เลย ซึ่งในนี้ระยะห่างระหว่างเดรนของดีไวซ์ตัวหนึ่งกับซอสของดีไวซ์อีกตัวหนึ่ง ก็คือความยาวแชนแนล (L) ของมอสเฟตแต่ละตัวโดยที่ไม่ได้ให้ไบอัสที่เกท รูปที่ 9.3 ยิ่งกว่านั้นซอสและเดรนยังมีโครงสร้างที่สมมาตรกัน (Symetry) ด้วย จึงอาจพิจารณาระยะดังกล่าวว่าเป็นระยะห่างระหว่างเดรนกับเดรน หรือซอสกับซอสก็ได้ ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นไปตามตารางที่ 7.1 โดยที่ความยาวแชนแนล L คือระยะห่างระหว่างดีไวซ์ 2 ตัว (Space) นั่นเอง

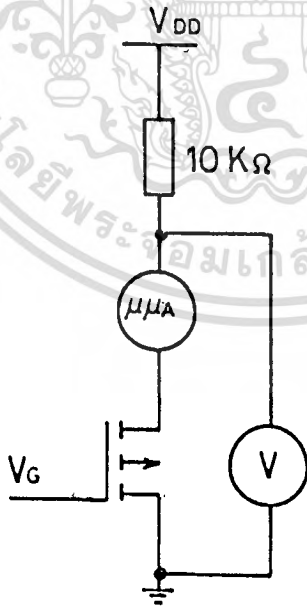
### 9.3 การทดลองและผลการทดลอง

#### 9.3.1 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับความยาวของระยะห่าง(L)

ทำการทดลองโดยวงจร ตามรูป 9.4 ให้แรงดัน  $V_{DD} = 1V$  ความต้านทาน  $10\ k\Omega$  ทำหน้าที่กำหนดขีดจำกัดกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต ไมโคร ไมโครแอมป์มิเตอร์ ( $\mu A$ ) ใช้วัดค่ากระแสรั่วไหล โดยต่อยุ่หลังโวลท์มิเตอร์ (V) ทั้งนี้ก็เพราะว่าเวลามอสเฟตไม่มีไบอัสที่เกท ความต้านทานระหว่างเดรนกับซอสมีค่าสูงมาก ( $>M\Omega$ ) แต่ถ้าเอาโวลท์มิเตอร์มาต่อหลังแอมป์มิเตอร์



รูปที่ 9.3 โครงสร้างทดสอบอิทธิพลของคิ ร์ชชางเคียง



รูปที่ 9.4 วงจรการทดลองวัดค่ากระแสรั่วไหล (Space leakage)

ระหว่างคิ ร์ช 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช่ว่าจะนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้กระแสที่วัดได้นั้นเป็นค่ากระแสรวมระหว่างกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตกับกระแสที่ไหลผ่านโวลทมิเตอร์ ทำการ วัดค่ากระแสรั่วไหล ที่ความยาวของระยะห่างมีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 10  $\mu\text{m}$  - 140  $\mu\text{m}$  นำข้อมูลที่วัดได้นั้นไปพล็อตกราฟระหว่าง I-Leakage กับ L

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในกราฟรูปที่ 9.5 พบว่าเมื่อระยะห่าง (L) ระหว่างคีโวจี 2 ตัว มีค่ามาก ค่ากระแสรั่วไหลเฉลี่ยมีค่าน้อยและ เมื่อระยะห่างระหว่างคีโวจีมีค่าน้อยลง ค่ากระแสรั่วไหลจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย แสดงว่า ค่ากระแสรั่วไหลแปรผกผันกับ ระยะห่างของคีโวจี ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_L \propto \frac{1}{L}$$

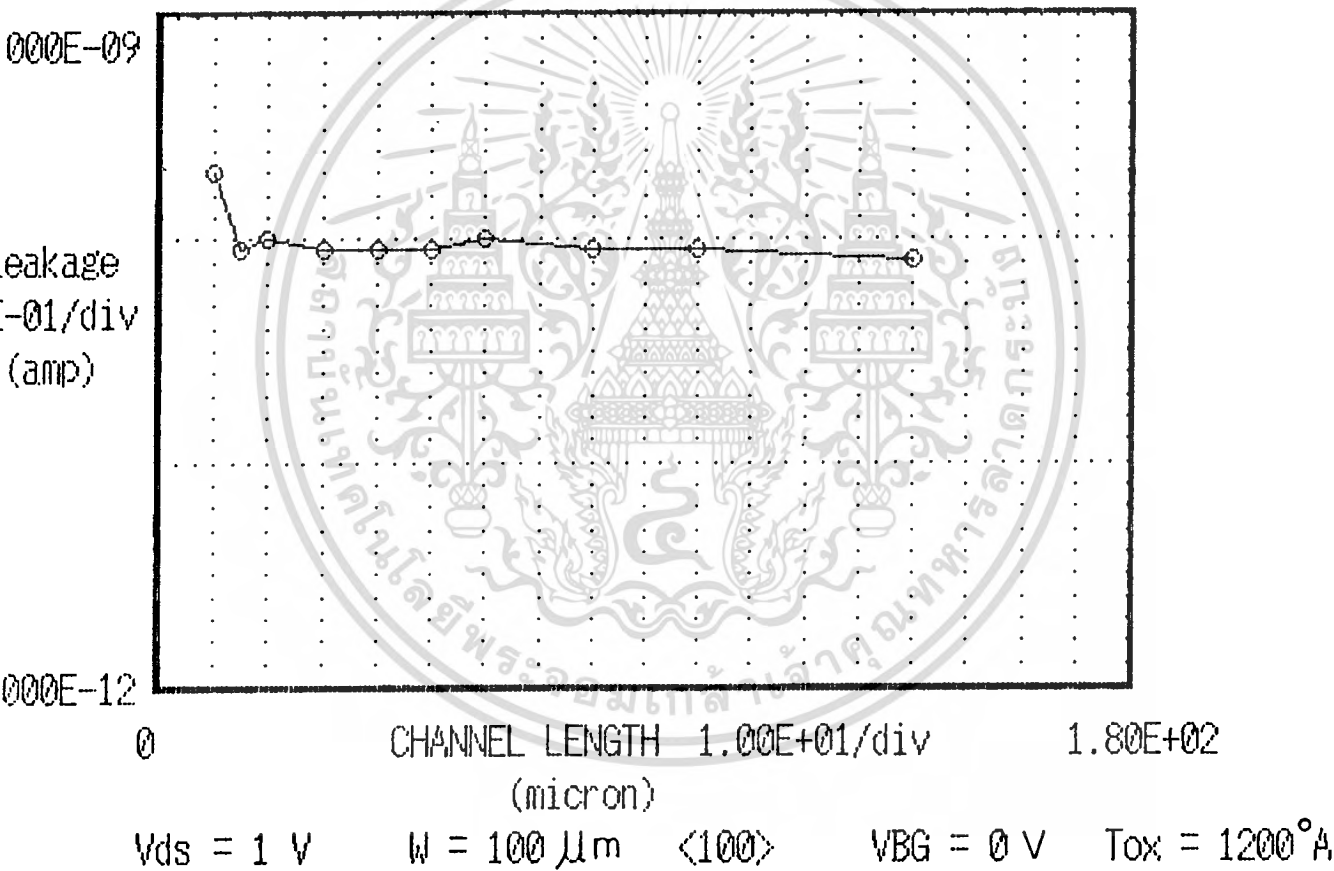
ค่ากระแสรั่วไหลนั้นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก มีค่าเฉลี่ยประมาณ 100 pA ตลอดระยะห่าง 15  $\mu\text{m}$  - 140  $\mu\text{m}$  แต่ที่ระยะห่าง 10  $\mu\text{m}$  ค่ากระแสรั่วไหลเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 100 pA มาก (ประมาณ 200-300 pA) อันเนื่องมาจากผลของบริเวณปลดกพาหะ (depletion region) ของเกรนของคีโวจีตัวหนึ่งกับขอสของคีโวจีอีกตัวหนึ่ง ขยายกว้างออกมาทำให้มีผลต่อระยะห่าง เมื่อค่าระยะห่างนี้มีค่าใกล้เคียงกับความกว้างของบริเวณปลดกพาหะแล้วจะทำให้เกิดปรากฏการณ์คล้ายกับผลของ short channel effect ในปีที่ 7

9.3.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับความแตกต่างของแรงดันระหว่างคีโวจี 2 ตัว ( $V_{DS}$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 9.4 โดยมีระยะห่างระหว่างคีโวจี 2 ตัว L เป็น 20  $\mu\text{m}$  ความต้านทาน 10 k $\Omega$  ที่ใช้จะทำหน้าที่จำกัดค่ากระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต สำหรับไมโครไมโคร แอมป์มิเตอร์ให้ต่อหลังโวลทมิเตอร์ ทำการทดลองโดยปรับแรงดัน  $V_{DD}$  เพื่อให้แรงดัน  $V_{DS}$  ที่ตกคร่อมมอสเฟตมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.5v - 30v (ที่ใช้แรงดัน  $V_{DS}$  แค 30 v สูงสุดเพราะค่าแรงดันพังทะลาย (Break down Voltage) ของมอสเฟตนี้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 70 v และในการนำคีโวจีไปใช้งาน ในวงจรรวม ก็ไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันมากกว่า 30 v ยิ่งกว่านั้นวงจรรวมของมอสเฟตยังไม่มีข้อเด่นในเรื่องของกำลังสูงอีกด้วย)

### DATA PLOTTER (P-ch)

## I : LEAKAGE-CHANNEL LENGTH RELATION



รูปที่ 9.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล (I-Leakage) กับความยาวของระยะทาง (L)

## นำข้อมูลจากการวัดไปพล็อตกราฟระหว่างกระแสรั่วไหล (I-Leakage) กับแรงดัน ( $V_{DS}$ )

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 9.6 จากกราฟผลการทดลองพบว่าค่ากระแสรั่วไหลนี้ขึ้นกับแรงดัน โดย

$$I_L \propto V_{DS}$$

ที่แรงดัน  $V_{DS}$  เท่ากับ 0.5V มีค่ากระแสรั่วไหลประมาณ 50 pA และเมื่อเพิ่มแรงดัน  $V_{DS}$  กระแสรั่วไหลก็จะเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มของกระแสรั่วไหลนี้ไม่ลิเนียร์ตลอดเช่นที่แรงดัน  $V_{DS}$  ต่ำกว่า 0.6V กระแสรั่วไหลจะมีค่าคงที่ซึ่งเป็นกระแสรั่วไหลที่ผิว และเมื่อเพิ่มแรงดัน  $V_{DS}$  ใหม่มากกว่า 0.6 V กระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะบริเวณพลาสมาที่แคบกับขั้วสเตรนจ์แคบอยู่ แต่เมื่อเพิ่ม  $V_{DS}$  จนถึงหนึ่ง (>3V) สโลจะลดลงอันเนื่องมาจากบริเวณพลาสมาขยายออกไป ทำให้กระแสรั่วไหลผ่านได้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มแรงดัน  $V_{DS}$  ถึง 30 V ทำการวัดค่ากระแสรั่วไหลได้ 0.1  $\mu A$  แต่จากการวัดแรงดันวิกฤติแบบ 1  $\mu A$  Method ซึ่งหมายถึงกระแส ณ จุด  $V_T$  มีค่า 1  $\mu A$  ซึ่งมากกว่ากระแสรั่วไหลถึง 10 เท่า

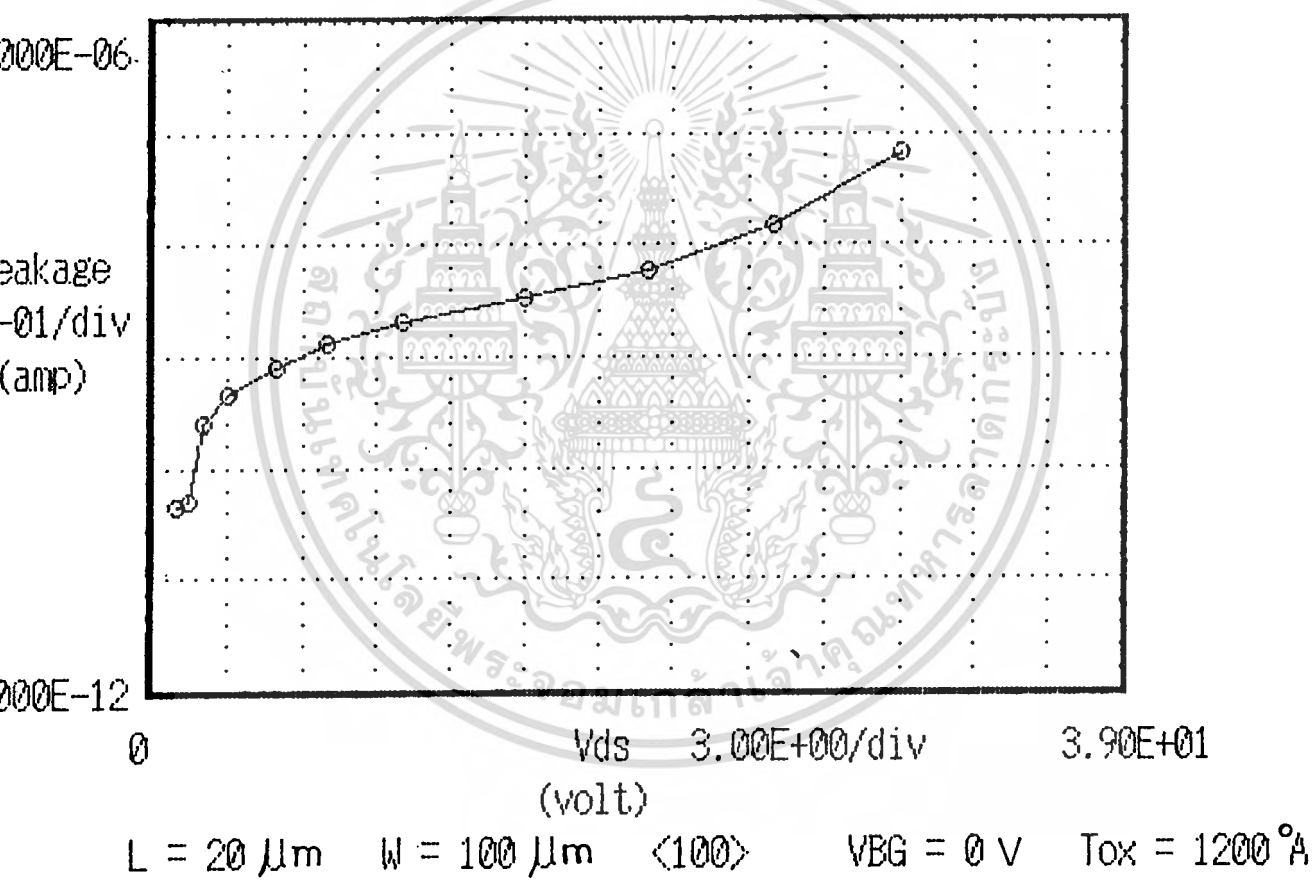
ดังนั้นกระแสรั่วไหลที่แรงดัน  $V_{DS}$  ตั้งแต่ 0V ถึง 30 V นี้ จึงเป็นค่ายอมรับได้โดยที่วงจรรวมยังทำงานได้ตามปกติ

### 9.4 สรุปผลการทดลอง

ในการออกแบบทดลองวัดค่ากระแสรั่วไหลที่ขึ้นกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ปรากฏว่าผลการทดลองในหัวข้อ 9.1 ที่ระยะทางของคิไวซ์ 2 คิวตั้งแต่ 10  $\mu m$  ขึ้นไป ที่แรงดัน  $V_{DS}$  1V มีค่ากระแสรั่วไหลน้อยกว่า 0.1  $\mu A$  ดังนั้นที่แรงดันค่านี้เราสามารถสร้างคิไวซ์ให้มีระยะไกลเคียงกับ 10  $\mu m$  ได้ แต่เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่าง ๆ เช่นการแพร่คานข้างของสารเจือ เป็นต้น และความปลอดภัยในการสร้าง ตลอดจนเปอร์เซ็นต์ที่คิไวซ์มีโอกาสจะใช้งานได้ดี (yield) แล้ว ในการทดลองที่ 9.3.2 เราจึงเลือกที่จะทดสอบคิไวซ์ที่ 20  $\mu m$  เนื่องจากมีค่ากระแสรั่วไหลน้อยกว่า 0.1  $\mu A$  แม้ว่าแรงดัน  $V_{DS}$  จะมีค่าถึง 30 V ก็ตาม ซึ่งนับว่ามากพอในการใช้งานแล้ว เราจึง

## DATA PLOTTER (P-ch)

### I-LEAKAGE-V<sub>ds</sub> RELATION



รูปที่ 9.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับแรงดัน ( $V_{DS}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยข้อสรุปว่าในการสร้างดีไวซ์หลายตัวในลักษณะของวงจรรวม โดยไม่เกิดผลลាក់กระแสรั่วไหลจาก ดีไวซ์ข้างเคียงแล้ว .ควรจะสร้างให้ห่างกัน  $20 \mu m$  จะทำให้ได้จำนวนดีไวซ์ต่อพื้นที่มากที่สุด โดยมี yield สูงสุด

นอกจากวิธีการป้องกันกระแสรั่วไหล โดยใช้ระยะห่างกันมากพอระหว่างดีไวซ์ 2 ตัวแล้ว ยังมีวิธีอื่นที่น่าสนใจ ได้แก่

1. การใช้การคริง (guardring) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ

1.1 แบบ ใช้  $N^+$  guardring

วิธีนี้ใช้สารเจือชนิดตรงกันข้ามกับชนิดของแชนแนลมาปกป้องกัน จากรูปโครงสร้างรูปที่ 9.7 guardring จะทำหน้าที่ป้องกันกระแสรั่วไหลได้ ถ้าเกิดชั้นนกลัมชั้นในบริเวณอื่นนอกจากแชนแนลซึ่งเราไม่ต้องการ  $N^+$  จะตัดส่วนของชั้นนกลัมนั้นได้ เนื่องจาก  $N^+$  เป็นสารเจือมีอิเล็กตรอนอยู่มากจะรวมตัวกับประจุบวกในชั้นนกลัมนั้น (recombination) ทำให้ส่วนนั้นไม่มีประจุบวกเหลืออยู่ ชั้นนกลัมจึงถูกตัดขาดออกไป วิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องเพิ่มขั้นตอนในการแพร่สารเจือชนิด  $N^+$  ด้วย

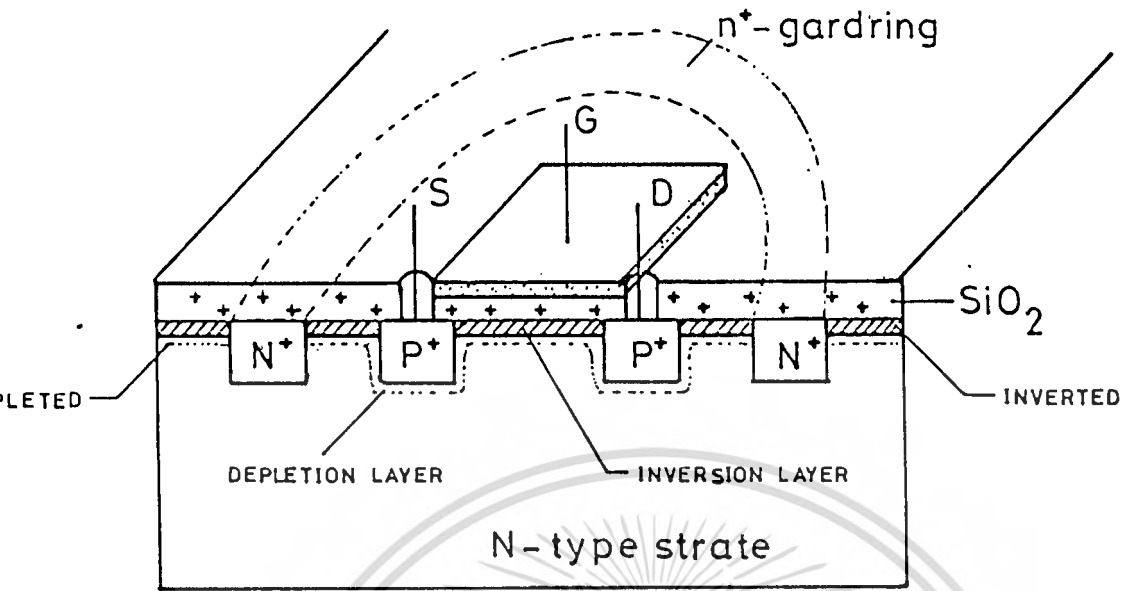
1.2 แบบ  $P^+$  guardring

วิธีนี้จะใช้สารเจือชนิดเดียวกับแชนแนล จากรูปที่ 9.8 จะเห็นว่าแบบนี้ทำได้สะดวกและประหยัดกว่าเพราะอาศัยการแพร่ด้วยสารเจือชนิดเดียวกับที่สร้างส่วนขอสและแคเรน จึงไม่ต้องเพิ่มขั้นตอนเหมือนแบบแรก แต่จะต้องใช้ไบอัสไฟการคริง โดยจคไบอัสย้อนกลับระหว่างรอยต่อ P-N ของการคริงกับขั้วสเตรท เช่น ถ้าตอการคริงกับกราวด์ ขั้วสเตรทจะต้องต่อกับแรงคั้นที่สูงกว่ากราวด์ ( $V_{sub}$ ) เพื่อให้เกิดการไบอัสย้อนกลับขึ้น ทำให้บริเวณปลดตพหะที่รอยต่อ P-N ของการคริงกับขั้วสเตรท ขยายกว้างออกมาเป็นเหตุให้เกิด ทำการตัดส่วนของชั้นนกลัมที่ไม่ต้องการออกไปได้ แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียคือต้องเพิ่มแหล่งจ่ายพลังงานอีกหนึ่งขุด ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้น และมีกระแสรั่วไหลระหว่างการคริงกับขั้วสเตรทเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปรบกวนการทำงานของวงจรรด้วย

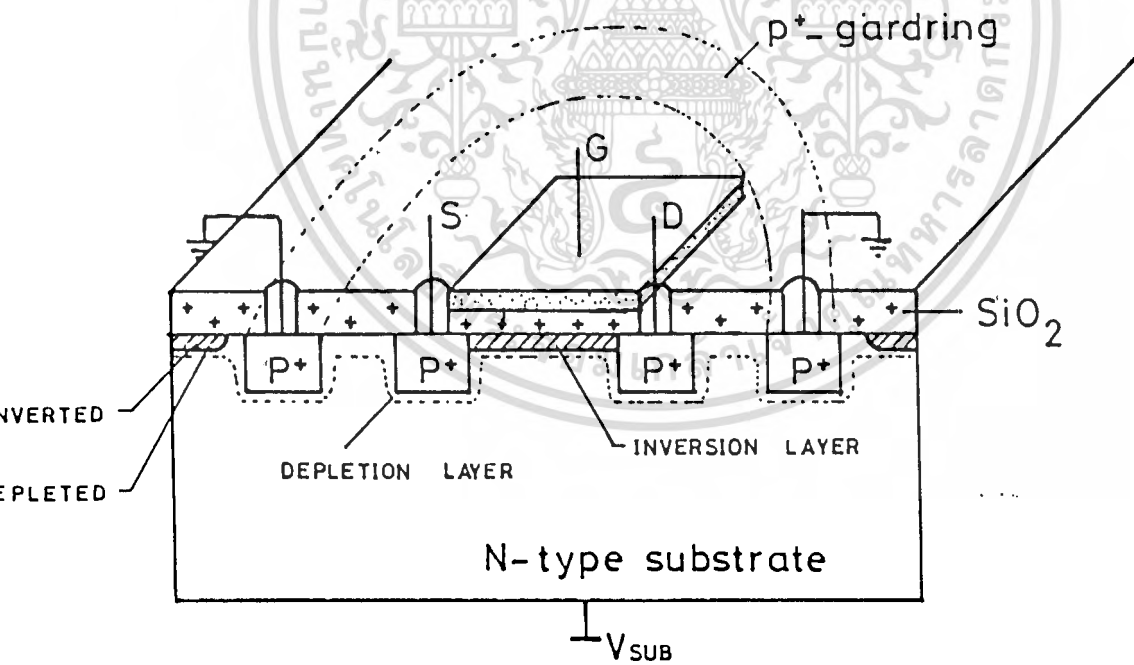
2. การใช้ชั้นแยก (Isolation)

วิธีนี้จะใช้แผ่นขั้วสเตรทชนิดเดียวกับที่จะสร้างแชนแนล แล้วสร้างชั้นแยกขึ้นมา จากรูปที่ 9.9 เช่น ถ้าเป็นแบบ P-channel ก็จะใช้แผ่น P-type substrate แล้วทำการแพร่สารเจือเพื่อสร้างชั้นแยก  $N^-$  ตอจากนั้นจะทำการแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนขอสและแคเรน ( $P^+$ ) ส่วนชั้นแยกกับขั้วสเตรท จะถูกไบอัสย้อนกลับ โดยตอชั้นแยกลงกราวด์แล้วส่วนขั้วสเตรทจะต้องต่อกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

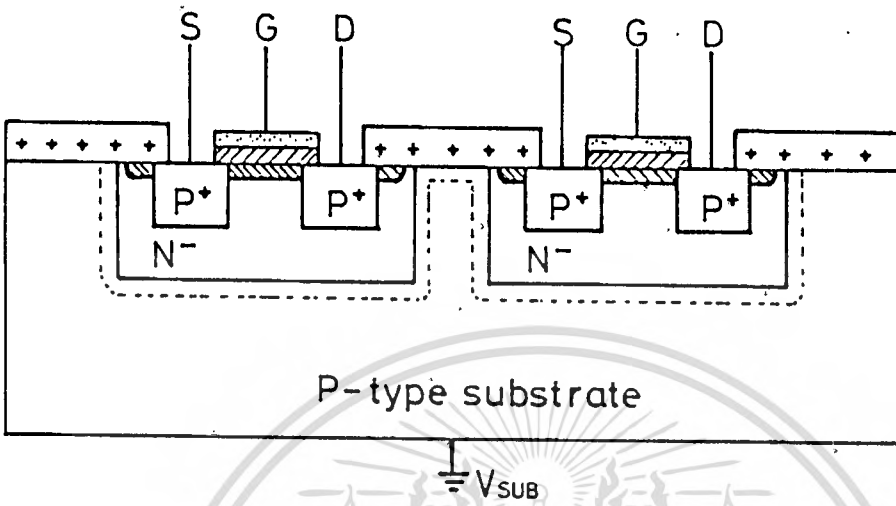


รูปที่ 9.7 P-channel n+ gardring



รูปที่ 9.8 P-channel p+ Gardring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.9 การใช้ชั้นแยก (Isolation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ต่ำกว่ากราวด์ ( $-v_{sub}$ ) เพื่อให้เกิดบริเวณลอคพาหะขยายกว้างออกมา บริเวณลอคพาหะจะช่วยค้ำส่วนที่เกิดชั้นกลับในบริเวณที่ไม่ต้องการ วิธีนี้จึงนับว่าเป็นวิธีที่ป้องกันกระแสรั่วระหว่างมอสเฟตตัวข้างเคียงได้เป็นอย่างดี แต่วิธีนี้มีความสิ้นเปลืองมากที่สุด เพราะต้องเปลืองทั้งขั้นตอนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างชั้นแยก  $n^-$  และยังต้องให้ไบอัสย้อนกลับแกรอยค่อ P-N ของชั้นแยกกับชั้นสเตอร์ทอีกด้วย

ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่นิยมใช้สำหรับ MOS IC ทั่วไปแต่จะไปนิยมใช้เฉพาะพวก CMOS IC (Complementary MOS IC) เนื่องจากต้องสร้างชั้นแยกอยู่แล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10

กระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส (Subthreshold current)

10.1 วัตถุประสงค์

ในบทที่ 9 เราได้กล่าวถึงกระแสรั่วไหล ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของดีไวซ์ข้างเคียงแล้ว ซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะจะไปรบกวนการทำงานของดีไวซ์อื่นในวงจรรวม

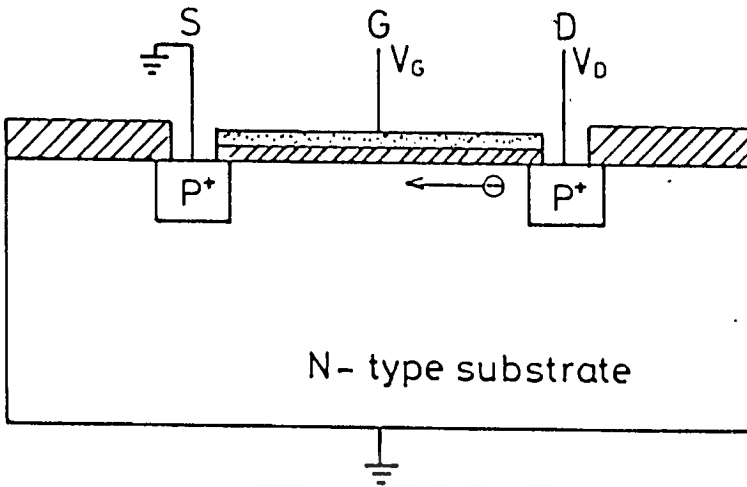
นอกจากนี้แล้วยังมีกระแสอีกตัวหนึ่ง ที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้นคือกระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแสซึ่งเกิดขึ้นภายในดีไวซ์เอง จากรูปที่ 10.1 โดยการทำงานในทางอุดมคติของมอสเฟตนั้น ก่อนที่แรงดันไบอัสที่ให้แก่เกตจะถึงค่าแรงดันวิกฤติ (threshold voltage) กระแสเดรนจะไม่สามารถไหลผ่านไปได้เพราะความต้านทานของแชนแนลมีค่าสูงมาก แท้จริง ๆ แล้วจะเกิดกระแสรั่วไหลไหลผ่านไประหว่างเดรนกับซอร์สได้ กระแสรั่วไหลนี้เป็นกระแสที่เราไม่ต้องการซึ่งเรียกว่า Subthreshold current ( $I_{sub}$ ) ถ้ากระแสมีค่าสูงมากจะทำให้มอสเฟตอยู่ในภาวะ ON ตลอดเวลา ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ กระแสรั่วไหลนี้ต้องมีค่าน้อยพอที่จะยอมรับได้ เช่นเดียวกันกับในบทที่ 9 ที่กำหนดให้กระแสรั่วไหลระหว่างดีไวซ์ 2 ตัวมีค่าไม่เกิน  $0.1 \mu A$  เพราะใช้การวัดค่าแรงดันวิกฤติแบบ  $1 \mu A$  Method ดังนั้นค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) นี้จึงควรมีค่าไม่เกิน  $0.1 \mu A$  หรือน้อยกว่าจุดเริ่มนำกระแส (threshold) 10 เท่า เช่นกัน

สาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) มีค่าสูง มีด้วยกันหลายสาเหตุดังนี้

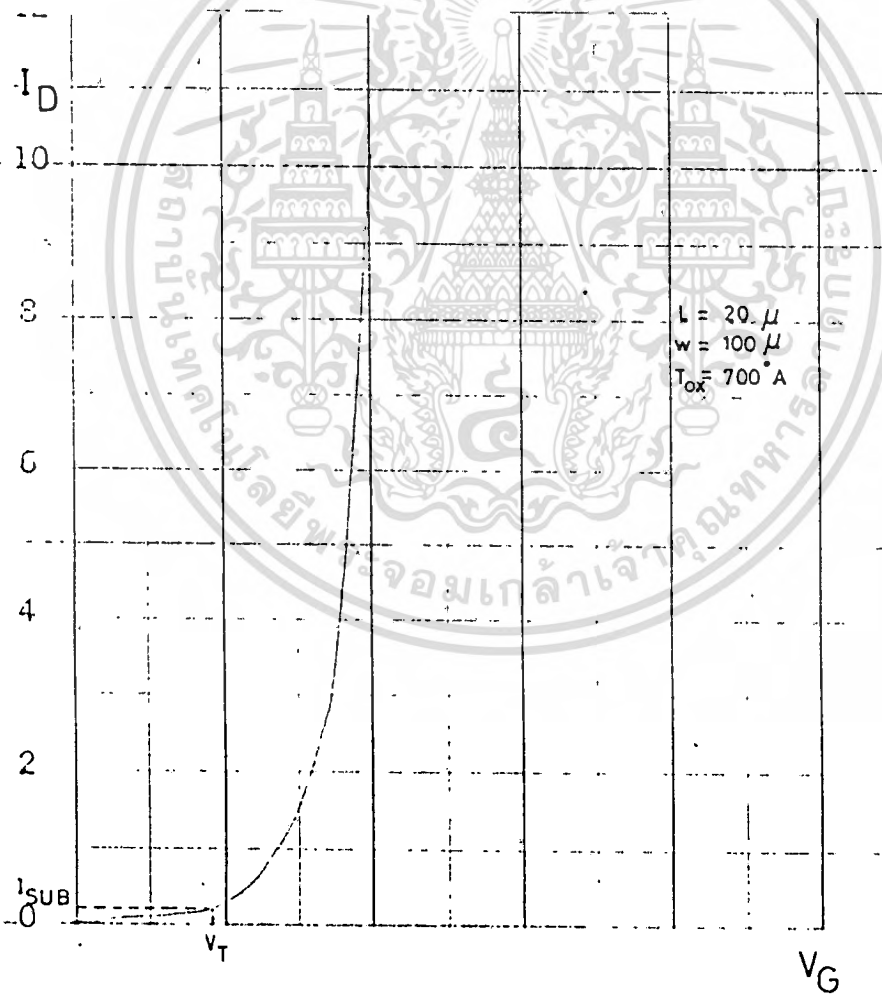
- ประจุบวกใน  $SiO_2$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ  $SiO_2$  เอง รวมทั้งโซเดียมไอออน ( $Na^+$ )
- จุด defect ต่าง ๆ ทั้งที่ผิวสัมผัสของ Si กับ  $SiO_2$  และ defect ในเนื้อซิลิกอน
- กระแสรั่วที่รอยต่อ P-N
- ความต้านทานในเนื้อซิลิกอนน้อยเกินไป

รูปที่ 10.2 แสดงค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) ที่ปรากฏในช่วงแรงดันต่ำกว่า  $V_T$  ซึ่งเป็นค่าแรงดันวิกฤติ เมื่อนำค่ากระแสรั่วไหลนี้ไปพล็อตกราฟกับแรงดันที่เกต ( $V_G$ ) ที่แรงดันเดรน ( $V_D$ ) มีค่าต่างๆ กันจากรูปที่ 10.3 จะพบว่า แรงดัน  $V_G$  จะมีอิทธิพลต่อปริมาณกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

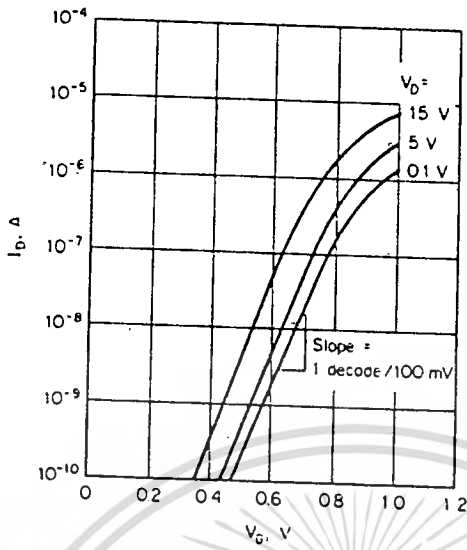


รูปที่ 10.1 กระแสรั่วไหล Sub threshold current

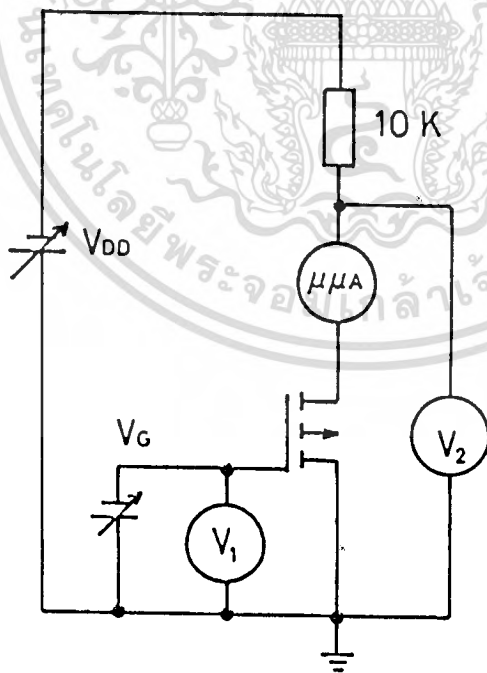


H : 1V/div ; v : 0.01 MA/div

รูปที่ 10.2 Sub threshold current ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_D$  กับ  $V_G$   
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Sub Threshold current กับ  $V_G$



รูปที่ 10.4 วงจรการทดลองวัดค่าที่กระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าแรงดัน  $v_D$  โดยค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) จะเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่า เมื่อ  $v_G$  เปลี่ยนไป 100 mv - 200 mv สำหรับกระแสรั่ว ( $I_{sub}$ ) นี้จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามสมการที่ (2.32) ในตอนที่ 2

$$I_{sub} = I_D = \frac{W}{L} \mu_{ps} C_o \frac{1}{m} \left( \frac{nKT}{q} \right)^2 \exp \left[ \frac{q}{nKT} (v_G - v_T + \frac{nKT}{q}) \right] \cdot [1 - \exp(-\frac{mq}{nKT} v_D)] \quad \dots(2.32)$$

$$I_{sub} = I_o \exp \left[ q \left( \frac{v_G - v_T}{nKT} \right) \right] ; v_G \leq v_T \quad \dots(2.33)$$

เมื่อ

$$I_o = \frac{W}{L} \mu_{ps} C_o \frac{1}{m} \left( \frac{nKT}{q} \right)^2 \quad \dots(2.34)$$

ในการสร้างวงจรรวมเราต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อป้องกันไม่ให้ Subthreshold current ไปมีผลต่อการทำงานของมอสเฟต ดังนั้นกระแสรั่วไหลควรมีค่าน้อยกว่ากระแสเทรนในภาวะ ON 10 เท่า เพื่อที่จะแยกสภาวะ ON-OFF ของมอสเฟต นอกจากนี้แรงดันวิกฤติ  $v_T$  ควรมีค่าสูงพอที่จะไม่เกิดผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ ซึ่งโดยปกติจะให้  $v_T > 10 \frac{kT}{q}$  ที่อุณหภูมิห้องและ Supply ที่ใช้ควรมากกว่า  $v_T$  ประมาณ 3 เท่าตัว ( $\cong 3 v_T$ )

ในตอนที่ 2 ได้ทำการทดลองวัดค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) และวิธีป้องกันเพื่อจำกัดกระแสรั่วไหล ให้มีค่าน้อยเพียงพอก็จะยอมรับได้

### 10.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบมอสเฟตเพื่อทดลองหาค่ากระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส (Sub-

threshold current) นี้ ใช้แบบการทดลองของ Short channel effect ในเมทที่ 7 รูปที่ 7.3 ทดลองวัดค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) ได้เลย โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 7.1

### 10.3 การทดลองและผลการทดลอง

#### 10.3.1 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) กับความยาวแชนแนล (L)

ทำการทดลองโดยวงจรการทดลองตามรูปที่ 10.4 ให้แรงดัน  $V_G = 1\text{ V}$  แรงดัน  $V_{DD}$  จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อให้เกิดแรงดันตกคร่อมมอสเฟต  $V_{DS}$  มีค่า 1 V และ 10 V ความต้านทาน 10 kΩ มีหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตไม่ให้เกินค่าสูงสุดที่มอสเฟตทนได้ ไมโครไมโครแอมป์มิเตอร์ ( $\mu\text{A}$ ) ใช้สำหรับวัดกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) โดยต่ออยู่หลังจากโวลท์มิเตอร์  $V_2$  ซึ่งทำหน้าที่วัดแรงดันระหว่างเกตกับซอส ( $V_{GS}$ ) โวลท์มิเตอร์  $V_1$  ใช้วัดแรงดันที่เกต ( $V_G$ ) ทำการวัดค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) ที่ความยาวแชนแนลต่าง ๆ กันตั้งแต่ 10  $\mu\text{m}$  - 140  $\mu\text{m}$  นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง  $I_{sub}$  กับ L

#### ผลการทดลอง

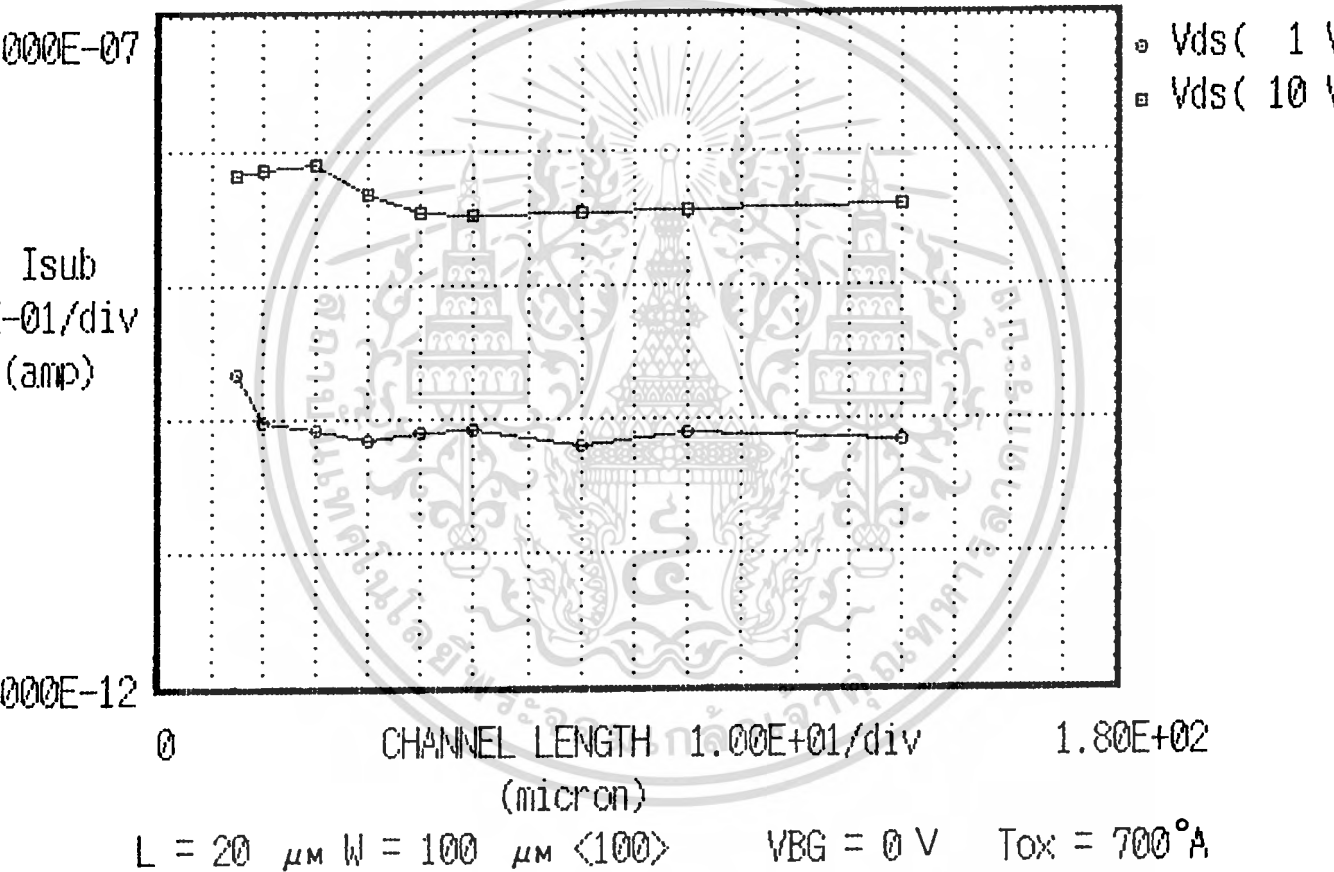
ผลการทดลองวัดค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับ L แสดงได้ในกราฟรูปที่ 10.5 ที่แรงดัน  $V_{DS} = 1\text{ V}$  กระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) จะขึ้นอยู่กับความยาวแชนแนล (L) โดยกระแสรั่วไหลนี้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความยาวแชนแนลสั้นลง ซึ่งมีค่ากระแสรั่วไหลเฉลี่ยประมาณ 100 pA ความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนแสดงได้เป็น

$$I_{sub} \propto \frac{1}{L}$$

แต่ที่ความยาวแชนแนลมีค่า 15  $\mu\text{m}$  จะเห็นว่าค่ากระแสเพิ่มสูงขึ้นเป็นประมาณ 200 pA ปรากฏการณ์นี้เกิดจาก Short channel effect ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในเมทที่ 7 และที่ความยาวแชนแนล (L) มีค่า 10  $\mu\text{m}$  กระแสจะไหลสูงมากเนื่องจากแชนแนลเกิด Short กันแล้ว ดังนั้นจึงไม่นำข้อมูลมาแสดงในกราฟและเมื่อปรับแรงดัน  $V_{DD}$  ให้แรงดัน  $V_{DS}$  เป็น = 10 V ปรากฏว่ากระแสรั่วไหล:

# DATA PLOTTER (P-ch)

## I : SUB-Channel Length RELATION



รูปที่ 10.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ )

กับความยาวแชนแนล (L) ที่แรงดันเกต ( $V_G$ ) = 1 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีก 2 ระดับ (order) โดยค่ากระแสเฉลี่ยมีค่าประมาณ 6 nA ซึ่งที่แรงดัน  $V_{DS}$  มีค่าสูงนี้ปรากฏการณ์ของ short channel effect จะเริ่มเกิดที่ความยาวแขนแนลมีค่า 30  $\mu\text{m}$  โดยมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นเป็น 10 nA แต่อย่างไรก็ตามที่แรงดัน  $V_{DS} = 1\text{V}$  และ 10 V ค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) มีค่าน้อยกว่า 0.1  $\mu\text{A}$  ยิ่งคงซึ่งเป็นค่าที่เรากำหนดว่าเป็นค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่ยอมรับได้ในการทดลองครั้งนี้

ดังนั้น เกี่ยวกับปัญหาของค่ากระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) นี้สามารถสร้างมอสเฟตใหม่ที่มีความยาวแขนแนลได้ถึง 15  $\mu\text{m}$

### 10.3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันที่เกต ( $V_G$ )

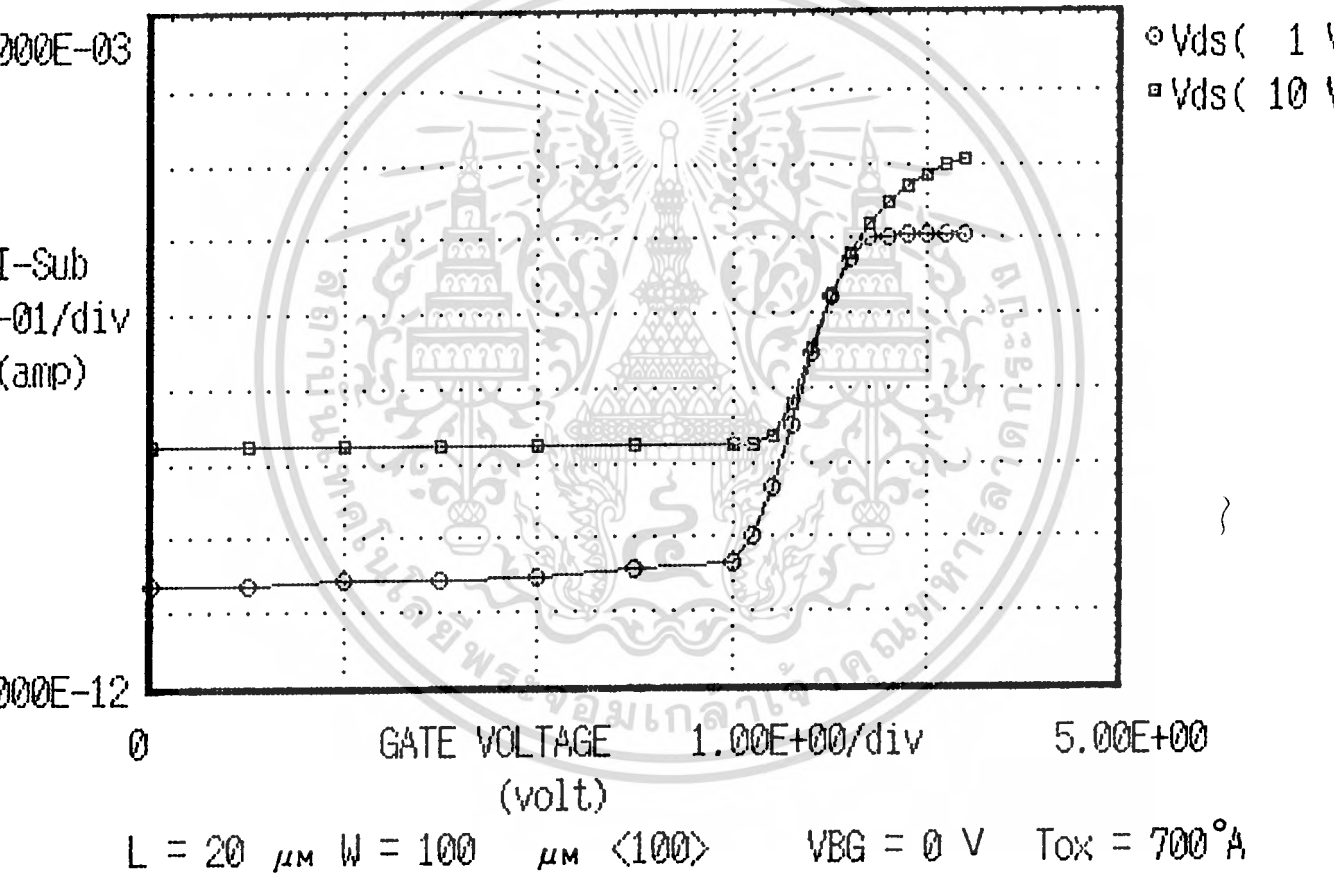
ทำการทดลองโดยดอวงจรการทดลองตามรูปที่ 10.4 โดยวัดที่ความยาวแขนแนล ( $L$ ) 20  $\mu\text{m}$  ความกว้างแขนแนล ( $w$ ) = 100  $\mu\text{m}$  ความหนาของเกตออกไซด์ทั้ง 2 ค่าคือ 700  $\text{\AA}$  และ 1200  $\text{\AA}$  ปรับแรงดัน  $V_{DD}$  เพื่อให้แรงดัน  $V_{DS} = 1\text{V}$  และ 10 V ตามลำดับนำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันเกต ( $V_G$ )

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองวัดค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันเกต ( $V_G$ ) แสดงได้ในรูปที่ 10.6 เมื่อความหนาของเกตออกไซด์ 700  $\text{\AA}$  รูป 10.7 เมื่อความหนาเกตออกไซด์ 1200  $\text{\AA}$  ที่ความหนาเกตออกไซด์ 700  $\text{\AA}$  มีค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ประมาณ 3.5 V (ที่จุดนำกระแส 1  $\mu\text{A}$ ) เมื่อความหนาเกตออกไซด์ 1200  $\text{\AA}$  มีค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ประมาณ 4.5 V ซึ่งผลการทดลองทั้ง 2 ให้ผลคล้ายกันโดย ที่แรงดันเกตค่า ๆ ( $V_G \leq V_T$ ) เมื่อแรงดัน  $V_{DS} = 1\text{V}$  กระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) มีค่าประมาณตั้งแต่ 40 pA และที่แรงดัน  $V_{DS} = 10\text{V}$   $I_{sub} = 20\text{ nA}$  แต่เมื่อให้แรงดัน  $V_G$  มากกว่าค่า  $V_T$  เพียงเล็กน้อยแล้ว ( $> 3\text{V}$ ) ค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าสโลปชันขึ้น ซึ่งเป็นบริเวณจุดโค้ง  $V_T$  ในรูปที่ 10.2 เมื่อเลยจุดแรงดันวิกฤติไปแล้ว สโลปจะเริ่มตกลงเข้าสู่บริเวณไตรโอด (Triode region) กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตนี้ก็คือกระแสเดรน ( $I_D$ ) นั่นเอง โดยที่แรงดัน  $V_{DS} = 1\text{V}$  นี้ กระแส  $I_D$  มีค่าไม่ถึงบริเวณอิ่มตัว (Saturation region) ดังนั้นไม่ว่าจะเพิ่มแรงดัน  $V_G$  เท่าไร กระแส  $I_D$  ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงเลย จากรูปที่ 10.8, 10.9 จะเห็นว่าเมื่อ  $V_{DS}$  มีค่าน้อยกว่า  $V_p$  (pinch

# DATA PLOTTER (P-ch)

## I : SUB-GATE VOLTAGE RELATION

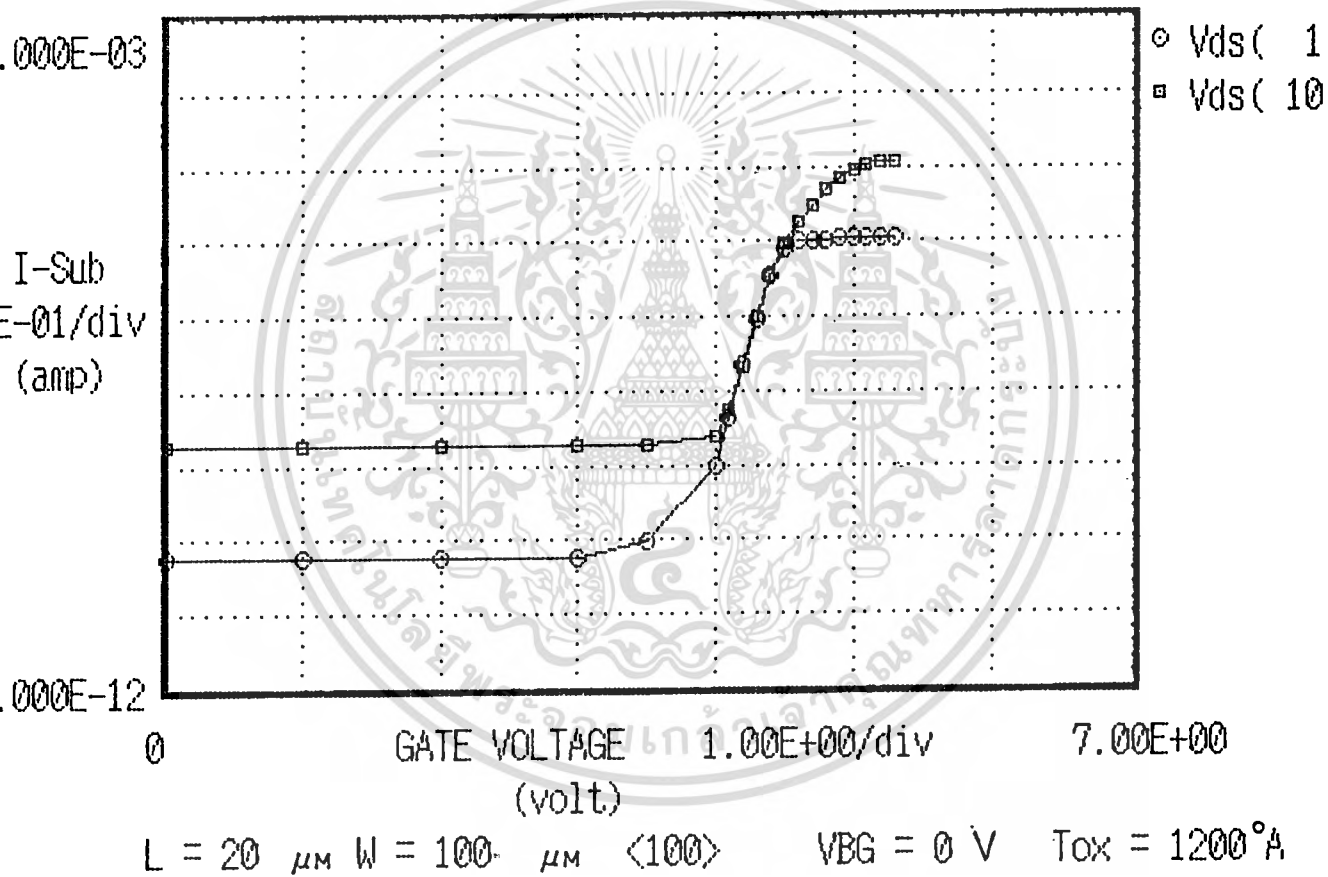


รูปที่ 10.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันที่เกต ( $V_G$ ) ที่  $T_{ox} = 700^\circ A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

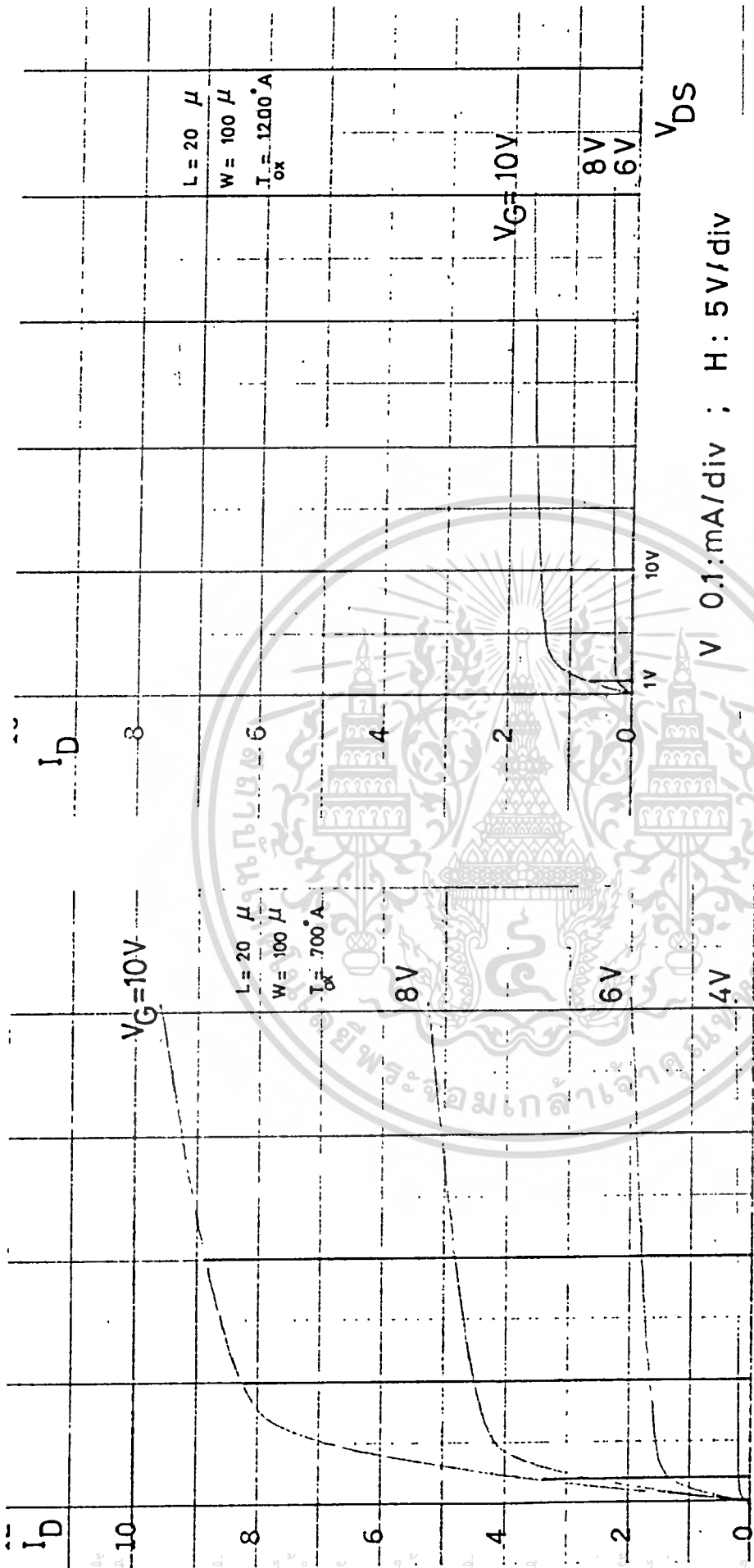
# DATA PLOTTER (P-ch)

## I : SUB-GATE VOLTAGE RELATION



รูปที่ 10.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันที่เกต ( $V_G$ )  
 ที่  $T_{ox} = 1200^{\circ}A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.8 Curve การทำงาน P-channel Enhancement Mode MOSFET

V: 0.1 mA/div ; H: 5V/div

รูปที่ 10.9 curve การทำงานของ P-channel Enhancement

ความยาวแชนแนล (L) 20 μm ความกว้างแชนแนล (W) 100 μm

ความหนาเทออกไซด์ 700 Å

ความยาวแชนแนล (L) 20 μm ความกว้างแชนแนล (W) 100 μm

ความหนาเทออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 1200 Å

off voltage) มาก ๆ กระแส  $I_D$  จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยน  $v_G$  แต่ที่แรงดัน  $v_{DS} = 10\text{ V}$  ซึ่งมากกว่าค่า  $v_P$  มอสเฟตมีค่ากระแส  $I_D$  ถึงจุดอิ่มตัวได้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มแรงดัน  $v_{DS}$  มากขึ้น กระแส  $I_D$  ก็จะเพิ่มขึ้นอีก ดังกราฟรูปที่ 10.6 และ 10.7 จะเห็นว่าสโลปของกราฟที่  $v_{DS} = 10\text{ V}$  ไม่เป็น 0 เหมือน  $v_{DS} = 1\text{ V}$  อย่างไรก็ตามกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) จะพิจารณาเฉพาะก็คือกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจนถึงจุดแรงดันวิกฤติ (หลังจากนั้นจะเป็นกระแสเดรน) จากการทดลองจะเห็นว่าทั้งที่แรงดัน  $v_{DS} = 1\text{ V}$  และ  $10\text{ V}$  ค่ากระแส  $I_{sub}$  ยังคงมีค่าน้อยกว่า  $0.1\text{ }\mu\text{A}$

ดังนั้นเกี่ยวกับปัญหาของกระแสรั่วไหลจนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) นั้น ถ้าใช้ขบวนการสร้างคิงลาวทางต้นจะสามารถสร้างมอสเฟตใหม่ที่มีความยาวแขนแนล ( $L$ ) สั้นได้ถึง  $20\text{ }\mu\text{m}$  ได้ โดยที่แรงดัน  $v_{DS} = 1\text{ V}$  จะมีกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) ประมาณ  $40\text{ pA}$  และเมื่อเพิ่มแรงดัน  $v_{DS} = 10\text{ V}$  กระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $20\text{ nA}$  เท่านั้น

10.3.3. การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันเดรน ( $v_{DS}$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูป. 10.4 ความยาวแขนแนล ( $L$ )  $20\text{ }\mu\text{m}$  ความกว้างแขนแนล ( $w$ )  $100\text{ }\mu\text{m}$  ความหนาของชั้นเกทออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700\text{ \AA}$  ทำการปรับ  $v_G$  เพื่อให้  $v_{DS}$  มีค่าตั้งแต่  $1.0 - 30\text{ V}$  วัดค่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) ที่แรงดัน  $v_G$   $0\text{V}, 1\text{V}, 2\text{V}, 2.5\text{V}, 3\text{V}, 3.5\text{V}, 4\text{V}$  ตามลำดับ นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง  $I_{sub}$  กับ  $v_{DS}$

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{sub}$  กับ  $v_{DS}$  ได้ดังแสดงได้ในรูปที่ 10.10 จากกราฟที่แรงดัน  $v_G < v_T$  ( $0\text{V}, 1\text{V}, 2\text{V}, 2.5\text{V}$ ) กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตขณะนี้คือกระแสรั่วไหลจนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) กระแสรั่วไหลนี้เกือบมีค่าเท่ากับที่  $v_G$  ค่าต่าง ๆ ดังนั้นกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) จึงขึ้นกับ  $v_{DS}$  มากกว่า  $v_G$  ซึ่งเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้เป็น

$$I_{sub} \propto v_{DS}$$

กระแส  $I_{sub}$  จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับค่า  $V_{DS}$  ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้น ถ้าใช้เป็น สเกลลิเนียร์ ยิ่งกว่านั้นหากกราฟยังพบอีกว่าเมื่อค่าแรงดัน  $V_G$  มีค่ามากขึ้น กระแสรั่วไหล จะมีปริมาณลดลง ทั้งนี้เพราะสนามไฟฟ้าที่เกทับสนามไฟฟ้าที่ตรงเกิดการหักล้างกัน ดังนั้นเมื่อ  $V_G$  มีค่ามากสนามไฟฟ้า  $V_{DS}$  จึงถูกหักล้างไปมาก ทำให้กระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) มีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มแรงดัน  $V_G \geq V_T$  ขึ้นไปแล้ว กระแสรั่วไหลที่คือกระแสตรง ( $I_D$ ) นั้นเอง กระแสที่ไหลในช่วงอิมิตัวจะเกิดได้ในสภาวะที่  $V_{DS} > V_P$  เช่นที่  $V_G = 4V; V_T = 3V$  ดังนั้นจะได้

$$V_P = V_G - V_T = 1V$$

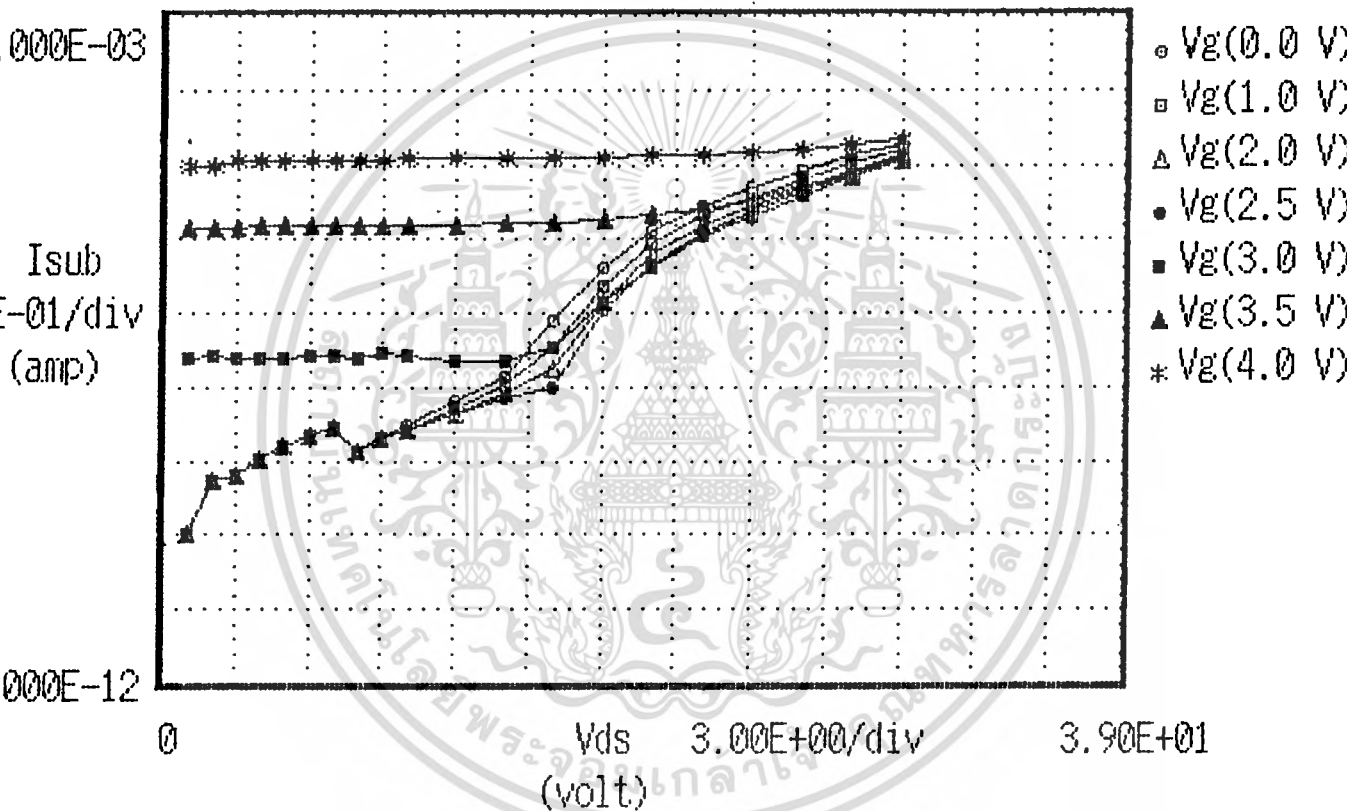
ถ้าเริ่มวัดที่  $V_{DS} = 1V$  ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มอิมิตัวแล้ว ดังนั้นที่  $V_G \geq 3V$  ขึ้นไป จะเป็นกระแสตรงอิมิตัวคงที่ที่  $V_G$  ค่าหนึ่ง ๆ (ดูรูป 10.10) แต่ที่  $V_{DS}$  ที่เพิ่มขึ้นสามารถเอาชนะสนามไฟฟ้า  $V_G$  ได้ กระแสตรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งกระแสส่วนนี้เกิดจากอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้ามา (hot electron) จากขั้วเกรน เช่นที่  $V_G = 3V$  จะเห็นว่าเมื่อ  $V_{DS} \geq 16V$  กระแสตรงก็จะเพิ่มขึ้นตาม  $V_{DS}$  ค่ากระแสรั่วไหลจนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) ที่มีค่าน้อยกว่า  $0.1 \mu A$  อันเป็นค่าที่ยอมรับได้นั้น ควรให้แรงดัน  $V_{DS}$  ไม่เกิน  $15V$

#### 10.4 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองเกี่ยวกับกระแสรั่วไหลจนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) นี้ จากผลการทดลองในหัวข้อ 10.3.1 เมื่อให้แรงดัน  $V_{DS} = 10V$  ค่ากระแสรั่วไหลจะมีค่าสูงสุด  $10 nA$  ที่ความยาวแชนแนล (L)  $15 \mu m$  แต่เมื่อคำนึงถึงความปลอดภัยจากปรากฏการณ์ short channel effect ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 7 จึงควรสร้างมอสเฟตที่มีความยาวแชนแนล  $20 \mu m$  และจากการนำมอสเฟตที่มีความยาวแชนแนล  $20 \mu m$  ไปวัดหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{sub}$  กับ  $V_G$  ในหัวข้อ 10.3.2 และ  $I_{sub}$  กับ  $V_{DS}$  ในหัวข้อ 10.3.3 ก็ปรากฏว่ากระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือประมาณ  $0.1 \mu A$  ที่  $V_{DS} = 15V$

# DATA PLOTTER (P-ch)

## I : SUB-V<sub>ds</sub> RELATION



L = 20  $\mu\text{m}$  W = 100  $\mu\text{m}$  <100> VBG = 0 V Tox = 700 $^{\circ}$ A

รูปที่ 10.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล  $I_{\text{sub}}$  กับแรงดัน  $V_{\text{DS}}$

ดังนั้นการควบคุมปริมาณกระแสรั่วไหล ( $I_{sub}$ ) เพื่อไม่ให้มีผลกับการทำงานของมอสเฟต  
ในวงจรรวม จึงควรสร้างที่ไว้แต่ละตัวให้มี ความยาวแขนแนลไม่น้อยกว่า  $20 \mu m$  และไบอัสแรงดัน  
 $V_{DS}$  ไม่เกิน  $15 v$  จึงจะปลอดภัย สำหรับวิธีการป้องกันเพื่อที่จะให้  $I_{sub}$  นี้ลดลงไปอีกหรือ  
 $V_{DS}$  มีค่าสูงกว่านี้ ควรจะทำการปรับปรุงที่ขั้นตอนการสร้างโดยรักษาความสะอาดให้มากที่สุด เพื่อที่  
ผิวสัมผัสระหว่าง  $Si$  กับ  $SiO_2$  จะเกิดมีสภาพที่มีการรั่วไหลน้อยที่สุด ซึ่งส่วนนี้เป็นกระแสรั่วไหลที่  
ผิว สำหรับการรั่วไหลในเนื้อซิลิกอนควรที่จะเลือกใช้ฐานรองที่มีค่าความต้านทานสูง และแพร่สารเจือ  
ให้ส่วนเกรนและซอสอย่างเจือจาง ซึ่งจะช่วยให้บริเวณปกปิดพาหะมี ความกว้างมากขึ้นทำให้กระแสรั่ว  
ไหล ( $I_{sub}$ ) มีค่าน้อยลงตามต้องการได้



บทที่ 11

ปรากฏการณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แฝงใน PMOS  
(Parasitic MOS transistor phenomena in PMOS)

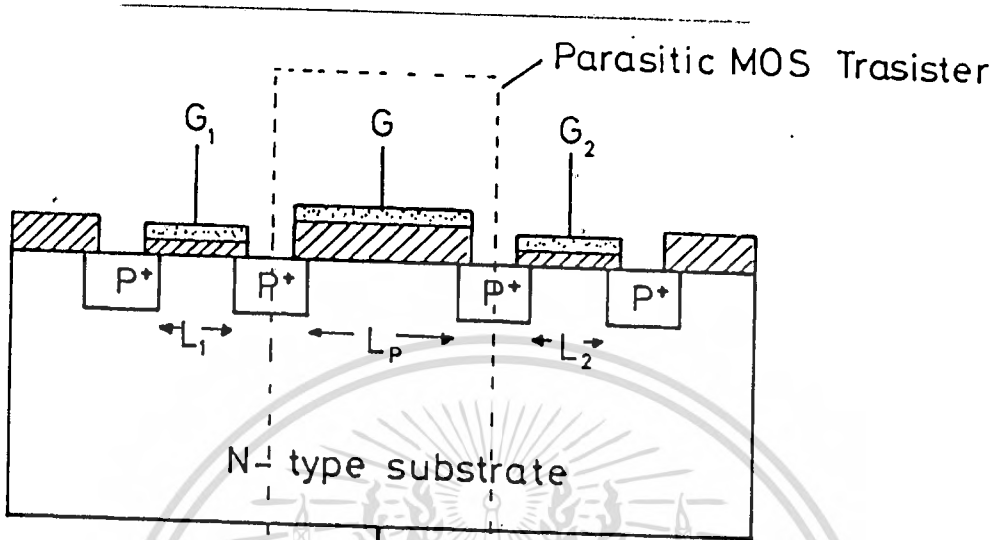
11.1 วัตถุประสงค์

ในการสร้างวงจรรวมประเภทมอส (MOS IC) ซึ่งประกอบด้วยมอสเฟตจำนวนมากเชื่อมต่อกันเป็นวงจร (circuit) ด้วยลวดลายโลหะที่เคลือบอยู่ด้านบน ลวดลายโลหะนี้จะพาดผ่านไปยังส่วนต่าง ๆ ของวงจรที่ได้ทำการออกแบบไว้ ในบางกรณีลวดลายโลหะพาดผ่านไบนระหว่างซอสหรือเดรนคูโด๊กตามอาจทำให้เกิดเป็นมอสทรานซิสเตอร์ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11.1

ในการทดลองครั้งนี้จะได้ศึกษาผลของมอสทรานซิสเตอร์แฝงต่อการทำงานของวงจรรวมและจะแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปหาการะยะห่างระหว่างซอสกับ เดรนของมอสทรานซิสเตอร์แฝงที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดผลของมอสทรานซิสเตอร์แฝงในปริมาณที่พอจะยอมรับได้ ซึ่งระยะดังกล่าวก็คือระยะที่ใกล้ที่สุดของมอสทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ที่สามารถถูกสร้างขึ้นโดยไม่ต้องคำนึงถึงผลของมอสทรานซิสเตอร์แฝงที่อาจจะเกิดขึ้น นอกจากระยะห่างของมอสทรานซิสเตอร์ 2 ตัวแล้วความหนาของชั้น  $SiO_2$  ในบริเวณที่จะเกิดมอสทรานซิสเตอร์แฝงก็ต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วยเพื่อทำให้ค่าแรงดันวิกฤติของมอสทรานซิสเตอร์แฝงมีค่าสูงพอที่จะไม่เกิดการการเหนี่ยวนำชนแนลหรือเกิดขึ้นน้อยจนไม่มีผลต่อวงจรรวม คุณสมบัติการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์แฝงยังคงมีลักษณะการพิจารณาเหมือนกับการทำงานของมอสเฟตธรรมดา โดยค่ากระแสเดรนจะขึ้นกับเทอม  $\frac{W}{L} \cdot T_{ox}$  และค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ยังคงขึ้นกับความหนาของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) เช่นเดียวกันกับที่ได้อธิบายเอาไว้ในบทที่ 7 นอกจากนั้นมอสทรานซิสเตอร์แฝงนี้ยังให้ปรากฏการณ์ของ Short channel effect เช่นเดียวกันด้วย คือกระแสเดรนที่ระยะ  $L_p$  ตามรูปที่ 11.1 สั้นมากจนขนาดของ  $L_p$  มีค่าใกล้เคียงกับความกว้างของบริเวณพลาสมาผลก็คือกระแสเดรน  $I_D$  จะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าค่าที่ได้จากสมการ (2.1) และค่าแรงดันวิกฤติจะมีค่าลดลงต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการ (2.6)

ดังนั้นการพิจารณาสร้างวงจรรวม จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะ  $L_p$  ที่ทำให้เกิดผลของ Short channel effect เช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 7 ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.1 แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้าง Parasitic MOS Tr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 11.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบสร้างมอสเฟตเพื่อศึกษาผลของมอสทรานซิสเตอร์แฝง (parasitic MOS) ได้ออกแบบให้มีโครงสร้างคั่นแบบเช่นเดียวกับรูปที่ 7.3 ในการทดลองที่ 7 จากรูป 11.2 ดังนั้นพารามิเตอร์ต่าง ๆ จึงเป็นไปตามตารางที่ 7.1 โดยที่ค่าของ  $L$  ก็คือค่าของ  $L_p$  ที่กำลังพิจารณาอยู่นั่นเอง ฉะนั้นระยะ  $L_p$  จึงมีค่าตั้งแต่  $10 \mu m - 140 \mu m$  ความกว้างของแชนแนล ( $w$ )  $100 \mu m$  ในขั้นตอนที่ได้ไปเขียนลงบนแผ่นกราฟ ตัดแผ่น peel coat ตามแบบแล้วนำไปถายยอส่วน 50 เท่า ลงบนมาสก์กระจก จากนั้นนำต้นแบบแผ่นมาสก์ไปสร้างตามขั้นตอนการสร้างในบทที่ 3 แต่เปลี่ยนแปลงวิธีการบางอย่างเล็กน้อย เช่นขั้นตอนแรกสร้างออกไซด์ปกคลุมผิวทั้งหมดให้มีคความหนาแตกต่างกัน 2 ค่า คือ  $5100 \text{ \AA}$  และ  $7200 \text{ \AA}$  ส่วนขั้นตอนที่ 6 ในรูปที่ 3.2 นั้นไม่ต้องทำเทออกไซด์ใหม่แต่สร้างทับชั้นออกไซด์เก่าที่สร้างไว้ตอนแรกเสีย ก็จะได้ออกไซด์ที่มีความหนา  $5100 \text{ \AA}$  และ  $7200 \text{ \AA}$  ตามต้องการ

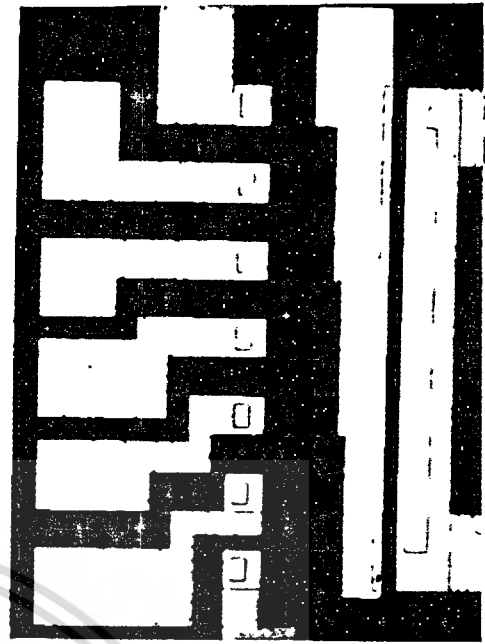
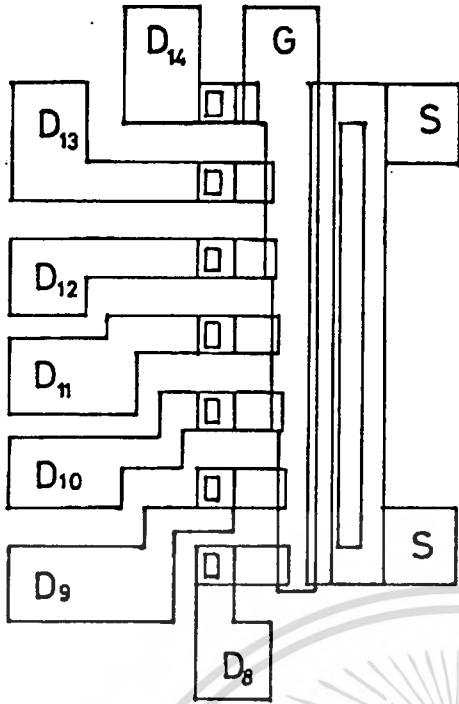
### 11.3 การทดลองและผลการทดลอง

#### 11.3.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_D$ ) กับความยาวแชนแนล ( $L_p$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรตามรูปที่ 11.3 โดยใช้ curve tracer วัดค่ากระแสเดรน ( $I_D$ ) และกระแสเดรนอิ่มตัว ( $I_{DSS}$ ) ที่ความยาวแชนแนล ( $L_p$ ) ค่าต่าง ๆ เมื่อความหนาของเทออกไซด์เป็น ( $T_{ox}$ )  $5100 \text{ \AA}$  และ  $7200 \text{ \AA}$

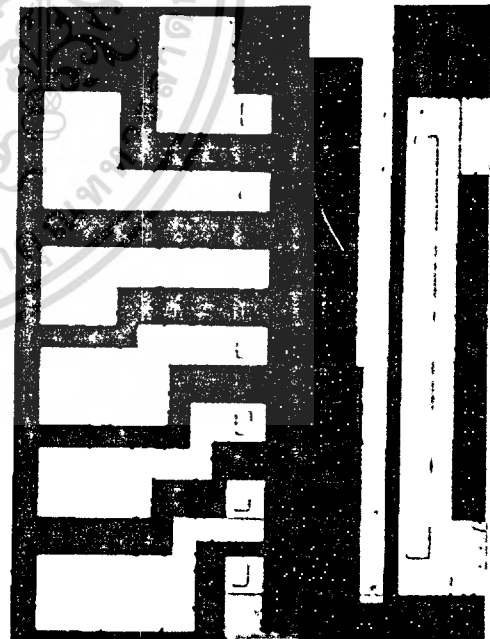
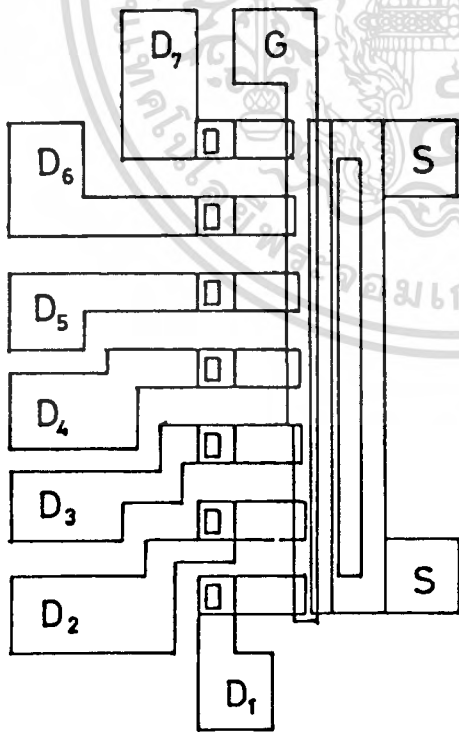
#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 11.4 เป็นภาพถ่ายแสดงการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์แฝง แกนตั้งเป็นกระแสเดรน  $I_D$  แกนนอนเป็นแรงดัน  $V_{DS}$  ที่แรงดันเกต  $V_G$  ค่าต่าง ๆ จะเห็นว่ามอสทรานซิสเตอร์แฝงที่เกิดขึ้นมีการทำงานเช่นเดียวกับมอสเฟต แต่หากว่ากระแสเดรนที่วัดได้มีค่าต่ำกว่ามาก ในรูป (ก)  $L_p = 100 \mu m$  แรงดันเกต  $V_{10} = 10 V$  จะมีกระแส  $I_{DSS}$  ไหลประมาณ  $= 0.04 \text{ mA}$  ซึ่งนับว่าน้อยมาก แต่ที่ความยาวแชนแนล  $L_p$  สั้นมาก ๆ ประมาณ  $15 \mu m$ ) จะเกิดปรากฏการณ์ของ short channel effect เหมือนกับการทดลองในบทที่ 7 ทำให้กระแสเดรนไหลเพิ่มมากขึ้นเพราะความยาวแชนแนลจริง ( $L_{eff}$ ) นั้นสั้นลงกว่าที่ออกแบบไว้ อันเนื่อง



ภาพวาดจากต้นแบบ

รูปถ่ายจากชิ้นงาน

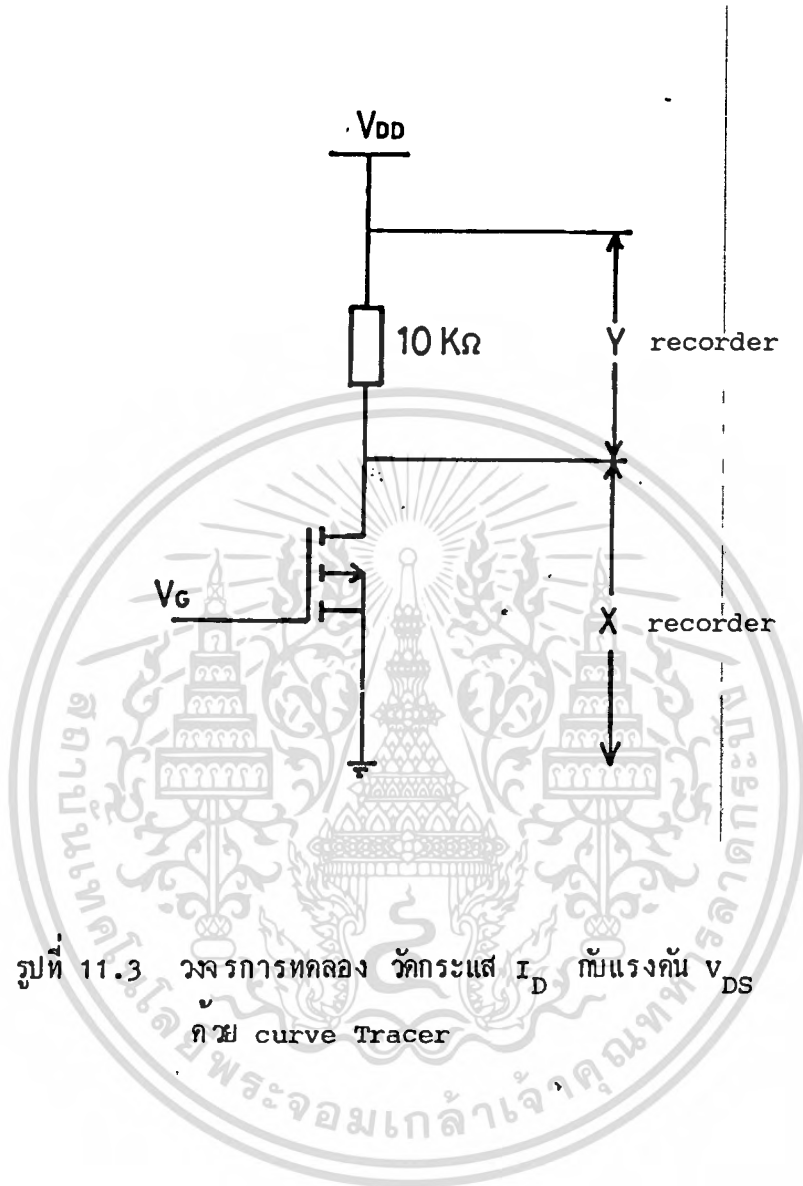


ภาพวาดจากต้นแบบ

รูปถ่ายจากชิ้นงาน

รูปที่ 11.2 ต้นแบบจาก Parasitic MOS

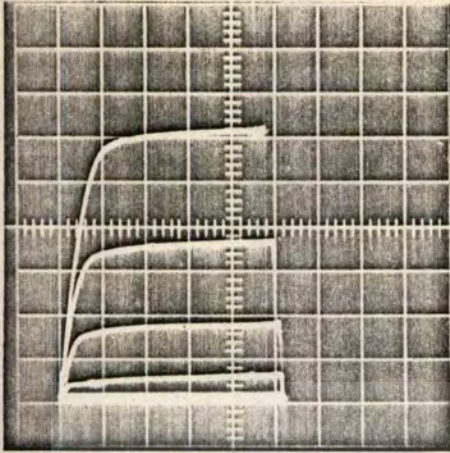
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.3 วงจรการทดลอง วัดกระแส  $I_D$  กับแรงดัน  $v_{DS}$   
ด้วย curve Tracer

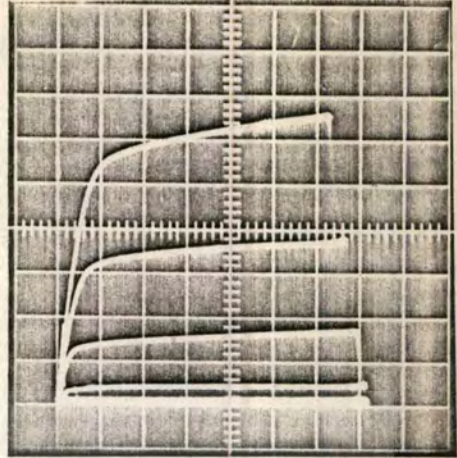
ก  $L_P = 100 \mu\text{m}$   $V : 0.02 \text{ mA/Div}$

$W_P = 200 \mu\text{m}$   $H : 5 \text{ V/Div}$



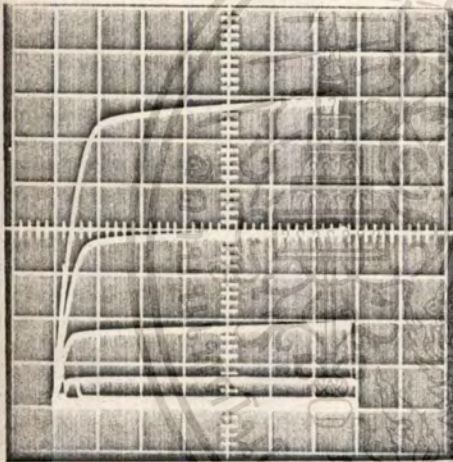
จ  $L_P = 30 \mu\text{m}$   $V : 0.05 \text{ mA/Div}$

$W_P = 200 \mu\text{m}$   $H : 5 \text{ V/Div}$



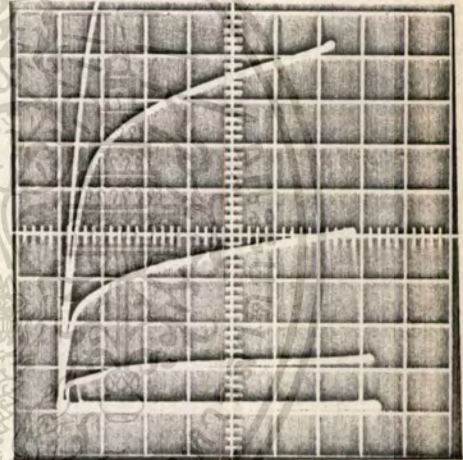
ข  $L_P = 80 \mu\text{m}$   $V : 0.02 \text{ mA/Div}$

$W_P = 200 \mu\text{m}$   $H : 5 \text{ V/Div}$



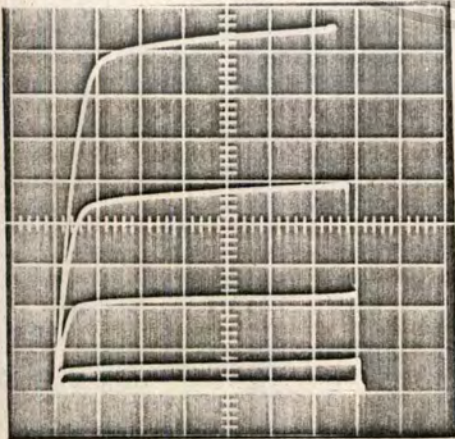
ฉ  $L_P = 20 \mu\text{m}$   $V : 0.05 \text{ mA/Div}$

$W_P = 200 \mu\text{m}$   $H : 5 \text{ V/Div}$



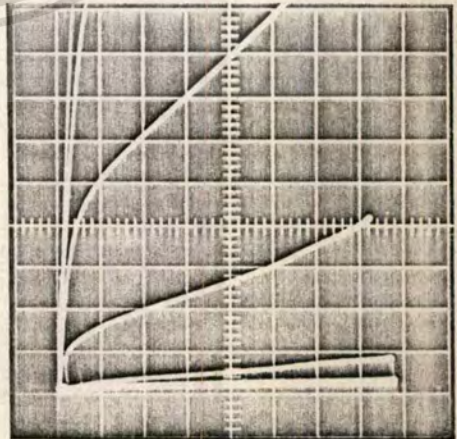
ค  $L_P = 60 \mu\text{m}$   $V : 0.02 \text{ mA/Div}$

$W_P = 200 \mu\text{m}$   $H : 5 \text{ V/Div}$



ช  $L_P = 15 \mu\text{m}$   $V : 0.05 \text{ mA/Div}$

$W_P = 200 \mu\text{m}$   $H : 5 \text{ V/Div}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตรง  $I_D$  ไม่อภัยแรงดัน  $V_{DS}$  ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งความยาวแขนแนลมีค่าต่าง ๆ กันที่  $T_{OX} = 5100 \text{ \AA}$  ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มา จากผลของการขยายตัวของบริเวณปลูกประจุพาหะระหว่างเกรนกับซัสเตรทและซอสกับซัสเตรท และผลของการแพร่กระจายสารเจือทางข้าง (Side diffusion) ซึ่งค่าความยาวแขนแนลจริง สามารถคำนวณหาได้โดยวิธีการทดลองเช่นเดียวกับไมท์ที่ 7 ซึ่งได้  $\Delta L$  มีค่าประมาณ  $10 \mu\text{m}$  ในรูปที่ 11.5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเกรนอิ่มตัว  $I_{DSS}$  กับความยาวแขนแนล  $L_P$  ที่แรงดัน  $V_G$  มีค่า  $6\text{V}, 7\text{V}, 8\text{V}, 9\text{V}$ , และ  $10\text{V}$  เมื่อความหนาของชั้นเกตออกไซด์เป็น  $5100 \text{\AA}$  จะเห็นว่ากระแส  $I_{DSS}$  แปรผกผันกับความยาว  $L_P$  หรืออาจเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_{DSS} \propto \frac{1}{L_P}$$

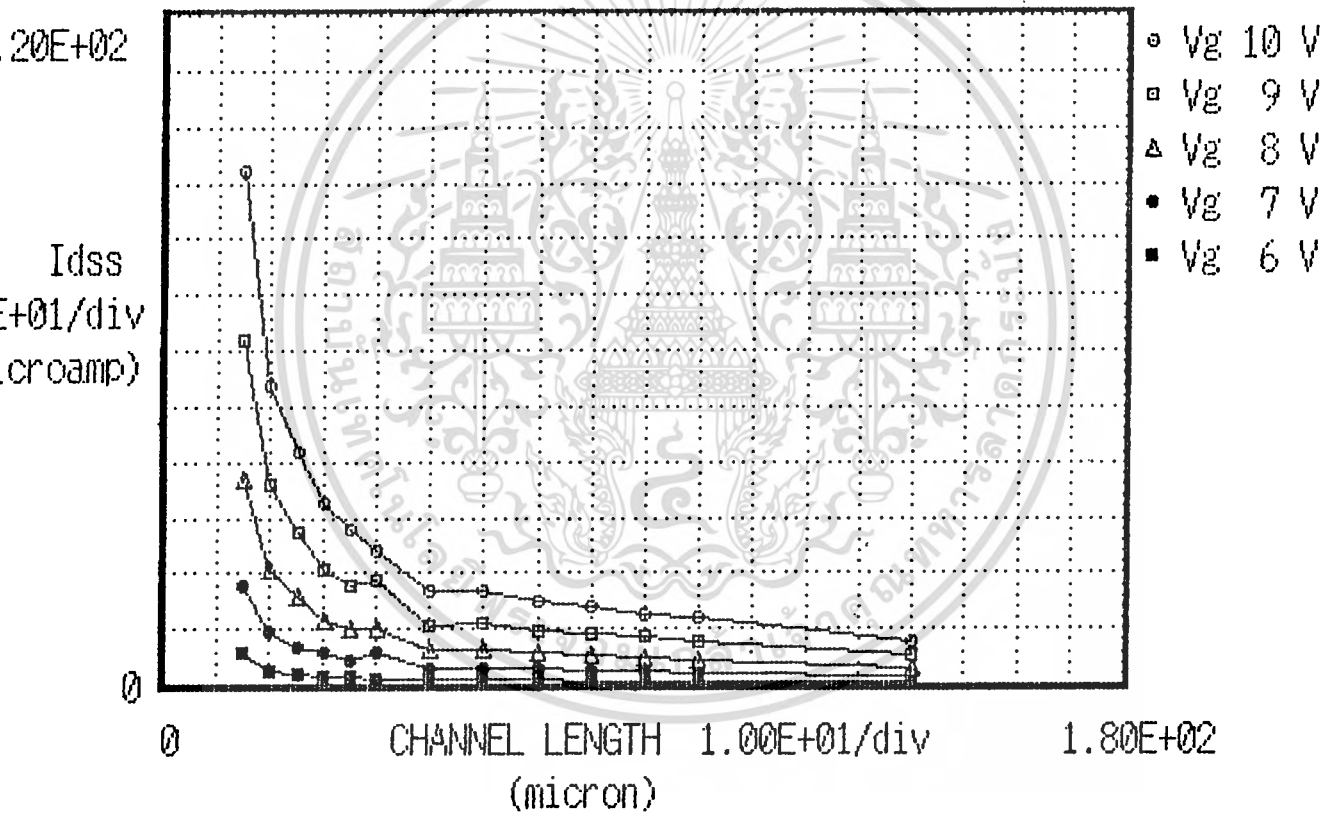
ในรูปที่ 11.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเกรน  $I_D$  กับ ความยาวแขนแนล ( $L_P$ ) ที่ความหนาของเกตออกไซด์  $7200 \text{\AA}$  ซึ่งให้ผลการทดลองทำนองเดียวกันกับที่  $T_{ox} 5100 \text{\AA}$  แต่กระแสเกรนจะไหลน้อยกว่าที่แรงดันเกตเท่ากันเมื่อความยาวแขนแนล ( $L_P$ ) เท่ากัน อย่างไรก็ตามกระแสเกรนที่ไหลนี้ยังมีค่ามาก อาจจะทำให้วงจรรวมมีการทำงานผิดปกติได้ ซึ่งการกำจัดผลของกระแสเกรนของมอสทรานซิสเตอร์แฝงโดยวิธีการใช้ระยะห่าง ( $L_P$ ) เพียงอย่างเดียวจะได้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจนัก จึงจำเป็นต้องนำวิธีอื่นมาช่วยป้องกันด้วย ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทสรุป

11.3.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความยาวแขนแนล ( $L_P$ )

การป้องกันการเกิดมอสทรานซิสเตอร์แฝงที่เกิดขึ้น โดยการสร้างชั้น  $\text{SiO}_2$  ให้ปกคลุมหนา ๆ ย่อมทำให้ค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) สูงขึ้น ในการทดลองนี้จะได้อาค่าความหนาของชั้นออกไซด์ที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันวิกฤติของมอสทรานซิสเตอร์แฝงมีค่าสูงพอที่จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำแขนแนลระหว่างมอส 2 ตัวขึ้น ทำการทดลองหาค่าแรงดันวิกฤติที่ขึ้นกับความหนาของชั้นออกไซด์ โดยต่อวงจรการทดลองตามรูป 11.7 วัดหาค่าแรงดันวิกฤติ  $V_T$  ที่ความยาวแขนแนล ( $L_P$ ) ค่าต่าง ๆ กันตั้งแต่  $10 \mu\text{m} - 140 \mu\text{m}$  ความกว้างแขนแนล ( $w$ )  $100 \mu\text{m}$  และความหนาของเกตออกไซด์  $5100 \text{\AA}$  และ  $7200 \text{\AA}$

### DATA PLOTTER (P-ch)

### Idss=Channel Length RELATION

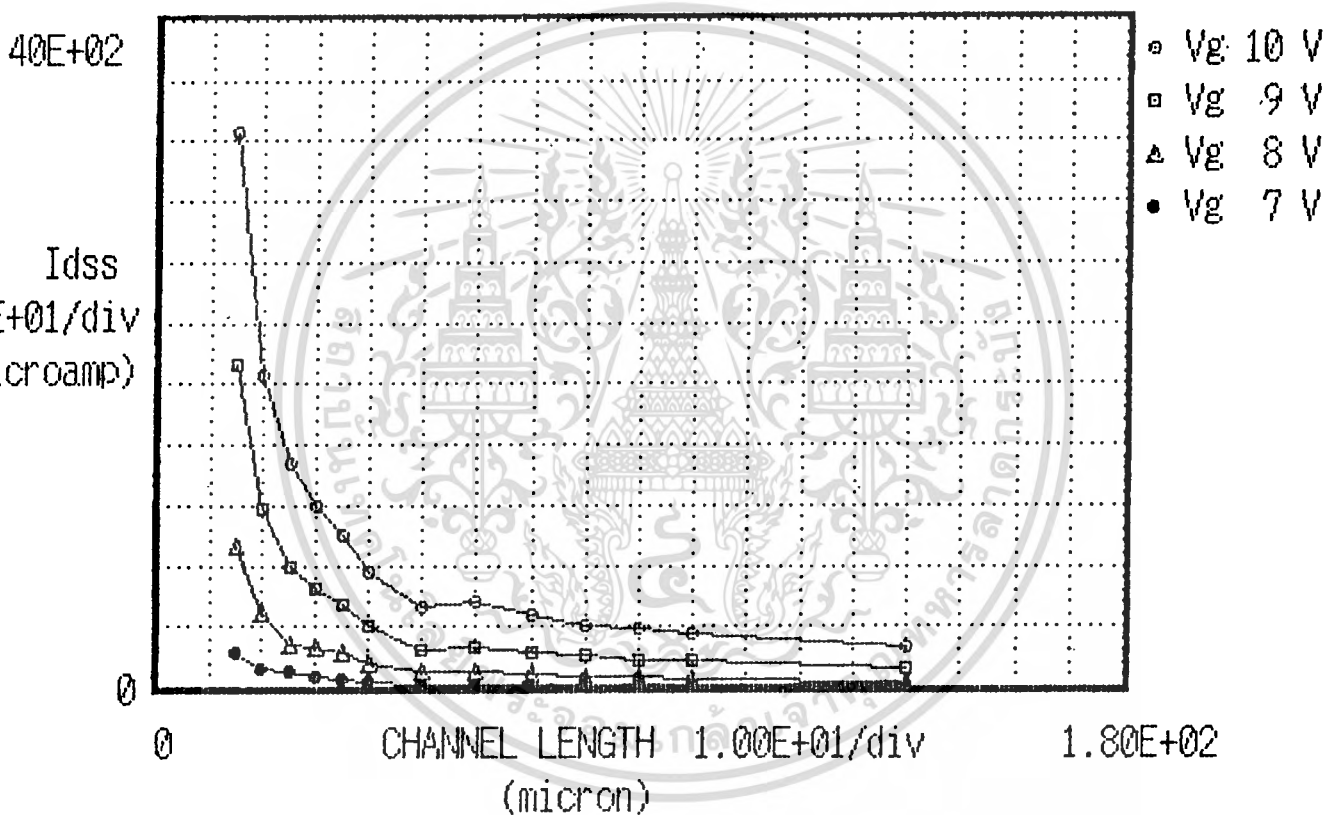


**paracitic mos**  $T_{ox} = 5100 \text{ \AA}$

รูปที่ 11.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนอิ่มตัว  $I_{DSS}$  กับ ความยาวขั้วเกต ( $L_p$ ) ที่  $T_{ox} = 5100 \text{ \AA}$

# DATA PLOTTER (P-ch)

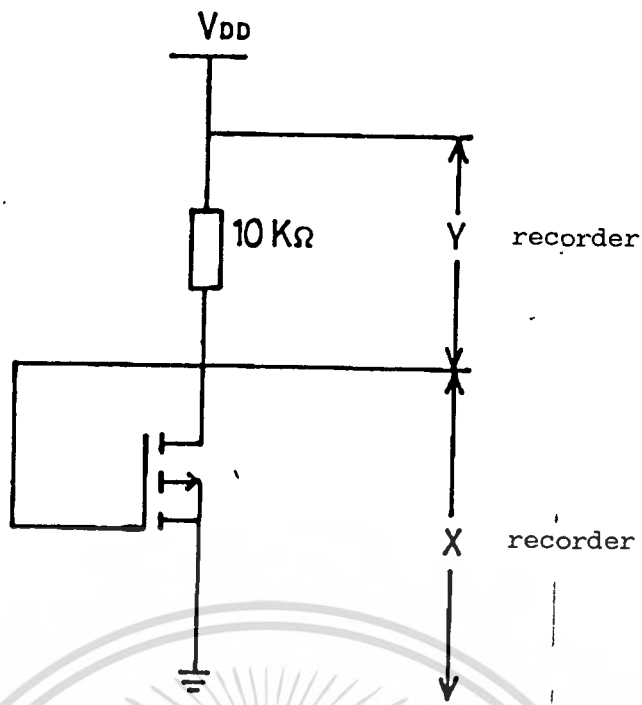
## $I_{DSS}$ -Channel Length RELATION



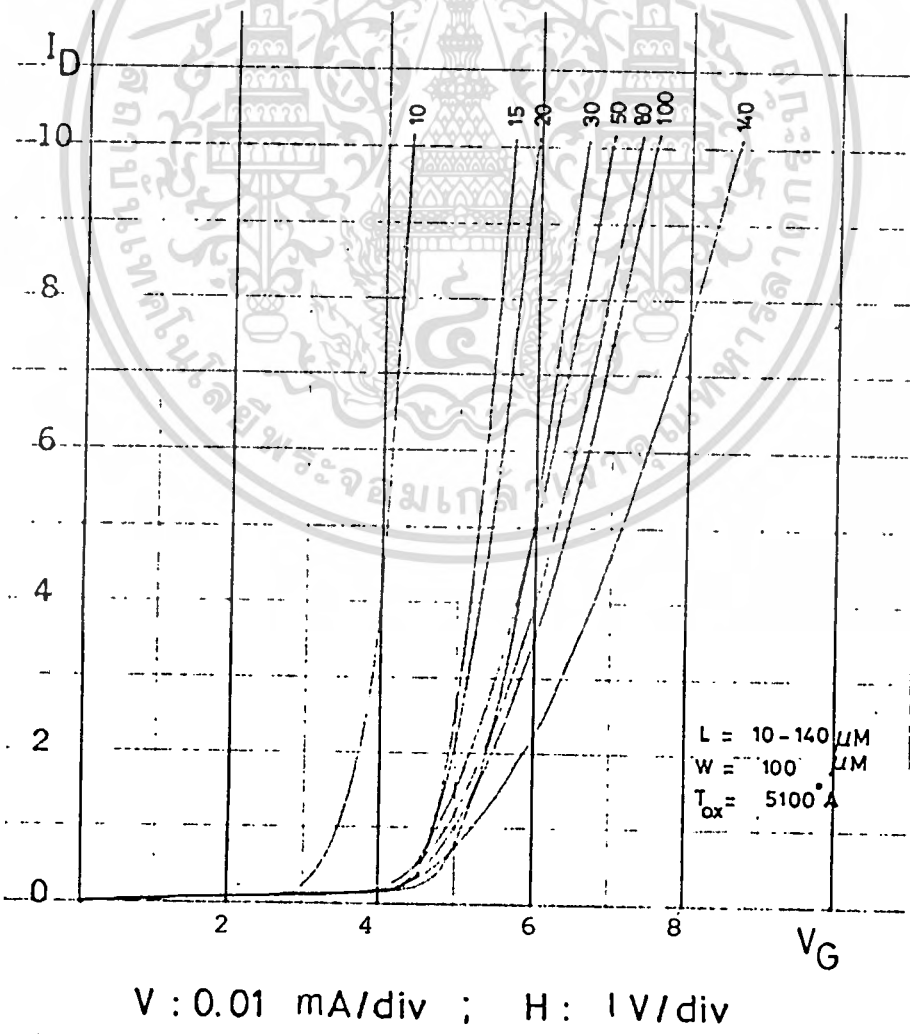
**paracitic mos**       $T_{ox} = 7200 \text{ \AA}$

รูปที่ 11.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนอิ่มตัว  $I_{DSS}$  กับ ความยาวเซนแนล ( $L_p$ ) ที่  $T_{ox} = 7200 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.7 วงจรการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสครน  $I_D$  กับแรงดันเกท  $V_G$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 11.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสครน  $I_D$  กับแรงดันเกท  $V_G$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และของอาจถึงแก่เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ที่ความหนาของชั้นออกไซด์  $5100\ \text{\AA}$

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 11.8 โดยใช้ x-y recorder กราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_D$  กับ  $V_G$  ที่ความหนาของชั้นเกทออกไซด์  $5100 \text{ \AA}$  พบว่าเมื่อแชนแนลมีค่ามาก ๆ แรงค่านิกฤติ  $V_T$  ประมาณ 5 V แต่ที่ความยาวแชนแนลสั้น ๆ จนทำให้เกิดผลของ Short channel effect ขึ้นมาแล้วแรงค่านิกฤติจะลดลงเช่นที่ความยาวแชนแนล  $10 \mu\text{m}$  (ซึ่งตรงกับผลการทดลองวัดค่า  $L_{\text{eff}}$  ในบทที่ 7 คือค่า  $L$  ที่วัดได้มีค่าประมาณ  $10 \mu\text{m}$ ) นำผลการทดลองมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_T$  กับ  $L_P$  ดังในรูปที่ 11.9 ซึ่งจะเห็นว่าปรากฏการณ์ของ Short channel effect เริ่มเกิดที่  $15 \mu\text{m}$  ทั้งที่ความหนาเกทออกไซด์  $5100 \text{ \AA}$  และ  $7200 \text{ \AA}$  ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงค่าแรงค่านิกฤติแล้วการสร้างมอสเฟต 2 ตัว โกลกันควรมีระยะห่างกันอย่างน้อย  $20 \mu\text{m}$

11.4 สรุปผลการทดลอง

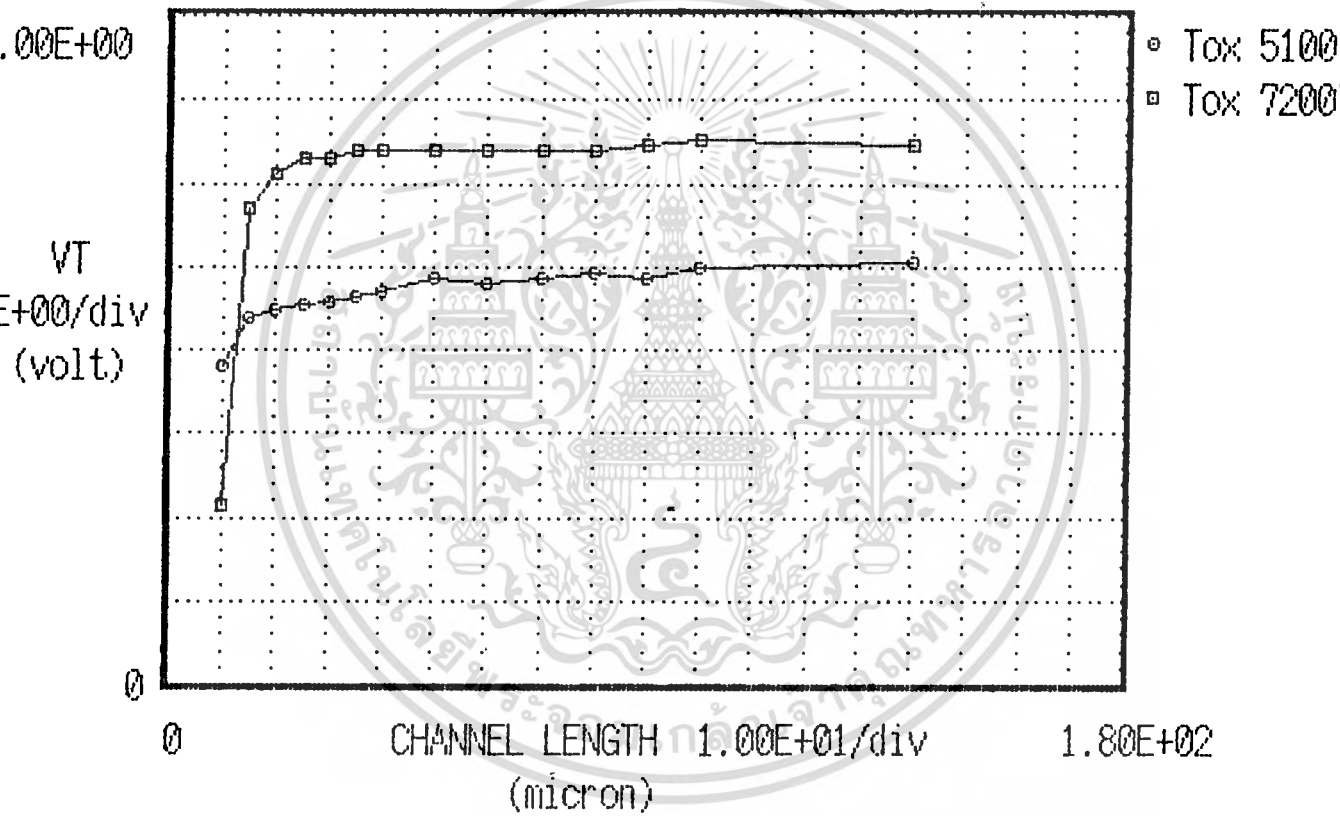
ในการทดลองเพื่อหาผลกระทบของวงจรรวมของมอสทรานซิสเตอร์แฝงในมอสเฟตแบบที่แชนแนล โดยการสร้างออกไซด์หนาปกคลุมในบริเวณที่ไม่ต้องการสร้างมอสเฟต ดังในการทดลองที่ 11.3.1 ซึ่งค่ากระแสเดรน  $I_D$  ที่ไหลระหว่างมอสทรานซิสเตอร์แฝง ที่  $V_G = 10 \text{ V}$  มีค่าประมาณ  $40 \mu\text{A}$  เมื่อ  $L = 100 \mu\text{m}$  ถ้าเปรียบเทียบกับค่ากระแสรั่วไหล (Leakage current) ในบทที่ 9 ซึ่งมีค่า  $I_L = 0.1 \mu\text{A}$  ที่ความยาวแชนแนล  $L = 20 \mu\text{m}$  หรือเปรียบเทียบกับกระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส (Subthreshold current) ในบทที่ 10 ซึ่ง  $I_{\text{sub}} \approx 20 \text{ nA}$  ที่ความยาวแชนแนล  $L = 20 \mu\text{m}$  แล้วจะเห็นว่ากระแส  $I_{\text{DSS}}$  ของมอสทรานซิสเตอร์แฝงมีค่าสูงกว่ามาก จึงจำเป็นต้องพิจารณา ในการออกแบบวงจรรวมมอสไอซีเพื่อจำกัดกระแสรั่วไหลต่าง ๆ ให้มีค่าน้อยมากพอที่จะไม่ไปรบกวนการทำงานของวงจร (โดยปกติกระแสที่เริ่มไหลเมื่อมอสเฟตมีแรงค่านิกฤติถึงจุดแรงค่านิกฤติตามวิธีการวัดแบบ  $1 \mu\text{A}$  Method มีค่า  $1 \mu\text{A}$ )

ดังนั้นกระแสรั่วไหลต่าง ๆ ควรมีค่าน้อยกว่า  $1 \mu\text{A}$  ประมาณ 10 เท่า หรือประมาณว่าควรมีค่าน้อยกว่า  $100 \text{ nA}$  จึงเป็นค่าที่พอจะยอมรับได้ เราจึงจำเป็นต้องหาวิธีป้องกันด้วยวิธีอื่นเข้าช่วย เช่น การสร้างการ์ดริง (guardring) ล้อมรอบตัวมอสเฟตที่ต้องการ ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ ดังที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 9 คือแบบ  $N^+$  การ์ดริงและ  $p^+$  การ์ดริง

นอกจากระยะห่างของมอสเฟต 2 ตัว ที่ต้องคำนึงถึงในเรื่องผลของกระแสรั่วไหลแล้ว ค่า

# DATA PLOTTER (P-ch)

## VT-Channel Length RELATION



**paracitic mos**

รูปที่ 11.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันวิกฤติ  $V_T$  กับความยาวแชนแนล  $L_P$  ของมอสทรานซิสเตอร์แผ่น

แรงดันวิกฤติของมอสทรานซิสเตอร์ก็มีความสำคัญมาก การป้องกันมอสทรานซิสเตอร์แฉง โดยใช้ การสร้างออกไซด์หนา ๆ ปกคลุมในการสร้างชั้นออกไซด์ครั้งแรกนั้น ควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 5000 Å เพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันวิกฤติของมอสทรานซิสเตอร์แฉงมีค่ามากพอที่จะไม่เหนี่ยวนำแชนแนล ให้เกิดขึ้น ซึ่งจะได้  $V_T$  มีค่าประมาณ 5 V ขึ้นไป แต่ความหนาของเกตออกไซด์หนานี้จะมีผลให้  $V_T$  สูงขึ้นก็ต่อเมื่อ  $L_p$  ของมอสทรานซิสเตอร์แฉงมีค่ามากกว่า 20  $\mu\text{m}$  ซึ่งจะยังไม่เกิดผลของ Short channel effect ตามหัวข้อการทดลองที่ 11.3.2 เพราะฉะนั้นเมื่อเกิดผลของกระแสรั่วไหลและแรงดันวิกฤติแล้ว จึงควรมีการครีงชนิด  $N^+$  ล้อมรอบ

ดังนั้น ระยะห่างจากการครีงถึงซอสและเดรนของมอสเฟทควรห่างข้างละ 10  $\mu\text{m}$  รวม ความหนาของการครีงอีก 10  $\mu\text{m}$  ทำให้ระยะห่างของมอสเฟท 2 ตัว ควรมีค่าน้อย 30  $\mu\text{m}$  ส่วนความหนาของชั้นออกไซด์ที่สร้างในการปกคลุมตอนแรกควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 5000 Å



บทที่ 12

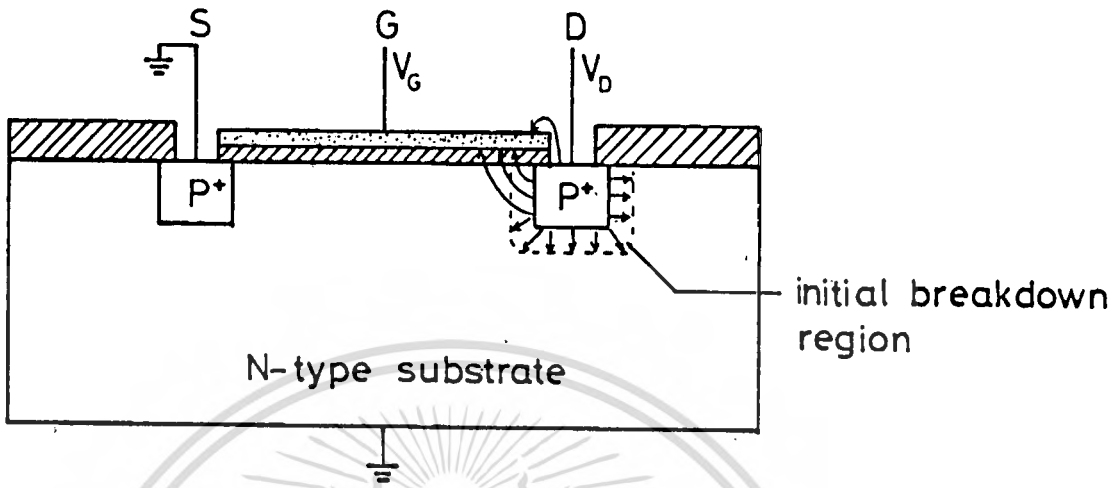
แรงดันสูงสุดที่ทนได้ (Sustain voltage)

12.1 วัตถุประสงค์

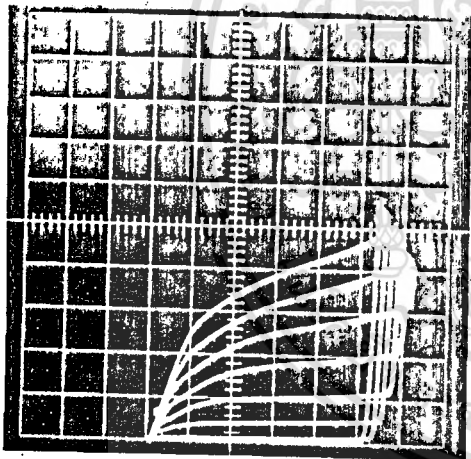
ในขณะที่ไบอัสให้มอสเฟตทำงาน หลังจากที่มีมอสเฟตทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation region) แล้วกระแส  $I_D$  จะมีค่าประมาณคงที่ถ้าเพิ่มแรงดัน  $V_{DS}$  ให้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่า ๆ หนึ่งแล้วกระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่แรงดัน  $V_{DS}$  ค่านี้คือ Forward Breakdown Voltage ( $V_B$ ) หรือที่เรียกว่าบริเวณแรงดันพังทะลาย (Avalanche region) เหมือนกับปรากฏการณ์ในทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีกลไกการเกิด  $V_B$  เนื่องจากการ Breakdown ของรอยต่อพี - เอ็น แต่ในทรานซิสเตอร์  $V_B$  ยังมีผลของการวิ่งหนีแบบความร้อน (Thermal runaway) เกิดขึ้นด้วย

สำหรับขั้นตอนการสร้างมอสเฟตในการทดสอบครั้งนี้ใช้ขบวนการแพร่สารเจือแบบความร้อน ดังนั้นสารเจือที่แพร่เข้าไปในเนื้อซิลิกอนจึงมีการกระจายแบบ curvature ทำให้ค่า Breakdown Voltage มีค่าน้อยกว่าแบบรอยต่อ P-N แบบขั้นบันได (Step junction) และเมื่อพิจารณาโครงสร้างมอสเฟตตามรูปที่ 12.1 สนามไฟฟ้าที่เกตซึ่งอยู่ใกล้กับผิวของส่วนเดรนเป็นสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าส่วนอื่น จึงทำให้ค่า Breakdown Voltage มีค่าลดลงอีก ค่า  $V_B$  นี้จะลดลงเสมอไม่ว่าเกตจะต่ออยู่กับกราวด์หรือลอยอยู่ และเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสที่เกต  $V_B$  จะเพิ่มขึ้นอีกเพราะเกิดการหักล้างกันระหว่างสนามไฟฟ้าที่เดรนกับสนามไฟฟ้าที่เกต ดังนั้น ยิ่งเพิ่มแรงดัน  $V_G$  ให้มากขึ้นค่า  $V_B$  ก็จะมีมากขึ้นตามดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 12.2 ซึ่งการที่  $V_G$  เพิ่มขึ้นแล้วทำให้  $V_B$  เพิ่มขึ้นตามไปนั้นเหมือนเป็นการช่วยเหลือกัน เราจึงเรียกแรงดันพังทะลายนี้ว่า "Sustain Voltage" ส่วนในรูปที่ 12.3 เป็นการพังทะลายแบบพุ่งทะลุ (Punch-through) และเกิด Soft Breakdown ด้วย เนื่องจากผลของ Short channel effect หรือค่าความต้านทานของฐานรองมีค่าสูงมากเกินไป หรือทั้ง 2 อย่าง ทำให้บริเวณลอคพาหะทั้งทางด้านเดรนและซอสขยายมาชนกันจึงเกิดการพุ่งทะลุขึ้น ถึงแม้จะไม่มีแรงดัน  $V_G$  ก็ตาม

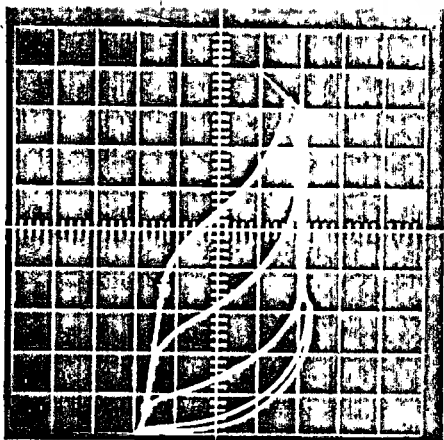
ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาค่าแรงดันพังทะลาย ( $V_B$ ) ที่ขึ้นกับคุณสมบัติของความยาวแชนแนล (L) และแรงดันไบอัสที่เกต ( $V_G$ )



รูปที่ 12.1 โครงสร้างพีแซนแนล มอสเฟต บริเวณที่เกิดแรงดันพังทะลาย



รูปที่ 12.2 แรงดันพังทะลายของมอสเฟตที่  $V_G$  กต่าง ๆ



รูปที่ 12.3 การพังทะลายแบบพินัทรู ของมอสเฟตที่เกิดผลของ Short channel effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 12.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบเพื่อทดลองวัดค่าแรงดันพังทะลาย  $V_B$  นี้ใช้แบบการทดลองเช่นเดียวกับของ Short channel effect ในบทที่ 7 โดยมีค่าความยาวแชนแนล (L) ต่าง ๆ กันตามตารางที่ 7.1

### 12.3 การทดลองและผลการทดลอง

#### 12.3.1 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพังทะลาย ( $V_B$ ) กับความยาวแชนแนล (L)

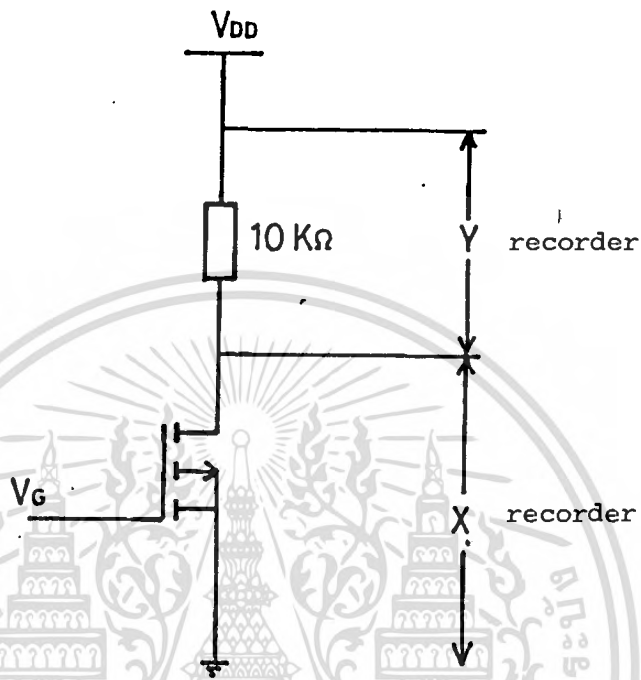
ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 12.4 เลือกความยาวแชนแนล (L) ให้มีค่าตั้งแต่ 15  $\mu\text{m}$ -140  $\mu\text{m}$  ความกว้างแชนแนล (W) 100  $\mu\text{m}$  ความหนาของเกตอ็อกไซด์ 700 $^{\circ}$ A ปรับแรงดันไบอัส  $V_{DD}$  เพื่อให้  $V_{DS}$  มีค่าจนถึง  $V_B$  ของดีไวซ์ โดยมีความต้านทาน 10 k $\Omega$  เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลผ่านเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดไวชิ่ง ให้ไบอัสที่เกต  $V_G$  มีค่าเป็น 0,3V,5V, 7V และ 10V นำผลการทดลองไปพลอตกราฟ

#### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 12.5 จะเห็นว่าที่แรงดันเกตค่าหนึ่ง ๆ ค่าแรงดันพังทะลาย  $V_B$  เกือบมีค่าคงที่(มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแสดงว่า  $V_B$  นี้ไม่ได้เกิดจากปรากฏการณ์ของการวิ่งหนีแบบความร้อน) และไม่ขึ้นกับความยาวแชนแนลด้วย เช่น มีค่าเฉลี่ยประมาณ 60V ที่  $V_G = 0V$  แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสที่เกต ปรากฏว่าค่าแรงดันพังทะลายก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เช่น เมื่อเพิ่ม  $V_G$  เป็น 10V ,  $V_B$  เพิ่มขึ้นประมาณ 75V ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าค่าสนามไฟฟ้าที่เกตจะมีผลต่อแรงดันพังทะลายโดยจะไปหักล้างกับสนามไฟฟ้าของเดรนเป็นที่น่าสังเกตว่าแรงดันพังทะลาย  $V_B$  ในรูปกราฟนี้มีการเปลี่ยนแปลงไปมาเล็กน้อยไม่ว่าที่จุดใดก็ตามที่ความยาวแชนแนล ที่พิจารณาทั้งนี้อาจ เพราะเป็นการกระจายของสสารเจือที่แพร่ลงไปในส่วนต่าง ๆ ไม่สม่ำเสมอจึงทำให้แรงดัน  $V_B$  มีการสวิงบ้างเล็กน้อย

#### 12.3.2 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพังทะลาย ( $V_B$ ) กับแรงดันเกต( $V_G$ )

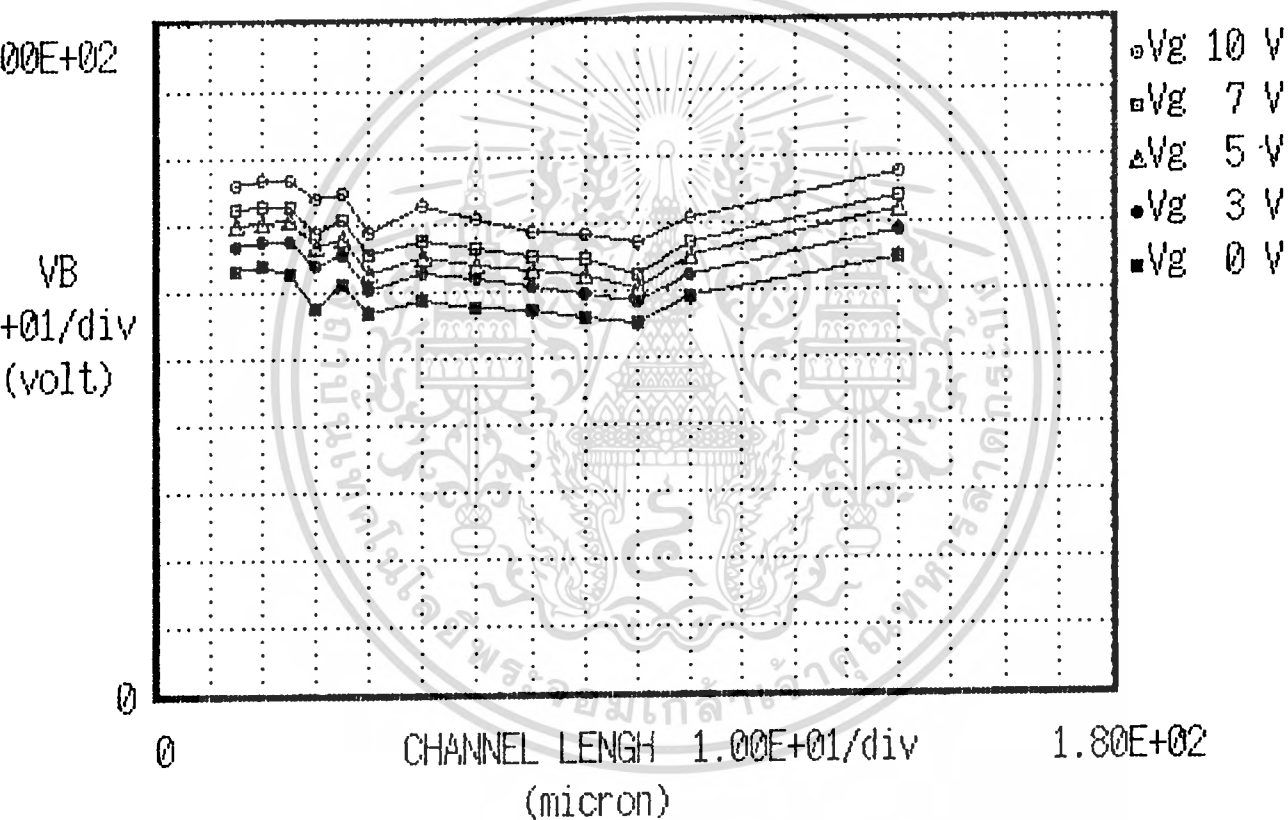
ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 12.4 เช่นเดียวกัน โดยเลือกค่าความ



รูปที่ 12.4 วงจรการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน  $V_B$  กับความยาวแซนแนล (L)

# DATA PLOTTER (P-ch)

## VB-Channel Length RELATION



T<sub>ox</sub> = 700 °A

รูปที่ 12.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพั้งทะลาย  $V_B$  กับความยาวแชนแนล (L) ที่ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 700°A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวแซนแนล (L) เป็น 70,80,90,100 และ 140  $\mu\text{m}$  ความกว้างแซนแนล (w) 100  $\mu\text{m}$  ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ 700  $\text{\AA}$  ให้ไบอัสที่เกตมีค่าตั้งแต่ 0-10V ปรับแรงดัน  $V_{DD}$  เพื่อให้  $V_{DS}$  มีค่าจนถึงแรงดันพังทะลาย  $V_B$  นำข้อมูลที่ไต่จากกราฟทดลองไปพลอตกราฟระหว่างแรงดันพังทะลายกับแรงดันที่เกต

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_B$  กับ  $V_G$  ได้ดังในรูปที่ 12.6 จากกราฟจะเห็นว่าที่ความยาวแซนแนลค่าต่าง ๆ เมื่อแรงดันที่เกตเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันพังทะลายจะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าที่เกตอันเนื่องมาจาก  $V_G$  เกิดการหักล้างกันโดยตรงกับสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจาก  $V_{DS}$  ดังนั้น  $V_{DS}$  จึงต้องสูญเสียแรงดันค่าหนึ่งไปเพื่อเอาชนะ  $V_G$  ทั้งหมด

### 12.4 สรุปผลการทดลอง

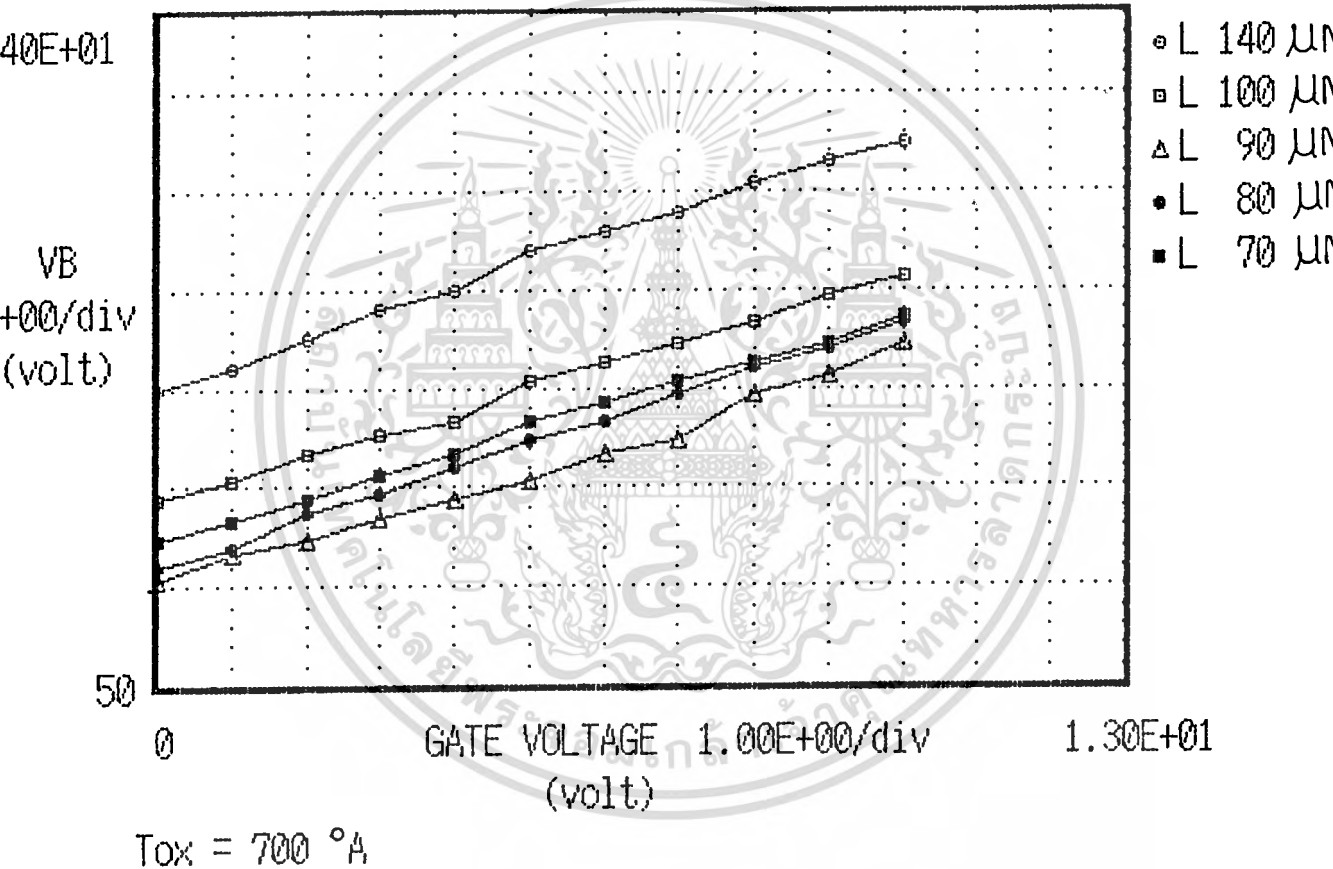
การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของแรงดันพังทะลาย ( $V_B$ ) ใน P-ch MOSFET พบว่าบริเวณที่เกิดการพังทะลาย (Breakdown) ก็คือส่วนที่เป็นรอยต่อ P-N ระหว่างเกรนกับฐานรอง นอกจากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เกต  $V_G$  ยังทำให้เกิดสนามไฟฟ้าหักล้างกับสนามไฟฟ้าของแรงดัน  $V_{DS}$  ด้วย ดังนั้นการเพิ่มค่า  $V_G$  ให้มากขึ้น จึงทำให้  $V_B$  เพิ่มตาม ซึ่งการเพิ่มตามกันนี้เราเรียกว่า Sustain voltage

จากผลการทดลองในหัวข้อ 12.3.1 จะได้ว่าค่า  $V_B$  นี้จะมีค่าประมาณคงที่ที่แรงดัน  $V_G$  ค่าหนึ่ง ๆ โดยไม่ขึ้นกับความยาวแซนแนลแต่อย่างไรเพราะส่วนที่เกิดการพังทะลายนั้นเกิดขึ้นเฉพาะที่รอยต่อ P-N เท่านั้นซึ่งจะเห็นว่า ค่า  $V_B$  ที่  $V_G = 10\text{V}$  มีค่าประมาณ 75V นับว่ามีค่าสูงมากพอสำหรับการนำไปใช้งานแต่ที่ความยาวแซนแนลสั้นลงมาก ๆ จนเกิดปรากฏการณ์ของ Short channel effect ขึ้นนั้นจะทำให้บริเวณรอยต่อประจุพาหะด้านเกรนกับด้านขอสมาชนกัน ทำให้เกิดพันธฺ์ทรู (punch-through) กระแสจึงไหลผ่านไปได้ แม้ว่า  $V_G$  จะมีค่าเป็น 0 V ก็ตาม

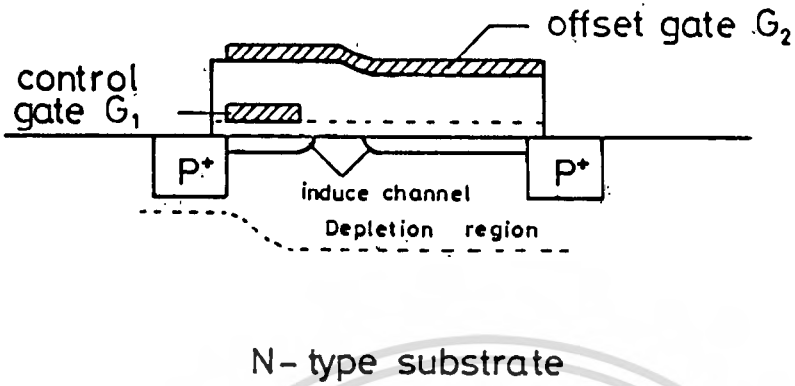
สำหรับแรงดันที่เกต  $V_G$  จะมีผลต่อแรงดันพังทะลาย  $V_B$  ตามการทดลองในหัวข้อ 12.3.2 นี้จะเห็นได้ว่าการเพิ่ม  $V_G$  ให้มากขึ้น  $V_B$  ก็จะมากขึ้นด้วย

# DATA PLOTTER (P-ch)

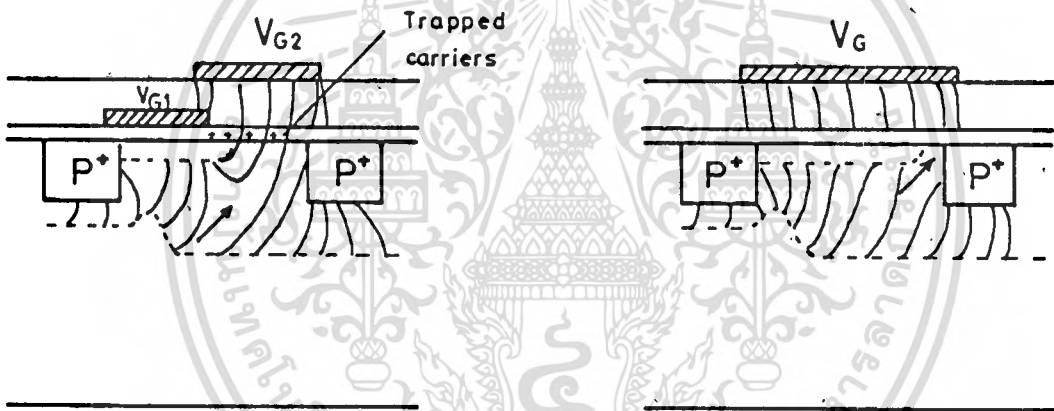
## VB - Gate Voltage RELATION



รูปที่ 12.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงคันทึงทะเลาย  $v_B$  กับแรงคันทึงเกต  $v_G$  ที่ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700 \text{ } ^\circ\text{A}$

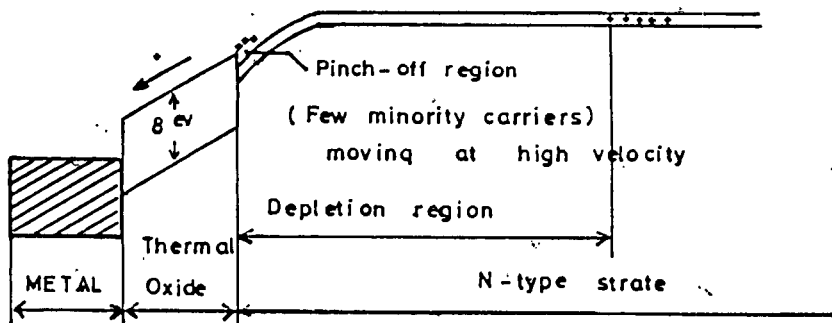


รูปที่ 12.7 (ก) โครงสร้างมอสเฟต-เกท



รูปที่ 12.7 (ข) ทิศทางของประจุพาหะใน pinch-off region เมื่อมีชั้นเกตอยู่ภายใน  $SiO_2$  มีทิศทางพุ่งเข้าหา  $SiO_2$

รูปที่ 12.7 (ค) ทิศทางของประจุพาหะพุ่งตรงเข้าหา  $SiO_2$  น้อยกว่า ในแบบเกตเดี่ยว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 12.7 (ง) แถบพลังงานตลอดถึง pinch-off region อธิบายปรากฏการณ์  
 ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีหลอดแฉ่องเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ที่โสลถูกฉีด (inject) เข้าไปใน  $SiO_2$

นอกจากความยาวแขนแนล  $L$  และ  $V_G$  แล้วค่าความเข้มข้นของฐานรอง (Substrate concentration)  $C_S$ , และความเข้มข้นของสารเจือที่ทำการแพร่ (Doping concentration)  $C_B$  ก็มีผลการต่อแรงดันพังทะลาย  $V_B$  เช่นกัน เช่นถ้าหากว่าฐานรองมีค่าความต้านทานต่ำ แล้วแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนเดรนและซอส ด้วย  $C_B$  ที่มีค่าสูง ดังนั้นที่รอยต่อ P-N ทั้งด้านเดรนและซอสจะมีบริเวณปลอดพาหะแถบมาก แรงดันเพียงเล็กน้อยจะทำให้ดีไวซ์ถึงจุด  $V_B$  ได้แต่ถ้าฐานรองมีค่าความต้านทานสูง จะทำให้บริเวณปลอดพาหะสามารถขยายออกได้กว้างมากกว่า โดยขยายเข้าไปในฐานรองมากขึ้น ดังนั้นค่า  $V_B$  จะมีค่าสูงขึ้น

แต่ถ้าฐานรองมีค่าความต้านทานสูงมาก จนทำให้บริเวณปลอดพาหะด้านเดรนขยายมากจนไปชนกับด้านซอสแล้ว ดีไวซ์จะเกิดพันธทรู (punch-through)

วิธีป้องกันการเกิดแขนแนลพันธทรูและทำให้  $V_B$  มีค่าสูงขึ้นนั้นอาจใช้โครงสร้าง ดังรูปที่ 12.7 (ก) ซึ่งประกอบด้วยเกทควบคุม (Control gate)  $G_1$  เป็น โมลิบดีนัมอยู่ภายในฉนวน  $SiO_2$  หรือ  $Si_3N_4$  เกท  $G_2$  (offset gate) อยู่บนส่วนออกไซด์ที่หนาระหว่างเกท  $G_1$  กับเดรนมีแรงดันคงที่  $V_{G2}$  โครงสร้างแบบนี้จะทำให้ค่าแรงดันพังทะลาย  $V_B$  มีค่าสูงมากขึ้น

ในรูป 12.7 (ข) แสดงสนามไฟฟ้าและทิศทางการไหลของกระแส โสลที่ถูกแตรปไปใน  $SiO_2$  ทำให้  $V_B$  มีค่าสูงขึ้น ในรูป 12.7 (ค) เป็นการแสดงบริเวณที่เกิดสนามไฟฟ้าและทิศทางการไหลของกระแสในโครงสร้างธรรมดาที่มีเกทเพียงอันเดียว 12.7 (ง) เป็นแผนพลังงาน (Energy band diagram) อธิบายปรากฏการณ์ที่โซลถูกฉีกเข้าไปใน  $SiO_2$  ในบริเวณ pinch off ลักษณะโครงสร้างดังในรูปที่ 12.7 (ก) นี้จะทำให้ค่าแรงดันพังทะลาย  $V_B$  มีค่าสูงขึ้นถึง 100-200V

บทที่ 13

ผลของเบ็คเกตไบอัส (Back gate bias effect)

13.1 วัตถุประสงค์

การไบอัสมอสเฟตตามที่ได้อธิบายมาแล้วในบทแรก ๆ ส่วนมากแล้วข้อสังเกตของกราวด์ ร่วมกับฐานรอง แต่ในกรณีของวงจรรวมซึ่งมีการนำเอามอสเฟตหลาย ๆ ตัวมาต่อกันให้มีการทำงานตามฟังก์ชันที่ต้องการ เช่น อินเวอร์เตอร์ดังในรูปที่ 13.1 ขั้วซอสของมอสโพล (Load) ต่ออยู่กับเกรนของมอสต์วัชชี (driver) ขณะที่ส่วนฐานรองต่อกับกราวด์ ดังนั้นระหว่างซอสกับฐานรองจะมีแรงดันแตกต่างกันค่าหนึ่ง ซึ่งค่านี้คือแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $v_{BG}$ ) ดังในรูปที่ 13.2 ผลของ  $v_{BG}$  ทำให้บริเวณลอคพานะคานซอสขยายออกมากในส่วนฐานรองมากกว่าเดิม ส่วนของบริเวณลอคพานะจะไปตัดแขนแนลออกดังแสดงในรูป 13.3 การที่ละไบอัสให้มอสเฟตทำงานได้ตามปกติจะต้องให้แรงดันที่เกทเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดแขนแนลมากกว่าค่าแรงดันวิกฤติ ( $v_T$ ) เดิม (เมื่อ  $v_{BG} = 0$ )

พิจารณาจากสมการที่ (2.6) และ (2.15)

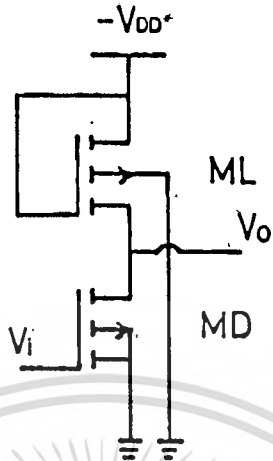
$$(2.6) \quad v_T = \phi_{MS} - \frac{Q_{ss}}{C_o} - \frac{Q_{ox}}{C_o} - \phi_s - \frac{Q_B}{C_o} + \Delta v_{DT}$$

$$(2.15) \quad Q_B = \sqrt{2 \epsilon_s \epsilon_o q N_D (|2\phi_f| + v_{BG})}$$

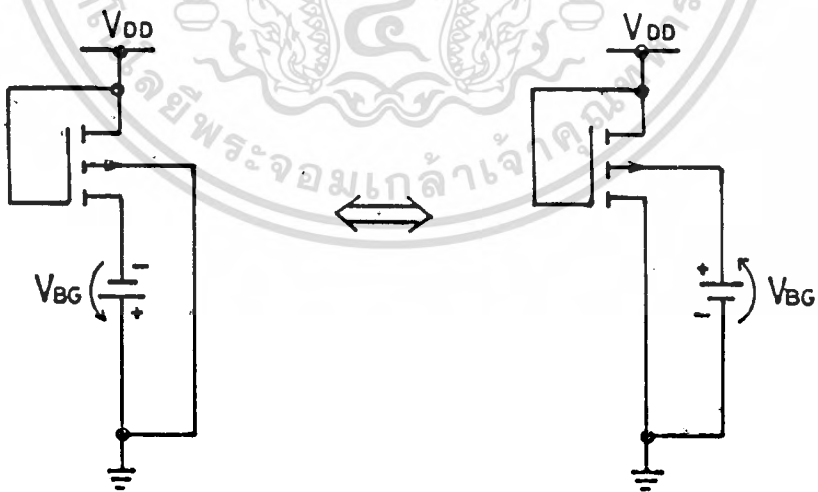
การเพิ่ม  $v_{BG}$  ทำให้  $Q_B$  เพิ่มขึ้นเป็นผลให้  $v_T$  มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 13.4 ที่เปลี่ยนไปคำนวณให้ตามสมการที่ 13.1

$$\Delta v_T = \sqrt{2 \epsilon_s \epsilon_o q N_D} (\sqrt{|2\phi_f| + v_{BG}} - \sqrt{|2\phi_f|}) \dots (13.1)$$

ถ้าเราเอา  $\Delta v_T$  ไปพลอตกราฟกับ  $\sqrt{|2\phi_f| + v_{BG}}$  เราสามารถคำนวณหา  $N_D$  ได้จากค่าสโลป ถ้าเรารู้ความหนาของเกตออกไซด์ จากสมการ (2.10)  $\phi_f$  ขึ้นกับค่า  $\ln(N_D/n_i)$

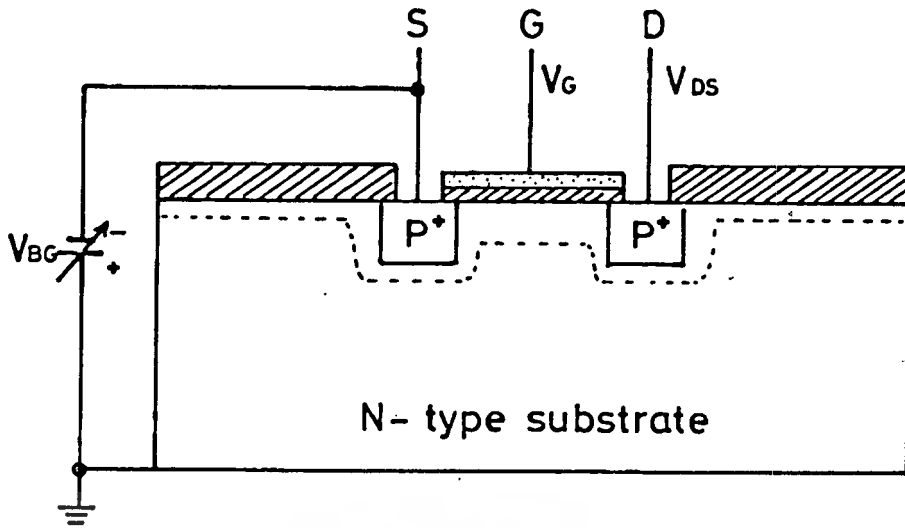


รูปที่ 13.1 มอสอินเวอร์เตอร์

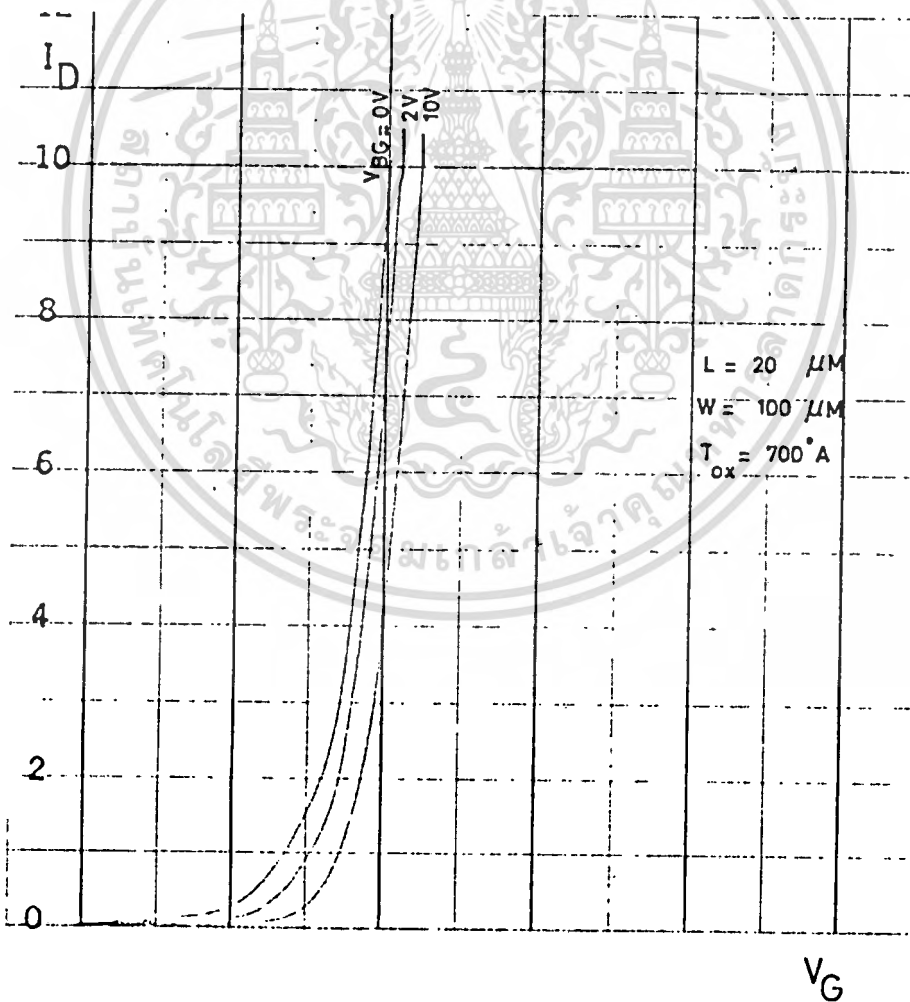


รูปที่ 13.2 แรงดันไบอัสย้อนกลับ (Back Gate Bias)  
ระหว่างขอสัญฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13.3 การให้ไบอัสย้อนกลับ ทำให้บริเวณพลาสมาที่ด้านซอสขยายออกมา



V : 0.01 mA/div ; H : 1V/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 13.4 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันวิกฤต  $V_T$  เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG}$  โดยขึ้นด้านการค่า  $V_{BG}$  ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นขนาดของ  $2\sigma_f$  จึงเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อนี้เทียบกับ  $V_{BG}$  แล้วจะเห็นว่าค่าน้อยมาก เราจึงกำหนดให้  $2\sigma_f$  เป็นค่าคงที่

ในการทดลองนี้จะได้ทดลองวัดผลของแรงดันไบอัสย้อนกลับที่มีต่อปริมาณกระแสเดรน ( $I_D$ ) และแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการไบอัสย้อนกลับในตัวเอง (Reverse Self bias) ของวงจรรวม

### 13.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

การทดลองวัดผลของแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพื่อที่จะทำการควบคุมการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ให้คงที่ขณะใช้งานจริงนี้ ใช้แบบการทดลองของ Short channel effect ในเมทที่ 7 รูปที่ 7.3

โดยมี ค่าความยาวแชนแนล (L) ต่าง ๆ ตามตารางที่ 7.1 และแบบการทดลอง Narrow channel effect ในเมทที่ 8 รูปที่ 8.4 โดยมีค่าความกว้างแชนแนล (W) ต่าง ๆ ตามตารางที่ 8.1

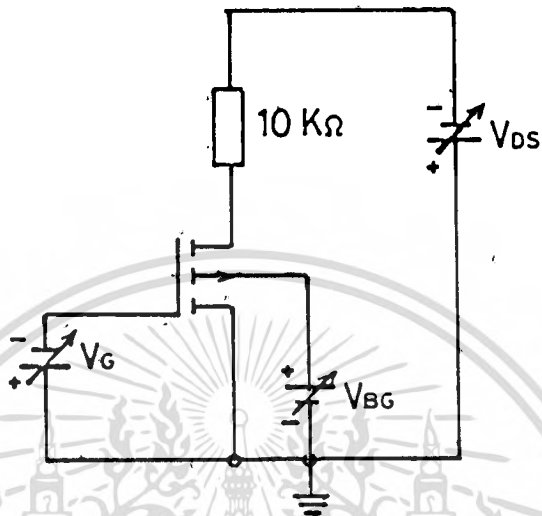
### 13.3 การทดลองและผลการทดลอง

13.3.1 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความยาวแชนแนล (L) เมื่อได้รับผล จากแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )

ทำการทดลองโดยดลวงจรถ่ายการทดลองตามรูปที่ 13.5 วัดค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ที่ความยาวแชนแนล (L) มีค่าตั้งแต่  $10\ \mu\text{m} - 140\ \mu\text{m}$  ความกว้างของแชนแนล (W)  $100\ \mu\text{m}$  ความหนาของชั้นเกตออกไซด์  $700\ \text{\AA}$  โดยให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG}$  มีค่าเป็น 0V, 2V, และ 10V นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง  $V_T$  กับ L

#### ผลการทดลอง

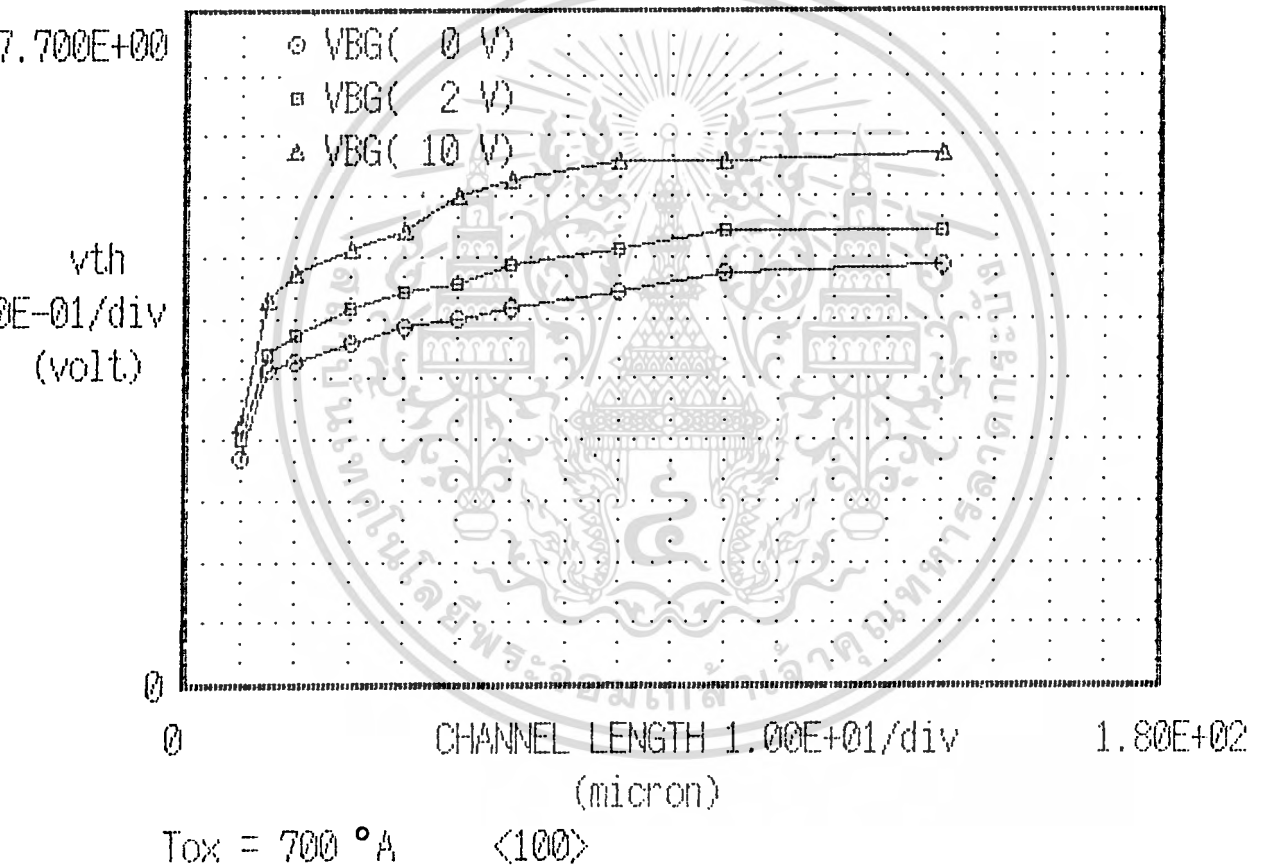
ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 13.6 จากกราฟจะพบว่าขณะที่ไม่มีแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG} = 0V$ ) ค่าแรงดันวิกฤติค่อนข้างจะคงที่ที่ความยาวแชนแนลมากกว่า  $100\ \mu\text{m}$  โดยมีค่าประมาณ 4.5 V แต่สำหรับที่ความยาวแชนแนล (L) ที่น้อยกว่า  $100\ \mu\text{m}$  จะเกิดปรากฏการณ์ของ Short channel effect ทำให้  $V_T$  มีค่าน้อยกว่า 4.5 V แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัส  $V_{BG}$  เป็น -2 V



รูปที่ 13.5 วงจรการทดลองวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{BG}$  กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ

# DATA PLOTTER (P-ch)

## V<sub>th</sub>-CHANNEL LENGTH RELATION



รูปที่ 13.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ  $V_T$  กับความยาวแชนแนล  $L$  ที่ความหนาแกทออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม เป็นประมาณ 5 V จะเริ่มคงที่ที่ความยาวแชนแนล 60  $\mu\text{m}$  และเมื่อเพิ่ม  $V_{BG}$  มากขึ้นเป็น 10 V ค่า  $V_T$  จะเริ่มคงที่ที่ความยาวแชนแนล 80  $\mu\text{m}$  ขึ้นไปโดย  $V_T = 6 \text{ V}$  แสดงให้เห็นว่าการเกิดแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG}$  เป็นผลทำให้  $V_T$  มีค่าเพิ่มขึ้นและยังช่วยทำให้ผลของ Short Channel ลดลงอีกด้วย

13.3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับความกว้างแชนแนล ( $w$ ) เมื่อได้รับผลจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 13.5 วัดค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) ที่ความกว้างแชนแนล ( $w$ ) มีค่าตั้งแต่ 10  $\mu\text{m}$  - 140  $\mu\text{m}$  ความยาวแชนแนล ( $L$ ) 200  $\mu\text{m}$  ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ 700  $\text{\AA}$  ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG}$  มีค่าเป็น 0V, 2V, และ 10V นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง  $V_T$  กับ  $w$

ผลการทดลอง

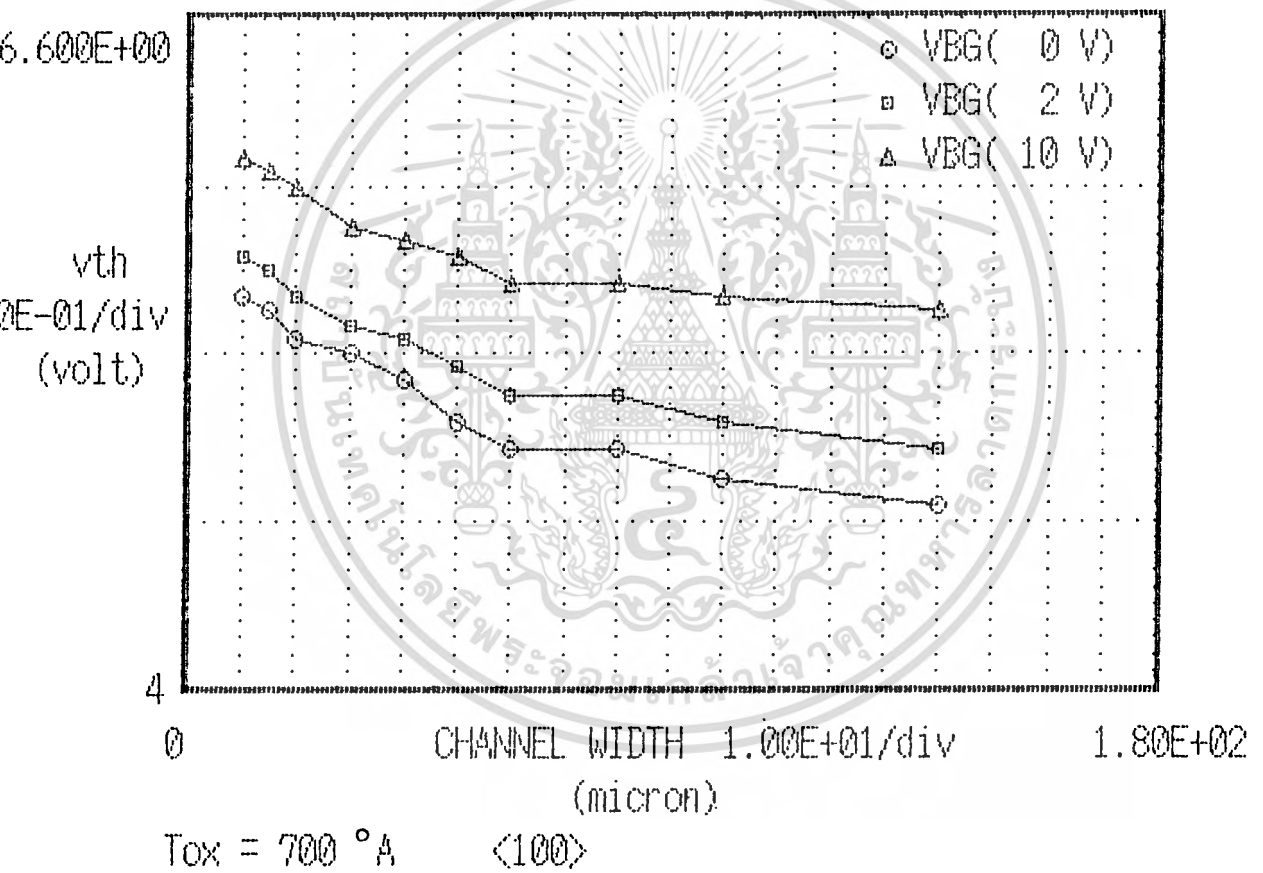
ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 13.7 จากกราฟจะพบว่าขณะที่ไม่มีแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG} = 0$ ) ค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) คอนข้างจะคงที่ที่ความกว้างแชนแนลมากกว่า 60  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป โดย  $V_T = 4.8 \text{ V}$  และที่ความกว้างแชนแนลแคบ ๆ ก็เกิดปรากฏการณ์ของ Narrow channel effect เช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG} = 2 \text{ V}$  ทำให้  $V_T$  มีค่าสูงขึ้นจากเดิมเป็นประมาณ 5.1 V ลักษณะความคงที่ของ  $V_T$  มีมากกว่าที่  $V_{BG} = 0$  และเมื่อเพิ่ม  $V_{BG}$  มากขึ้นไปอีกเป็น 10 V ค่าแรงดัน  $V_T$  มีค่าสูงขึ้นอีกเป็นประมาณ 5.4 V และมีความคงที่ของ  $V_T$  มากขึ้น แสดงให้เห็นเช่นกันว่า  $V_{BG}$  ก็มีผลต่อการยับยั้งการเกิดปรากฏการณ์ Narrow channel effect ด้วย นอกจากนั้นการเพิ่ม  $V_{BG}$  จะทำให้  $V_T$  เพิ่มขึ้นเช่นกัน

13.3.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูป 13.5 วัดค่า  $V_T$  ที่ความยาวแชนแนล ( $L$ ) ตั้งแต่ 10  $\mu\text{m}$  - 40  $\mu\text{m}$  ความกว้างแชนแนล ( $w$ ) 100  $\mu\text{m}$  ความหนาของชั้นเกตออกไซด์มีค่า 700  $\text{\AA}$  และ 1200  $\text{\AA}$  ให้แรงดัน  $V_{BG}$  มีค่าตั้งแต่ 0V - 20 V นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง  $V_T$  กับ  $V_{BG}$

# DATA PLOTTER (P-oh)

## V<sub>th</sub>-CHANNEL WIDTH RELATION



รูปที่ 13.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ  $V_T$  กับ ความกว้างแชนแนล  $w$  ที่ความหนาแกทออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 700°A

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแรงดันดังในรูป 13.8 ที่ความหนาของชั้นเกตออกไซด์  $T_{ox}$   $700\text{\AA}$  พบว่าเมื่อเพิ่มแรงดัน  $V_{BG}$  มากขึ้น  $V_T$  จะเพิ่มขึ้นเพราะแรงดัน  $V_{BG}$  ไปทำให้บริเวณลวดพาหะด้านซอสขยายออก จึงต้องให้แรงดันเกตเพิ่มขึ้นเพื่อเอาชนะ  $V_{BG}$  เหนียวน้ำให้เกิดแขนแนลได้ การเพิ่ม  $V_{BG}$  ในตอนแรกค่า  $V_T$  จะเพิ่มขึ้นเร็วมากสังเกตจากความชันของสโพล จากนั้นสโพลจะลดความชันลงจนเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งก็คือ  $V_T$  มีค่าเกือบจะคงที่นั่นเอง เช่นที่  $V_{BG}$  มากกว่า  $10\text{V}$  ขึ้นไป  $V_T$  มีค่าประมาณ  $5\text{V}$  ที่ความหนาออกไซด์  $T_{ox}$   $1200\text{\AA}$  ก็ได้ผลเช่นเดียวกันแต่  $V_T$  มีค่าคงที่ประมาณ  $6\text{V}$  ดังนั้นผลการทดลองนี้เป็นการแสดงให้เห็นได้ชัดว่าการเพิ่มค่า  $V_{BG}$  ให้สูงมากพอค่าหนึ่งแล้วแล้วจะเพิ่ม  $V_{BG}$  ให้มากขึ้นไปอีก  $V_T$  ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

รูปที่ 13.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_T$  กับ  $V_{BG}$  เช่นกันแต่ให้  $L$  มีค่าเป็น  $10\ \mu\text{m}$ ,  $15\ \mu\text{m}$ ,  $20\ \mu\text{m}$ , และ  $40\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ความยาวแขนแนล  $15\ \mu\text{m}$  ขึ้นไปผลของ  $V_{BG}$  ยังคงมีต่อ  $V_T$  เหมือนกับการทดลอง 13.3:1 แต่ที่ความยาว  $10\ \mu\text{m}$  ซึ่งเกิดปรากฏการณ์ของ short channel effect แล้วแรงดัน  $V_T$  เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่ม  $V_{BG}$  มากขึ้น แสดงว่าผลของ short channel effect มีผลมากกว่า  $V_{BG}$

13.3.4 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับระยะห่างระหว่างมอส 2 ตัว ( $L$ ) เมื่อได้รับผลจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูป 13.10 วัดค่ากระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) ที่ระยะห่างระหว่างมอส 2 ตัว ( $L$ ) มีค่าตั้งแต่  $10\ \mu\text{m}$  -  $140\ \mu\text{m}$  ความกว้างแขนแนล ( $w$ )  $100\ \mu\text{m}$  ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $1200\text{\AA}$  ปรับแรงดัน  $V_{DD}$  ให้  $V_{DS}$  มีค่าเท่ากับ  $1\text{V}$  เพื่อจะให้เห็นผลของ  $V_{BG}$  ที่มีต่อ  $I_L$  โดยอย่างชัดเจน ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ ) มีค่าเป็น  $0\text{V}$ ,  $2\text{V}$ , และ  $10\text{V}$  ตามลำดับนำข้อมูลไปพลอตกราฟระหว่าง  $I_L$  กับ  $L$

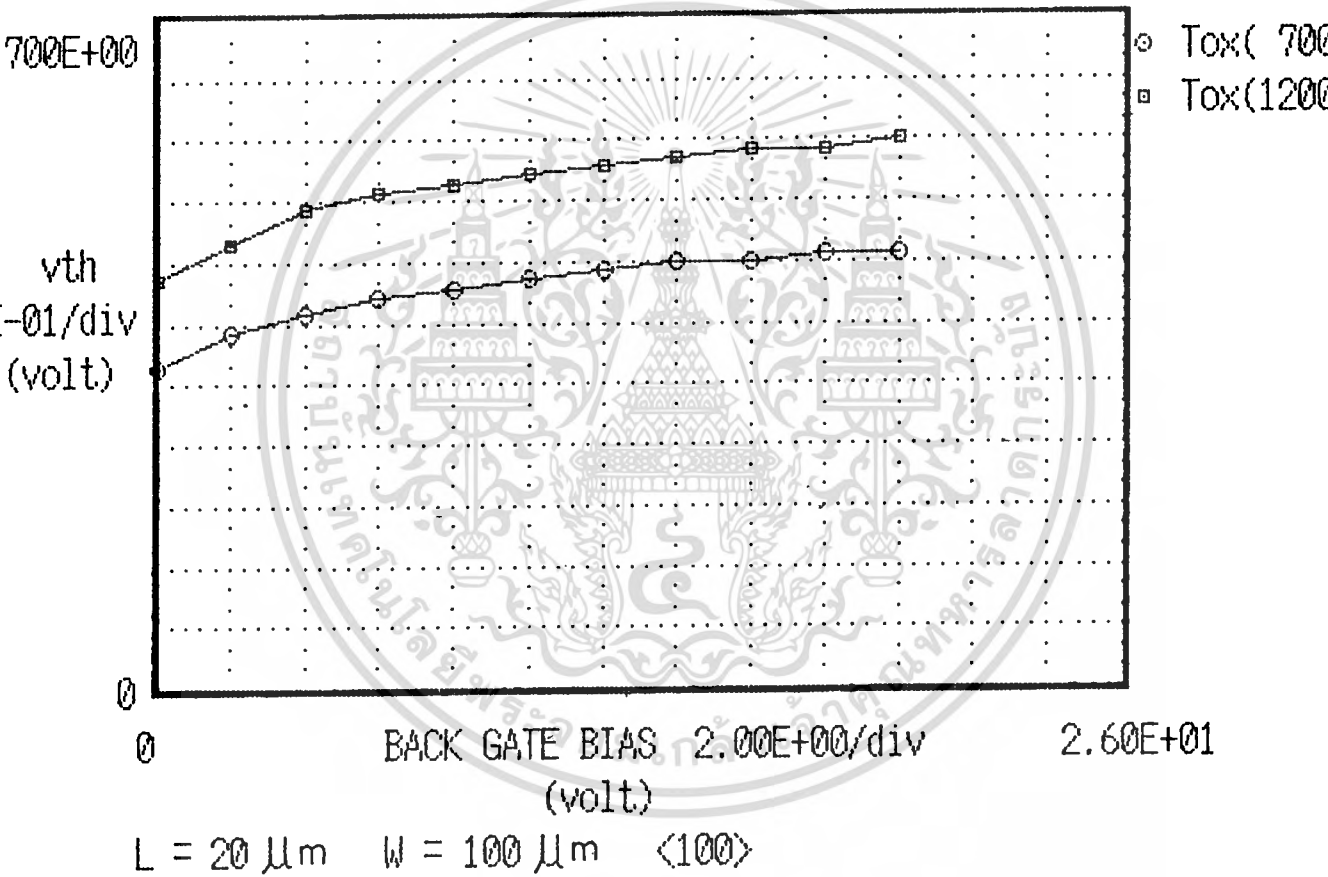
ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 13.11 จากผลการทดลองในบทที่ 9 กระแสรั่วไหลนี้จะไม่ขึ้นกับระยะห่าง  $L$  เมื่อ  $L$  มีค่ามาก แต่เมื่อมอส 2 ตัว มีระยะห่างกันประมาณ  $10\ \mu\text{m}$  จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ short channel effect เป็นผลให้  $I_L$  เพิ่มขึ้นอันเป็นผลจากการพันธ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### DATA PLOTTER (P-ch)

### V<sub>th</sub>-BACK GATE BIAS RELATION

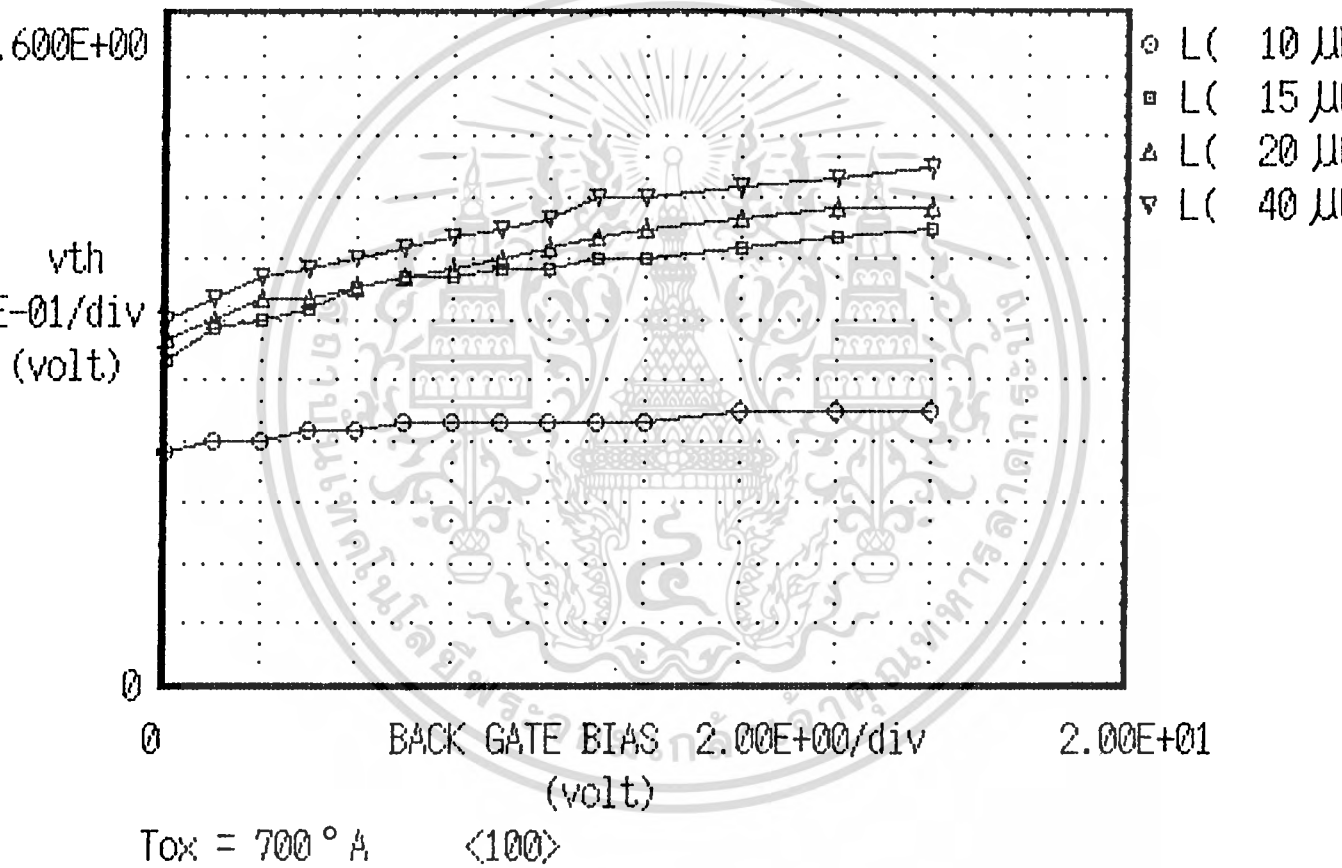


รูปที่ 13.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ  $v_T$  กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $v_{BG}$

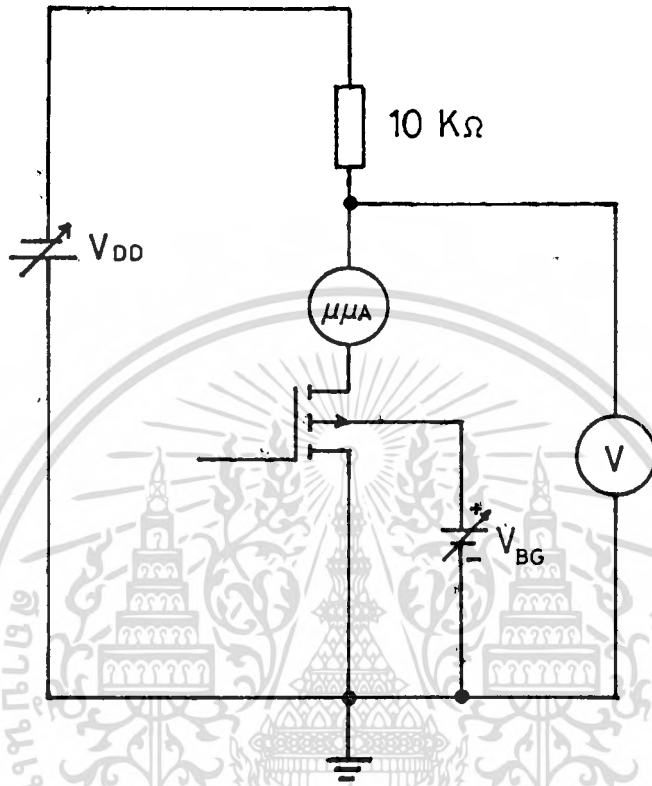
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### DATA PLOTTER (P-ch)

### V<sub>th</sub>-BACK GATE BIAS RELATION



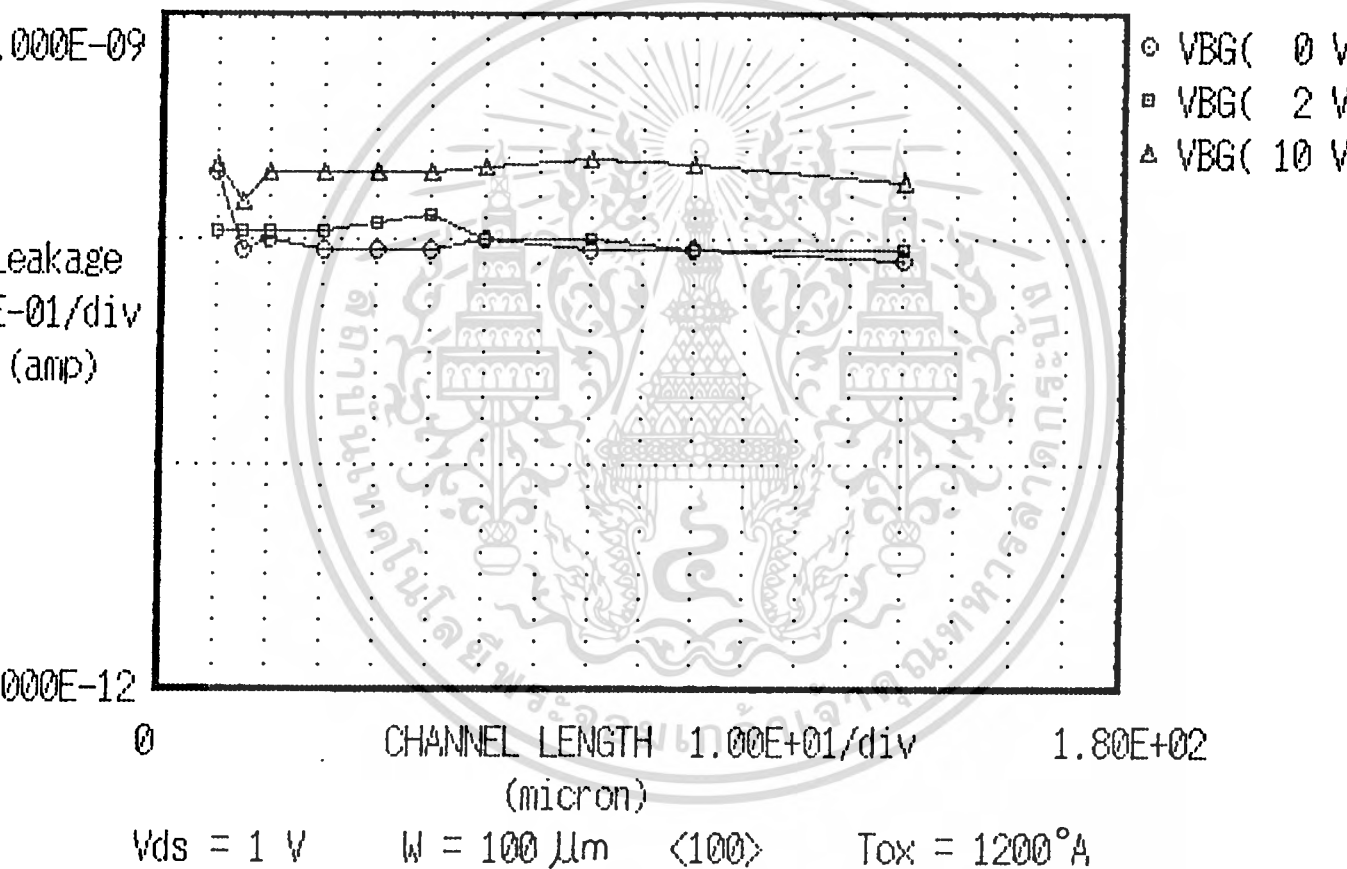
รูปที่ 13.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ ) ที่ความหนาแน่นออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700\text{Å}$



รูปที่ 13.10 วงจรการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ

## DATA PLOTTER (P-ch)

### I : LEAKAGE-CHANNEL LENGTH RELATION



รูปที่ 13.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับความยาวแชนแนล ( $L$ ) ที่ความหนาของเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 1200 °A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ บริเวณปลดพาหะของคานาเครนกับข้อสมานกันไม่เกี่ยวกับผลของความยาวระยะทางแต่อย่างไร

เมื่อมากผลของแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG}$  ซึ่งนอกจากจะทำให้  $V_T$  คงที่มากขึ้นแล้ว ผลที่ตามมาอีกอย่างคือ กระแสรั่วไหล  $I_L$  ก็จะมีมากขึ้นด้วยเช่นที่  $V_{BG} = 0V, I_L = 100 \text{ pA}$  เมื่อเพิ่ม  $V_{BG} = 10V, I_L = 200-300 \text{ pA}$  ทั้งนี้เนื่องจากแรงดัน  $V_{BG}$  จะไปทำให้บริเวณปลดพาหะใต้ชั้นเกตดูรูปที่ 13.3 ขยายเข้ามาในฐานรองมากขึ้น ดังนั้นพื้นที่ที่กระแส  $I_L$  ไหลผ่านได้มีมากขึ้น จึงทำให้  $I_L$  ไหลเพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามค่ากระแส  $I_L$  ที่  $V_{BG} = 10 \text{ V}$  นี้ยังมีค่าน้อยพอยอมรับได้จึงไม่เป็นปัญหาในการที่จะเพิ่ม  $V_{BG}$  ไปถึง  $10V$  ที่  $V_{DS} = 1V$

13.3.5 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับความแตกต่างของแรงดันระหว่างคีโชน 2 ตัว ( $V_{DS}$ ) เมื่อได้รับผลจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ ) ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 13.10 วัดค่ากระแสรั่วไหล

( $I_L$ ) ที่ระยะทางระหว่างคีโชน 2 ตัว ( $L$ )  $20 \mu\text{m}$  ความกว้างแชนแนล ( $W$ )  $100 \mu\text{m}$  ความหนาของเกตออกไซด์  $1200 \text{ \AA}$  ปรับแรงดัน  $V_{DD}$  ให้  $V_{DS}$  มีค่าตั้งแต่  $0-30V$  โดยให้ไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG} = 0V, 2V,$  และ  $10V$  ตามลำดับ นำผลการทดลองไปพล็อตกราฟระหว่าง  $I_L$  กับ  $V_{DS}$

ผลการทดลอง

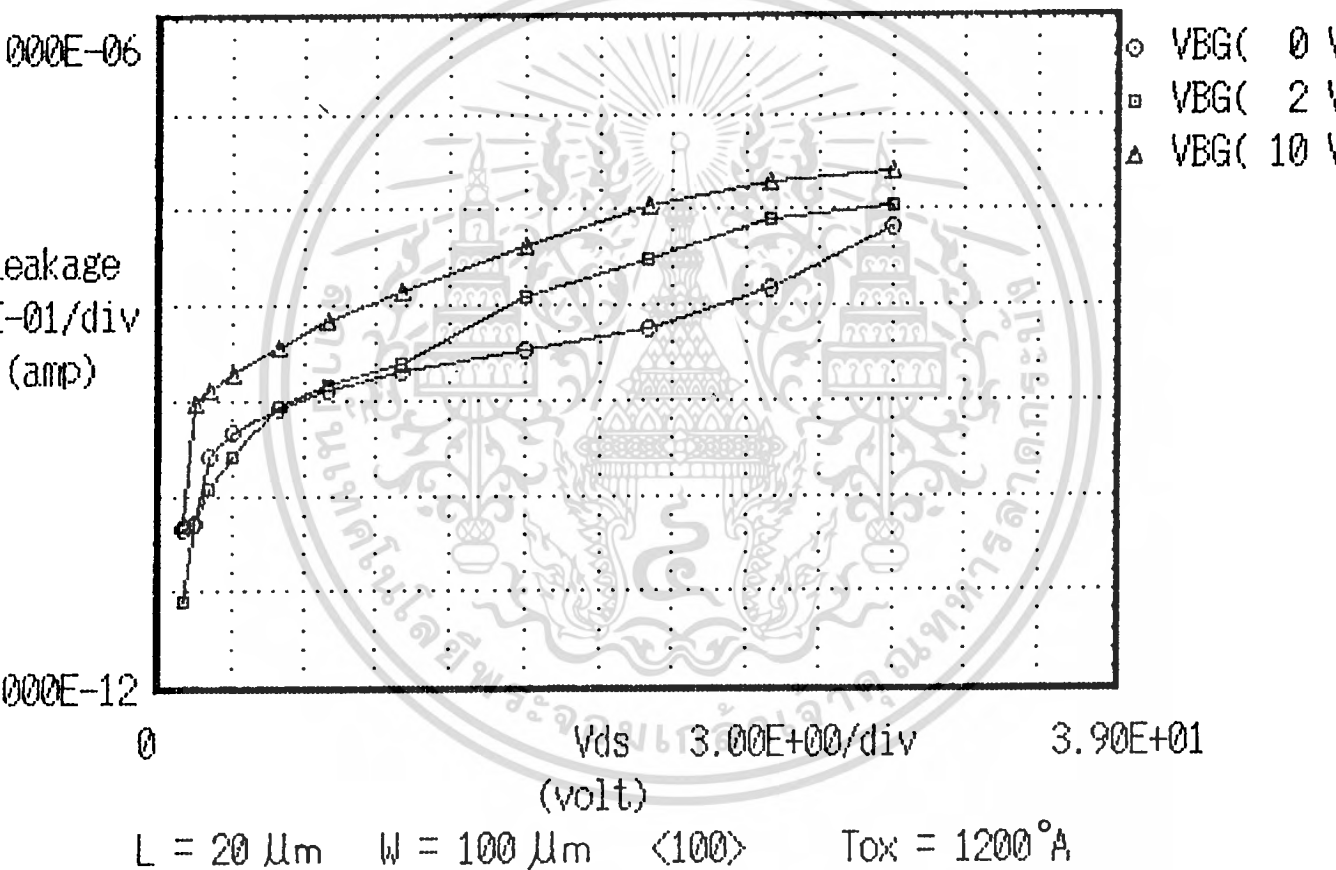
ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 13.12 จากผลการทดลองไม่ว่าที่ 9 ค่ากระแส  $I_L$  เพิ่มขึ้นเมื่อ  $V_{DS}$  เพิ่มขึ้น ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็น

$$I_L \propto V_{DS}$$

ที่แรงดัน  $V_{BG} = 0$  กระแสรั่วไหล  $I_L$  มีค่าสูงสุด =  $80 \text{ nA}$  ที่  $V_{DS} = 30V$  เมื่อเพิ่ม  $V_{BG}$  มากขึ้นเป็น  $2V$   $I_L$  จะไหลเพิ่มขึ้นเป็น  $100 \text{ nA}$  และเมื่อ  $V_{BG} = 10V$   $I_L$  ไหลได้สูงสุด  $200-300 \text{ nA}$  ที่  $V_{DS} = 30 \text{ V}$  กระแส  $I_L$  นี้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ทุก ๆ ค่าของ  $V_{DS}$  แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม  $V_{BG}$  จะไปมีผลทำให้กระแส  $I_L$  ไหลได้สะดวกมากขึ้น จากที่กล่าวมาในหัวข้อการทดลองที่ 13.3.4 ว่า แรงดัน  $V_{BG}$  จะไปทำให้บริเวณปลดพาหะใต้เกตขยายออกเป็นการเพิ่มพื้นที่ ให้กระแส  $I_L$  ไหลได้สะดวกมากขึ้น กระแส  $I_L$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตลอด  $V_{DS}$  ทุกค่า เมื่อ  $V_{BG}$  เพิ่มขึ้น อย่งไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของกระแส  $I_L$  เนื่องจากมีแรงดัน  $V_{BG}$  เพิ่มขึ้นถึง

# DATA PLOTTER (P-ch)

## I<sub>L</sub>-LEAKAGE-V<sub>ds</sub> RELATION



รูปที่ 13.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( $I_L$ ) กับความแตกต่างแรงดันที่โวลต์ 2 ตัว ( $V_{DS}$ ) ที่ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $1200 \text{ \AA}$

10V ก็ยังนับว่ามีค่าน้อย ในปริมาณที่ยอมรับได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของวงจรรวม

### 13.3.6 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )

ทำการทดลองโดยต่อวงจรการทดลองตามรูป 13.5 วัดค่ากระแส  $I_{sub}$  ที่ความยาวแขนแนล (L) 20 $\mu$ m ความกว้างแขนแนล (W) 100  $\mu$ m ความหนาชั้นเกตออกไซด์ 700 $\text{\AA}$  ค่าแรงดันเดรนซอส ( $V_{DS}$ ) 1V ไบอัสแรงดันที่เกต  $V_G$  ตั้งแต่ 0V (ต่อลงกราวด์) ถึง 5V ให้แรงดัน  $V_{BG}$  มีค่าตั้งแต่ 0-20V นำผลการทดลองไปพลอตกราฟระหว่าง  $I_{sub}$  กับ  $V_{BG}$

#### ผลการทดลอง

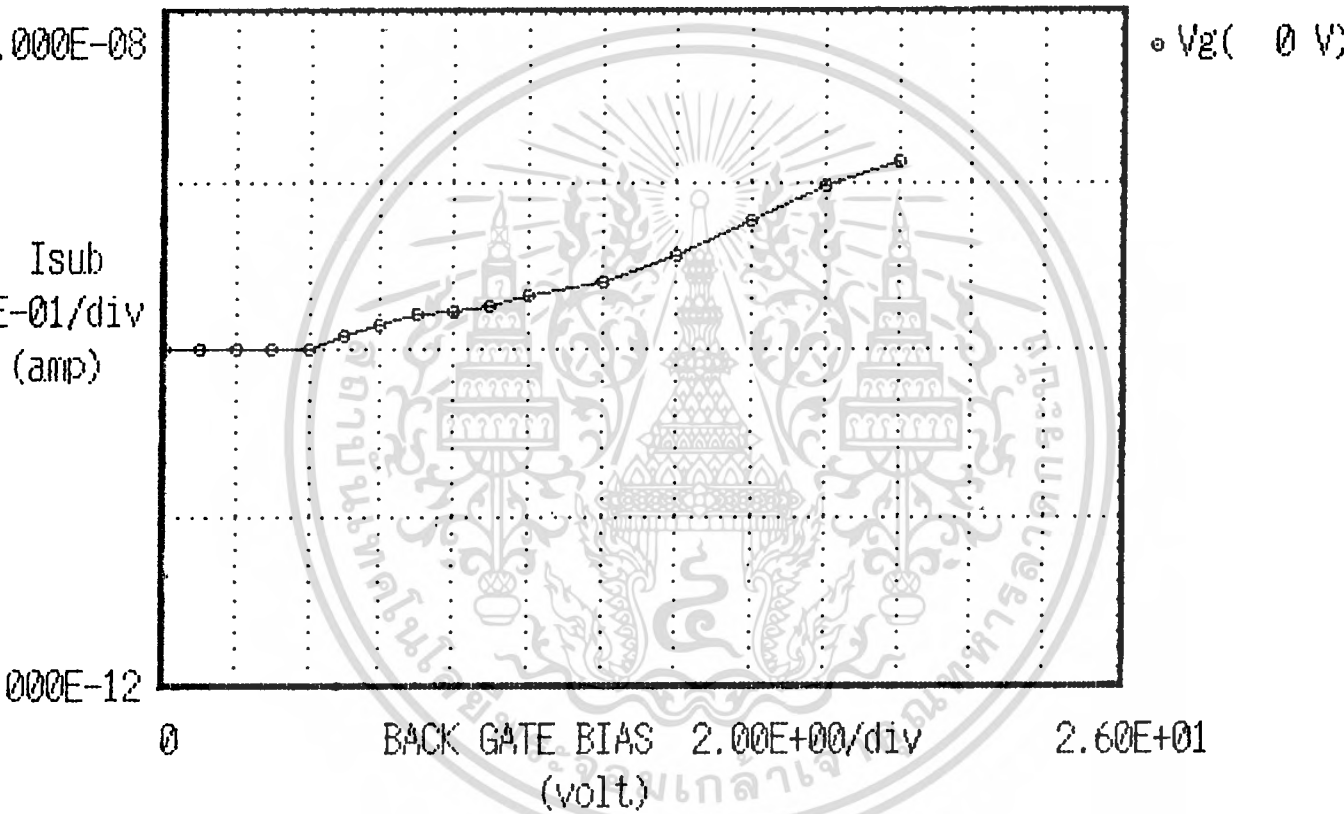
ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 13.13 การให้แรงดัน  $V_G = 0V$  เพื่อไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำแขนแนลขึ้น แรงดัน  $V_{BG}$  จะไปไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อ พี-เอ็น ระหว่างซอสกับฐานรองและเดรนกับฐานรอง ทำให้บริเวณพลาสมาที่ขยายกว้างออกมา ที่แรงดัน  $V_{BG}$  ต่ำ ๆ กระแส  $I_{sub}$  จะคงที่ที่ประมาณ 100 pA แต่เมื่อเพิ่ม  $V_{BG}$  มากกว่า 4V กระแส  $I_{sub}$  เริ่มไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะบริเวณพลาสมาที่ด้าน เดรนและซอสขยายออกมากทำให้  $L_{eff}$  มีค่าน้อยลง เช่น มีค่ากระแส  $I_{sub}$  ประมาณ 1nA ที่  $V_{BG} = 20V, V_{DS} = 1V$  ซึ่งค่านี้นับได้ว่า

ดังนั้นที่แรงดัน  $V_{DS} = 1V$  นี้ เราสามารถให้ไบอัสย้อนกลับได้ถึง 20V โดยไม่เกิดผลกระทบมากนักในเรื่องเกี่ยวกับกระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส

ในรูปที่ 13.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{sub}$  กับ  $V_{BG}$  ที่  $V_G$  มีค่าต่าง ๆ กัน เช่น ที่  $V_G = 3V$  ซึ่งน้อยกว่าค่า  $V_T$  ( $V_T = 3.5V$ ) กระแส  $I_{sub}$  มีค่าประมาณ 100 pA เท่ากับเมื่อให้  $V_G = 0V$  และเมื่อให้  $V_G = 3.5V$  ( $= V_T$ ) จะเกิดการเหนี่ยวนำแขนแนลขึ้น กระแสที่ไหลนี้จึงเป็นกระแสเดรน  $I_D$  แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG}$  มีค่ามากขึ้น กระแส  $I_D$  จะลดลงเนื่องจากบริเวณพลาสมาที่ด้านซอสขยายออกตัดส่วนของแขนแนล และบริเวณแขนแนลใต้เกตถูกกำจัดหมดไป เพราะสนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดัน  $V_{BG}$  ประมาณ 4V สามารถเอาชนะสนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันไบอัส  $V_G$  ได้ แต่เมื่อเพิ่ม  $V_G$  เป็น 4V จะต้องใช้แรงดัน  $V_{BG}$  ประมาณ 8V จึงจะสามารถเอาชนะ  $V_G$  ได้ และต้องใช้  $V_{BG}$  ถึง 16V ที่  $V_G = 4.5V$  แสดงให้เห็นว่าแรงดันไบอัสที่เกต  $V_G$  มีผลต่อการเกิดแขนแนลมากกว่า  $V_{BG}$  แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าต้องใช้

# DATA PLOTTER (P-ch)

## I: SUB-BACK GATE BIAS RELATION

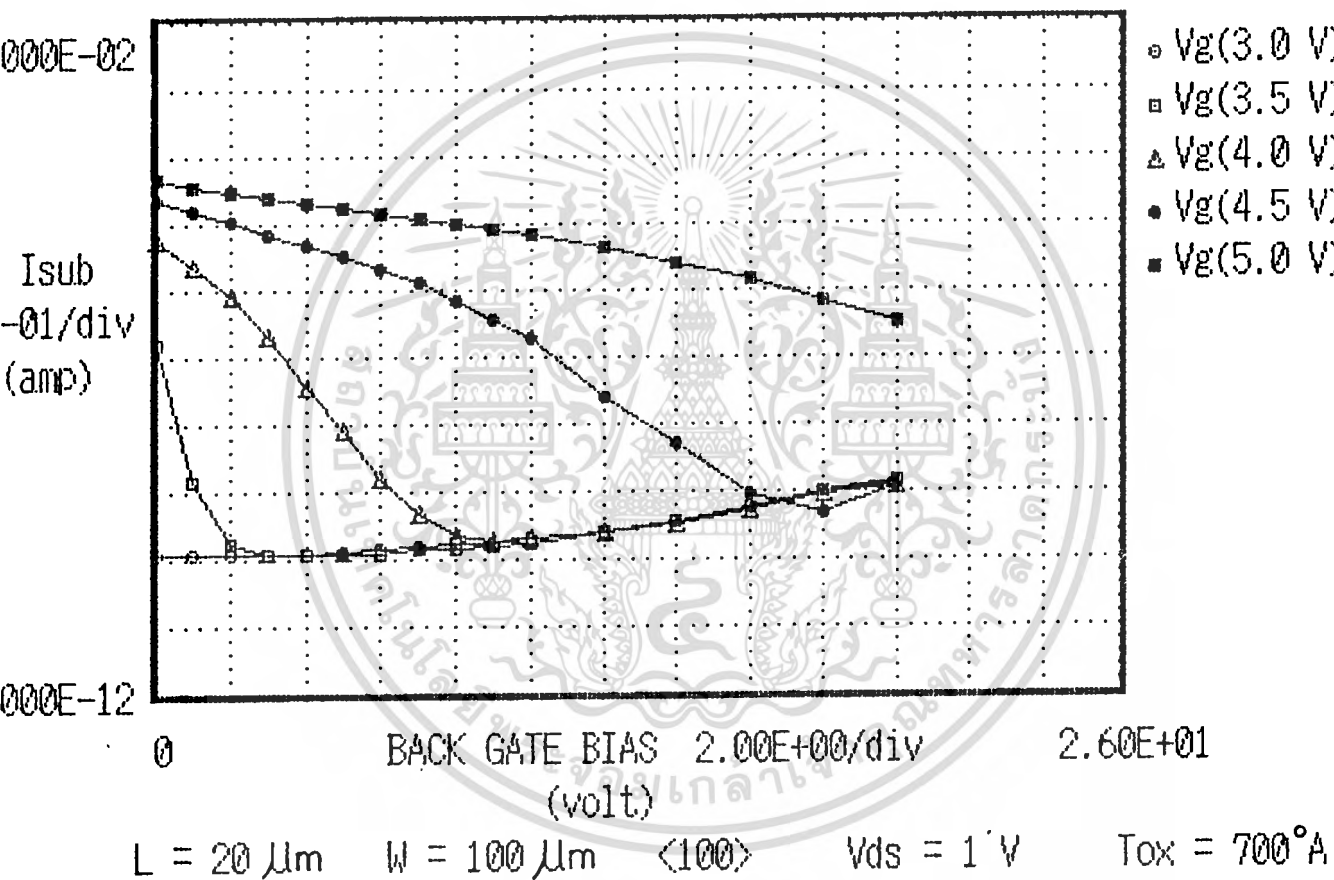


$L = 20 \mu\text{m}$     $W = 100 \mu\text{m}$     $\langle 100 \rangle$     $V_{ds} = 1 \text{ V}$     $T_{ox} = 700 \text{ \AA}$

รูปที่ 13.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ ) ที่ความหนาเขตออกไซด์ ( $T_{ox}$ )  $700 \text{ \AA}$   
 $V_G = 0 \text{ V}$

# DATA PLOTTER (P-ch)

## I: SUB-BACK GATE BIAS RELATION



รูปที่ 13.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลจนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ ) ที่ความหนาเทออกไซด์ ( $T_{ox}$ ) 700 Å มีค่าต่าง ๆ กัน  $> V_T$

แรงดัน  $V_G$  เพิ่มมากขึ้นเพื่อทำให้เกิดชนแนล

ดังนั้นการเพิ่ม  $V_{BG}$  เพื่อป้องกันผลของกระแสไบอัสในตัวเอง (Self-Bias) จากที่กล่าวไว้แล้วในวัตถุประสงค์ สามารถเพิ่มให้ค่าสูง ๆ ได้ โดยยิ่งเพิ่ม  $V_{BG}$  ให้มีค่าสูงขึ้นจะยิ่งทำให้การเปลี่ยนแปลง  $I_{sub}$  มีน้อยลงส่วนค่าแรงดัน  $V_G$  ที่ให้จะมีค่าเกือบคงที่นั่นคือ  $V_T$  มีค่าเกือบคงที่นั่นเอง ดังผลการทดลองที่ 13.3.3 รูปที่ 13.8 สรุปได้ว่ากระแส  $I_{sub}$  จะขึ้นกับ  $V_{BG}$  เมื่อ  $V_{BG}$  สามารถเอาชนะ  $V_G$  ได้ ตามสมการที่ 13.2

$$I_{sub} \propto V_{BG} ; E_{V_{BG}} > E_{V_G} \dots\dots(13.2)$$

13.3.6 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ )

กับแรงดันเดรนซอส ( $V_{DS}$ ) เมื่อได้รับผลจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ )

ทำการทดลองโดยวงจรการทดลองตามรูปที่ 13.5 วัดค่ากระแส  $I_{sub}$  ที่ความยาวชนแนล ( $L$ )  $20 \mu m$  ความกว้างชนแนล ( $w$ )  $100 \mu m$  ความหนาชั้นเกตออกไซด์  $700 \text{ \AA}$  ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_{BG} = 0V, 2V,$  และ  $10V$  ที่แต่ละค่าแรงดัน  $V_{BG}$  ให้แรงดัน  $V_{DS} = 1 V$  และ  $10 V$  ปรับค่าแรงดันที่เกต  $V_G$  ตั้งแต่  $0V - 5.2 V$  นำผลการทดลองไปพล็อตกราฟระหว่าง  $I_{sub}$  กับ  $V_G$

ผลการทดลอง

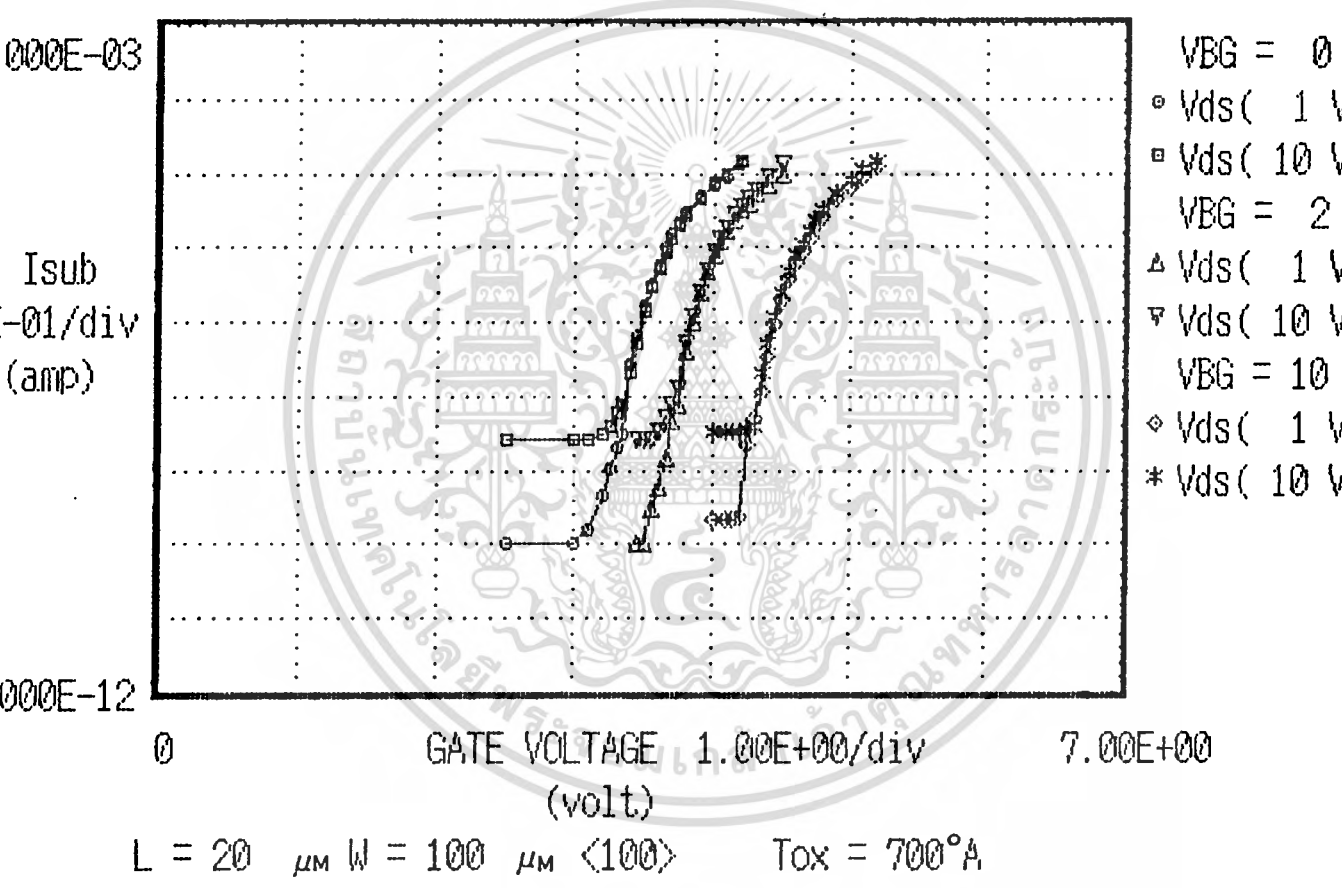
จากการทดลอง เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{sub}$  กับ  $V_{DS}$  ในกรณีที่  $10$  หัวข้อ 10.3.3 ได้ผลว่า  $I_{sub}$  เพิ่มขึ้นเมื่อ  $V_{DS}$  เพิ่มขึ้น หัวข้อ 13.3.3  $V_T$  กับ  $V_{BG}$  และหัวข้อที่แล้ว

(13.3.6)  $I_{sub}$  กับ  $V_{BG}$  นำผลการทดลองทั้ง 3 หัวข้อมาทำการสรุปทดลองในกราฟรูปที่ 13.15 รูปนี้ที่จริงแล้วก็คือการวัดค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) นั่นเอง แต่เพื่อให้เห็นผลของ  $V_{BG}$  เราจึงพล็อตระหว่าง  $I_{sub}$  กับ  $V_G$  ( $V_T$ : พล็อต  $I_D$  กับ  $V_G$ ) จะเห็นว่าเมื่อ  $V_{BG}$  เพิ่มขึ้น ค่า  $V_T$  มีค่าเพิ่มขึ้น(จุดที่กระแส  $I_{sub}$  ไหลเท่ากับ  $1 \mu A$ ) กระแสรั่วไหล  $I_{sub}$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เช่นที่  $V_{DS} 1V$   $I_{sub}$  เพิ่มขึ้นจากเดิม  $100 PA$  เป็นประมาณ  $200 PA$  ส่วน  $V_{DS} 10 V$   $I_{sub}$  เพิ่มขึ้นจากเดิม  $2 nA$  เป็นประมาณ  $3-4 nA$

ดังนั้นแรงดัน  $V_{BG}$  นอกจากมีผลต่อแรงดันวิกฤติ  $V_T$  โดยตรงแล้วผลกระทบด้านอื่นเกี่ยว

# DATA PLOTTER (P-ch)

## I : SUB-GATE VOLTAGE RELATION



รูปที่ 13.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) กับแรงดันไบอัสที่เกต ( $V_G$ ) เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $V_{BG}$ ) และแรงดัน  $V_{DS}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับกระแสรั่วไหล  $I_L$  หรือ  $I_{sub}$  มีผลน้อยมาก

### 13.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมด เราได้ข้อสรุปดังนี้คือ ผลของ  $V_{BG}$  ทำให้

1. ค่าแรงดันวิกฤติ ( $V_T$ ) เพิ่มขึ้นแต่จะมีความคงที่มากขึ้น เมื่อ  $V_{BG}$  มีค่าสูง ๆ
2. ค่ากระแสรั่วไหลระหว่างมอส 2 ตัว ( $I_L$ ) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย
3. ค่ากระแสรั่วไหลจนถึงจุดนำกระแส ( $I_{sub}$ ) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อ  $E_{V_{BG}}$

สามารถเอาชนะ  $E_{V_{BG}}$  ได้

จากผลของ  $V_{BG}$  ทั้ง 3 ข้อ เราได้ข้อวิเคราะห์ว่า แรงดัน  $V_{BG}$  มีประโยชน์มากกว่าผลเสียที่ติดตามมา เช่นการใช้  $V_{BG}$  ในการป้องกันผลของการไบอัสตัวเอง ในวงจรรวม ทำให้  $V_T$  เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้จะมีผลคือทำให้ผลของ Short channel effect และ Narrow channel effect ลดลง นอกจากนี้ยังมีผลเสียคือการเพิ่มปริมาณของกระแสรั่วไหล  $I_L$  และ  $I_{sub}$  ด้วย แต่เพิ่มขึ้น เป็นหน่วยของนาโนแอมป์เท่านั้นจึงมีน้อยมาก และแม้ว่าจะเพิ่ม  $V_{BG}$  กับ  $V_{DS}$  ให้มากขึ้น ก็ไม่ทำให้  $I_L$  กับ  $I_{sub}$  นี้เพิ่มขึ้นมากเท่าไรซึ่งค่าทั้งหมดนี้เป็นค่าที่มีปริมาณน้อยมากสามารถยอมรับได้ การให้ไบอัสย้อนกลับจึงเป็นผลดีมากกว่าผลเสีย ในการออกแบบ วงจรรวมที่มีการทำงานที่ต้องการจุดแรงดันวิกฤติที่แน่นอนมาก เช่น วงจร Schmitt trigger มักมีการออกแบบให้ไบอัสย้อนกลับที่ฐานรองด้วย

บทที่ 14

สรุปผลขอมูลที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 3

ขั้นตอนการสร้าง

- orientation <100>
- $\rho = 10 \text{ } \Omega\text{-cm}$
- THK = 400  $\mu\text{m}$
- $\text{SiO}_2 = 5000 \text{ } \text{Å}$  ที่อุณหภูมิ  $T = 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$  เวลา  $t_{\text{dry}} = 60 \text{ นาที} + t_{\text{wet}} = 30 \text{ นาที} + t_{\text{dry}} = 10 \text{ นาที}$
- แผลงลายสารเจือชนิด P คือแผ่น BN ชนิด M-grade ที่อุณหภูมิ  $T = 970 \text{ } ^\circ\text{C}$  เวลา  $t = 20 \text{ นาที}$
- ชั้นเกทออกไซด์ ( $T_{\text{ox}}$ ) = 700  $\text{Å}$  ที่อุณหภูมิ  $T = 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$  เวลา  $t_{\text{dry}} = 40 \text{ นาที}$
- ทำขั้วสัมผัสโลหะเคลือบด้วยอลูมิเนียม  $\phi = 1\text{mm}$ , ยาว 10 mm 6 เส้น/4 แผ่น wafer ที่มี  $\phi = 1 \text{ นิ้ว}$

บทที่ 4

การศึกษาพารามิเตอร์ทางโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ (Large Geometry dependence)

- $I_D \propto \frac{W}{L \cdot T_{\text{ox}}}$
- $V_T \propto T_{\text{ox}}$

บทที่ 5

ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงค่าได้โดยใช้แรงดันขั้วควบคุม (VCR)

- ช่วงโอห์ม (100  $\Omega$  - 2.2 k $\Omega$ )
- $L = 10 \text{ - } 100 \text{ } \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = 2000 \mu\text{m}$$

$$V_G = 6 - 10 \text{ V}$$

- ช่วงกิโลโหม้ม (20 k $\Omega$  - 900 k $\Omega$  )

$$L = 200 - 2000 \mu\text{m}$$

$$W = 100 \mu\text{m}$$

$$V_G = 6 - 10 \text{ V}$$

- ช่วงเม็กกะโหม้ม (400 k $\Omega$  - 9 M $\Omega$  )

$$L = 200 - 2000 \mu\text{m}$$

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

$$V_G = 6 - 10 \text{ V}$$

บทที่ 6

การสร้างวงจรรวมพื้นฐาน (Basic Integrated Circuit)

- อินเวอร์เตอร์ เป็นแบบ PELS

- มอสโพลิต ทำงานในช่วงอิมิตัว

$$L = 200 \mu\text{m}$$

$$W = 100 \mu\text{m}$$

- มอสตัวขั้ว

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

$$W = 200 \mu\text{m}$$

- เบตาเรโซ (B<sub>r</sub>) > 10

บทที่ 7

ผลของขนาดความยาวแชนแนล (channel Length effect)

- L สั้นที่สุด ที่มอสเฟตยังทำงานเป็นปกติได้ มีค่า 20  $\mu\text{m}$

- Side-diffusion = 10  $\mu\text{m}$

- L<sub>eff</sub> = 10  $\mu\text{m}$

บทที่ 8

ผลของขนาดความกว้างแชนแนล (channel width effect)

- $W$  แคบที่สุดที่มอสเฟตยังทำงานเป็นปกติได้มีค่า =  $40 \mu\text{m}$

บทที่ 9

ผลของระยะห่างระหว่าง MOSFET 2 ตัวใกล้กัน (Space leakage)

- $L$  ที่ใกล้กันมากที่สุด =  $20 \mu\text{m}$
- $W$  =  $100 \mu\text{m}$
- $V_{DS}$  มากที่สุด =  $30 \text{ V}$
- $I_L$  มากที่สุด =  $0.1 \mu\text{A}$

บทที่ 10

กระแสรั่วไหลก่อนถึงจุดนำกระแส (Subthreshold current)

- $L$  สั้นที่สุด =  $20 \mu\text{m}$
- $W$  =  $100 \mu\text{m}$
- $V_{DS}$  มากที่สุด =  $20 \text{ V}$
- $I_{sub}$  มากที่สุด =  $0.1 \mu\text{A}$

บทที่ 11

ปรากฏการณ์ของมอสทรานซิสเตอร์แฝงใน PMOS (Parasitic MOS transistor phenomena in POMS)

- ควรมีการครีบลมรอบ ดีไวซ์ แต่ละตัว
- ความกว้างของการครีบลม =  $10 \mu\text{m}$
- $L$  ที่ใกล้กันมากที่สุด =  $20 \mu\text{m}$
- ออกไซด์ที่สร้างคลุมบริเวณที่ไม่ต้องการสร้างดีไวซ์ควรมีความหนาไม่น้อยกว่า  $5000 \text{ \AA}$

บทที่ 12

แรงดันสูงสุดที่ทนได้ (Sustain voltage)

- $V_B$  =  $75 \text{ V}$

บทที่ 13 ผลของเบ็คเกตไบอัส (Back gate bias effect)

$$-V_{BG} = 2V$$

ในการสร้าง PMOS เพื่อหาขนาดคิไวซ์ที่เล็กที่สุดที่ยังสามารถทำงานได้ตามปกติ เราได้ขนาด

$$L_{min} = 20 \mu m, W_{min} = 40 \mu m, T_{ox min} = 700 \text{ \AA}$$

เมื่อรวมขนาดความกว้างของการคิริง 10  $\mu m$  และระยะห่างจากการคิริงถึงคิไวซ์ข้างเคียงอีก 10  $\mu m$  เราจะได้ระยะห่างจากคิไวซ์ 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน ( $L_{p min}$ ) มีค่า 30  $\mu m$

$$\text{คิริงบนพหุคิไวซ์ที่เล็กที่สุด (A}_{device}) \quad W = 70 \mu m, L = 50 \mu m$$

$$\text{นั่นคือ } A_{device} = 3500 \text{ mm}^2$$

$$\text{ถ้าเราใช้ขนาดพหุคิไวซ์ (A}_{chip}) = 2 * 2 \text{ mm}^2$$

$$\text{จะสามารถสร้างคิไวซ์ได้ทั้งสิ้นจำนวน} = 1,142 \text{ ตัว}$$

$$\text{หรือ} = 285 \text{ ตัว/mm}^2$$

แต่อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องเสียพื้นที่ไปบางส่วน เพื่อใช้เป็นขั้วต่อสายกับขา ICs

(Bonding Pad) คิริงจำนวนคิไวซ์ต่อพหุคิไวซ์มีจำนวนลดลงกว่านี้อีก

ตัวอย่างตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ทิสรางชน กับ ทิมชายในทองคลาด

PMOS ทิสรางชน	PMOS ทิมชายในทองคลาด
$L = 20 \mu m, W = 40 \mu m, T_{ox} = 700 \text{ \AA}$	P-ch ใน CMOS # 4700 (MOTOROLA)
$V_{th} = 2.6 \text{ V}$	$V_{th} = 1.6 \text{ V}$
ที่ $V_G = 10 \text{ V}; V_D = 10 \text{ V}; I_D = 1 \text{ mA}$	$I_D = 20 \text{ mA}$
$V_B = 75 \text{ V}$	$V_B = 35 \text{ V}$
ที่ $V_D = 10 \text{ V}; C_L = 24 \text{ PF}; T_{pd} = 3.5 \mu s$	$T_{pd} = 25 \text{ ns}$
$T_r, T_f = 0.95 \mu s$	$T_r, T_f = 50 \text{ ns}$
$f_g = 368 \text{ KHz}$	$f_g = 7 \text{ MHz}$
ที่ $V_D = 5 \text{ V}; NM. = 4 \text{ V}$	$NM. = 2.5 \text{ V}$

จากการเปรียบเทียบข้อมูลแสดงให้เห็นว่าขนาดคิไวซ์ที่สร้างขึ้นมาขนาดใหญ่ซึ่งมีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดความกว้างความยาวของแซนแนล คิริงค่าความจุไฟฟ้าภายในคิไวซ์จึงมีค่าสูง เป็นผลทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ต่ำกว่าที่มชายอยู่ภายในทองคลาด ถ้าต้องการปรับวงจรให้เล็กให้ดียิ่งขึ้นก็สามารถทำได้

โดยการลดขนาดคิไวซ์ให้เล็กลงมากกว่านี้อีก ซึ่งหมายถึงต้องมีการปรับปรุงขั้นตอนการสร้างให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ได้ ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์สมชัย วงษ์เมตตา อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำอันมีประโยชน์ต่องานวิจัยนี้อย่างมาก ขอขอบคุณนายอัยยู่สุข ธนบุรีรัตน์ นักศึกษาปีที่ 4, นายโกมุท กมลประจักษ์, นายศุภร รุ่งเรืองชัยพร นักศึกษาปีที่ 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ช่วยทดลอง วัตถุประสงค์ต่าง ๆ และขอขอบคุณ คุณฉรินทร บุญสิทธิ์ ที่ช่วยกรุณาพิมพ์และตรวจทานวิทยานิพนธ์ จนเรียบร้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดตทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชัย วงษ์เมตตา, สมเกียรติ ศุกุเดช, "การออกแบบและการสร้างมอสเฟตแบบที่แขนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด"  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 7, 2527,  
pp. ข 52 - ข 72
- [2] สมชัย วงษ์เมตตา, สมเกียรติ ศุกุเดช, "การออกแบบและการสร้างมอสอินเวอร์เตอร์ แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด"  
วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 กุมภาพันธ์ 2528, pp. 65-79
- [3] สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, สมเกียรติ ศุกุเดช, "การออกแบบและการสร้างมอสเฟตแบบ เอ็น- แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด",  
วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 กุมภาพันธ์ 2528, pp 80-92
- [4] สำราญ หวังสีศิริเพชร, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, สมเกียรติ ศุกุเดช, "พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอสเฟตที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางเรขาคณิต",  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 8, 2528,  
pp.1.75-1.100
- [5] สำราญ หวังสีศิริเพชร, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, สมเกียรติ ศุกุเดช "การออกแบบและการ สร้าง มอสอินเวอร์เตอร์และการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติของ เอ็นมอส, พีมอสและซีมอส อินเวอร์เตอร์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 8 2528, pp.1.46-1.74
- [6] สำราญ หวังสีศิริเพชร, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, สมเกียรติ ศุกุเดช, "ผลของความยาวแขน- แนลที่สั้นมาก ๆ ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ P-channel MOSFET", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มิถุนายน 2529, pp.75-84
- [7] Karl F kroell and Gerhard k Ackermann "Threshold Voltage of Narrow Channel Field Effect Transistors", Solid State Electronics, 1976, Vol.19, pp 77-81

- [8] C.A.T Salama, "A New Short Channel MOSFET Structure (UMOST)", Solid State Electronics, 1977, Vol.20, pp 1003-1009
- [9] Hwa-Nien Yu, Arnold Reisman, Carlton M.Osburn, Dale L Critchow, "1  $\mu$  m MOSFET VLSI Technology : Part I - An Overview" , IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol SC-14, No.2, April 1979, pp:240-246
- [10] Robert H. Dennard, Fritz H. Gasnsslen, Edward J. Walker, Peter W. Cook," 1  $\mu$ m MOSFET VLSI Technology : Part II-Device Designs and Characteristic High-Performance Logic Applications", IEEE Journal of Solid-state circuits, Vol. sc-14, No.2, April 1979, pp 247-255
- [11] Peter W. Cook, Stanley I. Schuster, James T. Parrish, Victor Dilonardo, Darrye R.Freedman, " 1  $\mu$ m MOSFET VLSI Technology : Part III - Logic Circuit Design Methodology and Applications", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-14, No.2, April 1979, pp 255-268
- [12] Tak H. Ning, Peter W. Cook, Robert H. Dennard, Carlton M Osburn, Stanley E. Schuster, Hwa-Nien Yu," 1  $\mu$  m MOSFET VLSI Technology : Part IV - Hot Electron Design Constraints", IEEE Journal of Solid-state Circuits, Vol. SC-14, No.2, April 1979, pp. 268-274
- [13] William R. Hunter, Linda Ephrath, Warrend. Grobman, Carlton M. Osburn, Billy L. Crowder, Alice Cramer, Hans E. Luhn," 1  $\mu$ m MOSFET VLSI Technology : Part V-A Single-Level Poly Silicon Technology Using Electron-Beam Lithography", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-14, No.2 ,April 1979, pp. 275-281
- [14] Warren D. Grobman, Hans E. Luhn, Tomas P. Donohue, Albert J. Speth, Alan wilson, Michael Hatzakis, T.H.P. Chang," 1  $\mu$ m MOSFET Technology : Part VI Electron-Beam Lithography", IEEE Journal of Solid-State

Circuits, Vol. SC-14, No.2, April 1979, pp. 282-290

- [15] Billy L. Crowder, Stanley Zirinsky, " 1  $\mu$ m MOSFET VLSI Technology: Technology: Part VII-Metal Silicide Interconnection Technology-A Future Perspective", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-14, No.2, April 1979, pp. 291-293
- [16] John M. Aitken, " 1  $\mu$ m MOSFET VLSI Technology : Part VIII - Radiation Effects", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol SC-14, No.2, April 1979, pp. 294-301
- [17] William N. carr, Jack P. Mize "MOS/LSI Design and Application", Mc Graw-Hill, Inc., 1972
- [18] Douglas J Hamilton, William G Howard. "Basic Integrated Circuit Engineering", Mc-Graw-Hill, Inc., 1975
- [19] Sorale K Ghandhi, "VLSI Fabrication Principles", John Wiley & Sons, Inc, 1983
- [20] E.H Nicollian, IR Brews, "Mos (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, John Wiley & Sons, Inc, 1982
- [21] Oliver J Mc Carthy, "MOS Devices and Circuit Design", John Wiley & Sons, Inc, 1982
- [22] Dewitt G Ong , " Modern MOS Technology, Process, Devices and Design", MC Graw-Hill , Inc, 1984
- [23] Paul Richman, "MOS Field Effect Transistors and Integrated Circuit", John Wiley Sons & Inc, 1973
- [24] The Application Staff of Siliconix, Inc., Arthur D. Evans, " Designing with Field Effect Transistors ", Mc Graw-Hile, Inc, 1981
- [25] S.M. Sze " VLSI Technology ", Mc GHraw-Hill Book company, 1983
- [26] Saburo Muroga, " VLSI System Design" , John Wiley & Sons, Inc., 1982

- [27] Ronald F Ayres, "VLSI silicon compilation and the art of automatic microchip design ", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1983
- [28] William M Penney, Lillian lau, " Mos Integrated Circuits Theory, Fabrication, Design and System Applications of MOS LSI ", Van Nostand Reinhold Company, 1972
- [29] Louis Naslelsky, " Introduction to Digital Computer Technology", John Wiley & Sons, Inc., 1972, 1977
- [30] H. Troy Nagle Jr., B.D. Carroll, J . David Irwin, "An Introduction to Computer logic", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1975
- [31] Albert Paul Malvino, " Electronic Principles " , Mc Graw-Hill , Inc. , 1979

Appendix A

SI letter Symbols Derived from Pioneers

Unit	Symbol	name
ampere	A	Ampere
bel	B	Bell
coulomb	C	Coulomb
curie	Ci	Curie
farad	F	Faraday
gauss	G	Gauss
gilbert	Gb	Gilbert
henry	H	Henry
Hertz	Hz	Hertz
joule	J	Joule
kelvin	K	Kelvin
lambert	L	Lambert
maxwell	Mx	Maxwell
neper	Np	Neper
oersted	Oe	Oersted
ohm	$\Omega$	Ohm
roentgen	R	Roentgen
siemens	S	Siemens
tesla	T	Tesla
volt	V	volta
watt	W	Watt
weber	Wb	Weber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix B

Multiplier - Prefix - Abbreviation table

multiplier	Prefix	Abbreviation
$10^{18}$	exa	E
$10^{15}$	peta	P
$10^{12}$	tera	T
$10^9$	giga	G
$10^6$	mega	M
$10^3$	kilo	k
$10^2$	hecto	
$10^1$	deka	
$10^{-1}$	deci	d
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

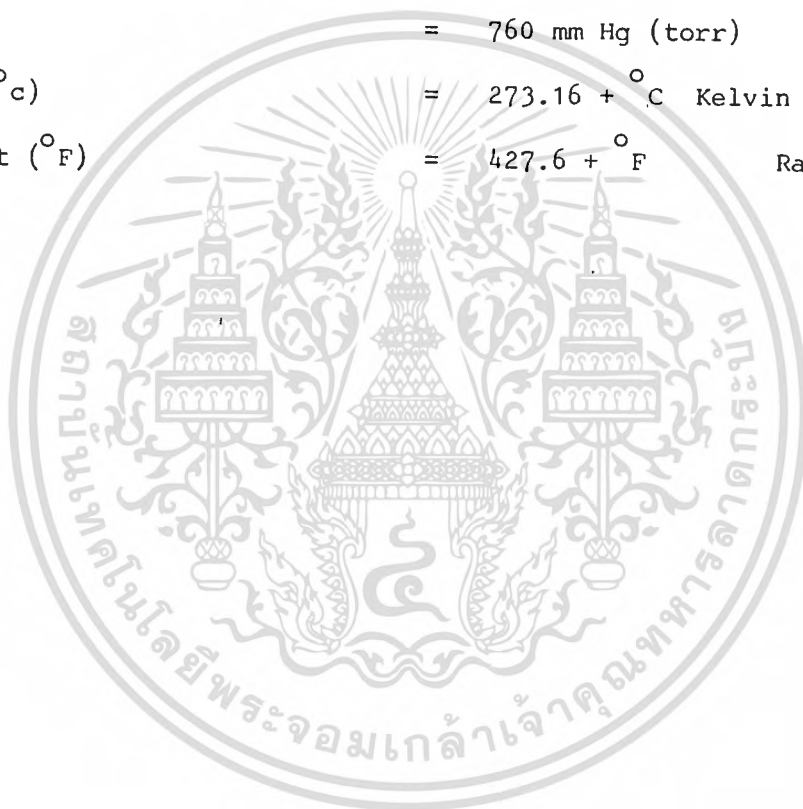
## Appendix c

## Conversion table

1 angstrom ( $^{\circ}\text{A}$ )	= $10^{-10}$	m
	= 0.1	micron
1 inch	= 1000	mil
	= 2.54	cm.
1 mile	= 1.61	km.
1 mile/hour	= 0.447	m/s
1 ft/s	= 0.305	m/s
1 year	= 365.2422	day
	= $8.766 \times 10^3$	hr
	= $5.259 \times 10^5$	min
	= $3.156 \times 10^7$	sec
1 lb.	= 0.4536	kg.
1 slug	= 14.3	kg.
1 newton	= $10^5$	dyne
1 lb-force	= 4.448	newton
1 joule	= $10^7$	erg
	= $6.424 \times 10^{12}$	MeV
1 eV	= $1.6 \times 10^{-19}$	joule
	= 23.1	K.cal
1 k.cal	= $4.186 \times 10^3$	joule
1 watt	= 1	joule/sec
	= $2.389 \times 10^{-4}$	k.cal/sec
1 hp.	= 745.7	watt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 degree	=	0.01754	radian
$\pi$ radians	=	180	degree
$e = 1 + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots + \frac{1}{n!}$	=	2.71828	
$\ln x$	=	2.3026 log x	
$\log e$	=	0.43429	
$\ln 2$	=	0.693	
ความกดคั่น 1 บรรยากาศ	=	$1.033 \times 10^4$	$\text{kg/m}^2$
	=	760 mm Hg	(torr)
Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )	=	$273.16 +$	$^{\circ}\text{C}$ Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ )
Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ )	=	$427.6 +$	$^{\circ}\text{F}$ Rankine ( $^{\circ}\text{R}$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix D

Physical constants

Quantity	Symbol	Magnitude
มวลอิสระของอิเล็กตรอน	$m_e$	$9.11 \times 10^{-31}$ kg.
มวลอิสระของโปรตรอน	$m_p$	$1.673 \times 10^{-27}$ kg.
มวลอิสระของนิวตรอน	$m_n$	$1.675 \times 10^{-27}$ kg.
ประจุของอิเล็กตรอน	$q(e)$	$1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb
อัตราส่วนระหว่างประจุและมวลอิสระของอิเล็กตรอน	$e/m_e$	$1.76 \times 10^{11}$ coul/kg.
ค่าคงที่ของพลังค์	$h$	$6.624 \times 10^{-34}$ Joule-sec
ค่าคงที่ของโบสท์มันน์	$k$	$1.380 \times 10^{-23}$ Joule/ $^{\circ}$ k
		$8.620 \times 10^{-5}$ eV/ $^{\circ}$ k
ค่าคงที่สเตฟาน-โบสท์มันน์	$\sigma$	$5.670 \times 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> . $^{\circ}$ K <sup>4</sup>
จำนวนอะโวกาโด	$N_{AVO}$	$8.02 \times 10^{28}$ (K mole) <sup>-1</sup>
ค่าคงที่ของกาซ	$R_o$	$8.317 \times 10^3$ Joule/k. mole . $^{\circ}$ k
ความเร็วแสง	$c$	$2.998 \times 10^8$ m/s
ค่าคงที่ของแรงคูลอมบ์	-	$\frac{1}{4\pi\epsilon_o} = 9 \times 10^9$ nt m <sup>2</sup> /Coul <sup>2</sup>
อัตราส่วนของมวลระหว่างโปรตรอนและอิเล็กตรอน	$m_p / m_e$	1.836
Permittivity ของสุญญากาศ	$\epsilon_o$	$8.854 \times 10^{-12}$ F/m $(\frac{10^9}{4\pi C^2})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dielectric constant ของ $S_i$	$\epsilon_s$	12
Dielectric constant ของ $SiO_2$	$\epsilon_{ox}$	4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Appendix E Physical constants

ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อซิลิกอน	$\mu_n$	1350	$\text{cm}^2/\text{v-sec}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว ระนาบ <100>	$\mu_{ns}$ <100>	400	$\text{cm}^2/\text{v-sec}$
ระนาบ <111>	$\mu_{ns}$ <111>	600	$\text{cm}^2/\text{v-sec}$
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อซิลิกอน	$\mu_p$	480	$\text{cm}^2/\text{v-sec}$
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวระนาบ <100>	$\mu_{ps}$ <100>	130	$\text{cm}^2$
ระนาบ <111>	$\mu_{ps}$ <111>	190	$\text{cm}^2$
permeability ของสุญญากาศ	$\mu_o$	$1.257 \times 10^{-8}$ ( $4\pi \times 10^{-9}$ )	H/cm
ศักย์ความร้อน ( $T = 300^\circ\text{K}$ )	$\frac{kT}{q}$	0.0259	Volt
ความกว้างของระดับพลังงานในแถบ ต้องห้าม ( $T = 300^\circ\text{K}$ )	$E_g$	1.1	eV
จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น จากแถบวาเลนซ์เข้าไปในแถบความนำ ของซิลิกอน ( $T = 300^\circ\text{K}$ )	$n_i$	$1.4 \times 10^{10}$	(/cm <sup>3</sup> )

Appendix F

List of Symbols

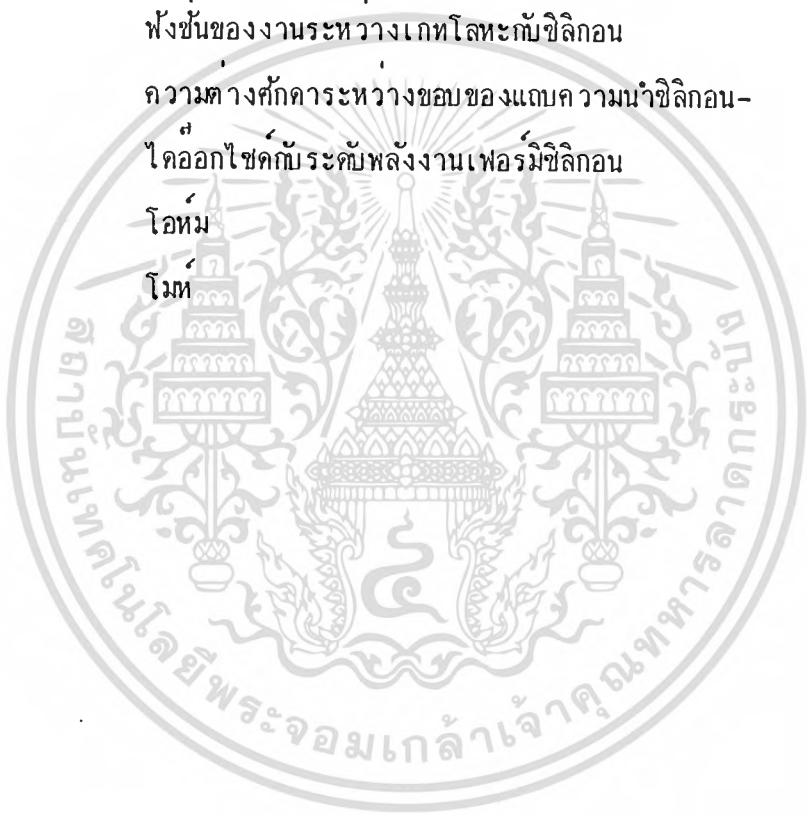
Symbol	Name	Unit
$C_o$	ความจุไฟฟ้าที่เกทออกไซด์	F/cm <sup>2</sup>
$C_G$	ความจุไฟฟารวมที่เกท	F/cm <sup>2</sup>
$C_L$	ความจุไฟฟ้าโหลด	F/cm <sup>2</sup>
$C_s$	ความจุไฟฟ้าในเนื้อซิลิกอน	F/cm <sup>2</sup>
$C_{fs}$	ความจุไฟฟ้าที่ผิว	F/cm <sup>2</sup>
$E_C$	ระดับพลังงานที่ส่วนกลางสุดของแถบความนำ	eV
$E_f$	ระดับพลังงานเฟอร์มิ	eV
$E_g$	ความกว้างของระดับพลังงานในแถบต้องห้าม	eV
$E_i$	ระดับพลังงานอินทรินซิก	eV
$E_V$	ระดับพลังงานส่วนบนสุดของแถบวาเลนซ์	eV
$f_o$	ความถี่ที่ตอบสนองสูงสุดของมอสเฟต	Hz
$f_g$	ขีดจำกัดความถี่ของวงจรรวม	Hz
$g_m$	ทรานคอนดักแตนซ์	mho
$g_{mD}$	ทรานคอนดักแตนซ์ของมอสต์วัชซ์	mho
$g_{mL}$	ทรานคอนดักแตนซ์ของมอสต์โหลด	mho
$g_{m\ sat}$	ทรานคอนดักแตนซ์ที่อิ่มตัว	mho
$g_{sd}$	คอนดักแตนซ์	mho
$g_{sd\ sat}$	คอนดักแตนซ์ที่อิ่มตัว	mho

$I_D$	กระแสเดรน	A
$I_{DSS}$	กระแสเดรนอิ่มตัว	A
$k$	ค่าคงที่ของไบสต์มันน์	joule/ $^{\circ}K$
$L$	ความยาวแขนแนล	cm
$L_{eff}$	ความยาวแขนแนลจริง	cm
$\Delta L$	ความกว้างของบริเวณที่เพลทซ์ขึ้นคานเดรน	cm <sup>-3</sup>
$n_i$	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ	cm <sup>-3</sup>
$n_A$	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในอินทรีนซิค	cm <sup>-3</sup>
$N_D$	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ	cm <sup>-3</sup>
$p$	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้	cm
$p$	ความหนาแน่นของโฮลอิสระ	cm
$q$	ประจุของอิเล็กตรอน	coulomb
$Q_B$	ความหนาแน่นประจุบริเวณพลาสมาที่ผิวขณะได้รับแรงดันถึงจุดที่ทำให้เกิดชั้นกลับพอด์	coulomb/cm <sup>2</sup>
$Q_{OX}$	ความหนาแน่นประจุในซิลิกอนไดออกไซด์	coulomb/cm <sup>2</sup>
$Q_{SS}$	ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัสระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอน	coulomb/cm <sup>2</sup>
$R_L$	ความต้านทานโหลด	ohm
$R_{sd}$	ความต้านทานแขนแนล	ohm
$R_{sd sat}$	ความต้านทานแขนแนลอิ่มตัว	ohm
$t$	เวลา	sec
$T$	อุณหภูมิ	$^{\circ}K$
$T_f$	fall time	sec
$T_{ox}$	ความหนาแน่นของชั้นเกตออกไซด์	cm
$T_{pd}$	กำหนดวงเวลาในการส่งผ่านสัญญาณ	sec
$T_r$	rise time	sec

$V_B$	แรงดันพังทะลาย	v
$V_{Bi}$	ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อ พี-เอ็น	v
$V_{BG}$	แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ขั้วเกรท	v
$V_D$	แรงดันระหว่าง เทรน-ซอส	v
$\Delta V_{DT}$	ค่าแรงดันวิกฤติที่เปลี่ยนไปเนื่องจากผลของความแพร่กระจายสารเจือในเนื้อซิลิกอน	v
$V_G$	แรงไบอัสที่เกต	v
$V_P$	แรงดันพินซอเอฟ	v
$V_T$	แรงดันวิกฤติ	v
$w$	ความกว้างแซนแนล	cm
$w_{eff}$	ความกว้างแซนแนล ริง	cm
$X_j$	ความลึกของรอยต่อ พี-เอ็น	cm
$y$	ระยะกระจายของความยาวแซนแนล	cm
$y_D$	ความกว้างของบริเวณที่เฟลทขึ้นด้านเกรน	cm
$y_S$	ความกว้างของบริเวณที่เฟลทขึ้นด้านซอส	cm
$\beta_r$	อัตราส่วนเบต้า	
$\epsilon_o$	เปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ	F/cm
$\epsilon_{ox}$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอนไดออกไซด์	
$\epsilon_s$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	
$\mu_o$	เปอร์เมอบิลิตีของสุญญากาศ	H/cm
$\mu_n$	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อซิลิกอน	cm <sup>2</sup> /v-sec
$\mu_{ns}$	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิวซิลิกอน	cm <sup>2</sup> /v-sec
$\mu_p$	ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อซิลิกอน	cm <sup>2</sup> /v-sec
$\mu_{ps}$	ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวซิลิกอน	cm <sup>2</sup> /v-sec
$\rho$	พิกัดความต้านทาน	ohm-cm
$\sigma$	ความนำไฟฟ้า	(ohm-cm) <sup>-1</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\phi_f$	ความต่างศักย์ระหว่างระดับพลังงานอินทรีนซิก กับระดับพลังงานเฟอร์มิ	v
$\phi_s$	ความต่างศักย์คาไฟฟ้าที่ผิวซิลิกอน	v
$\phi_{so}$	ความต่างศักย์คาไฟฟ้าระหว่างขอบของแถบค ความนำ- ซิลิกอนไดออกไซด์กับขอบของแถบค ความนำซิลิกอน	v
$\phi_M$	ความต่างศักย์ระหว่างขอบของแถบค ความนำซิลิกอน- ไดออกไซด์กับระดับพลังงานเฟอร์มิของเกตโลหะ	v
$\phi_{MS}$	ฟังก์ชันของงานระหว่างเกตโลหะกับซิลิกอน	v
$\phi_s$	ความต่างศักย์ระหว่างขอบของแถบค ความนำซิลิกอน- ไดออกไซด์กับระดับพลังงานเฟอร์มิซิลิกอน	v
$\Omega$	โอห์ม	ohm
$U$	โวลต์	v



Appendix G Controlling of Threshold voltage

ในการออกแบบสร้างมอสเฟต แบบ เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ตัวแปรที่สำคัญคือค่าแรงดัน  
วิกฤติ โดยในแบบพีเชนแนล เราต้องการ  $V_T$  เป็นลบ แบบเอ็นเชนแนล เราต้องการ  $V_T$  เป็น  
บวก เพื่อที่จะไบอัสขั้วเกตและเทรนให้ขั้วไฟฟ้าเหมือนกัน สะดวกในการทำงาน แต่มีปัญหาเกิด  
ขึ้นโดยเฉพาะแบบเอ็นเชนแนล มีโอกาสจะได้แรงดันวิกฤติเป็นลบมาก เราจึงต้องมีการควบคุม  
พารามิเตอร์ต่าง ๆ ก่อนการสร้าง โดยจากสมการที่ (2.6), (2.13), (2.15)

$$(2.6) \quad V_T = \phi_{MS} - \frac{Q_{SS}}{C_o} - \frac{Q_s}{C_o} + \phi_s - \frac{Q_B}{C_o} + \Delta V_{DT}$$

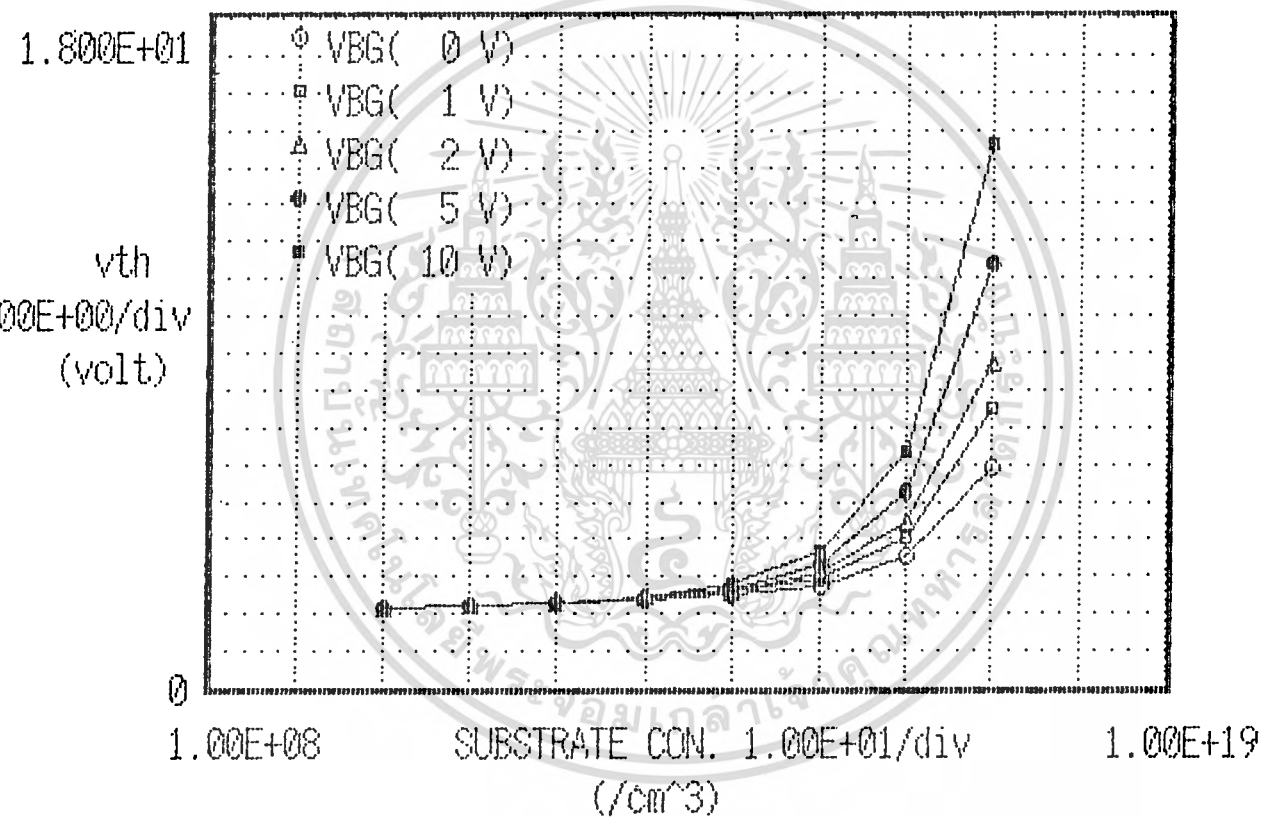
$$(2.13) \quad C_o = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_o}{T_{ox}}$$

$$(2.15) \quad Q_B = \sqrt{2 \epsilon_s \epsilon_o q N_D (|2\phi_f| + V_{BG})}$$

พารามิเตอร์ที่ควบคุมได้ง่าย ได้แก่  $\phi_{MS}$ ,  $Q_{SS}$ ,  $T_{ox}$ ,  $N_D$ ,  $V_{BG}$  ฯลฯ ในภาคผนวกนี้ จะ  
ได้ทำการคำนวณออกแบบ  $V_T$  (Simulation) ก่อนการทดลองสร้างจริง

# DATA PLOTTER(P-ch)

## Vth-SUBSTRATE CON. RELATION



Tox = 700 °A

รูปที่ 6.1 พล็อตกราฟระหว่าง  $V_T$  กับ  $N_D$  แบบ P-ch

$V_{BG} = 0, 1, 2, 5, 10 \text{ V}$

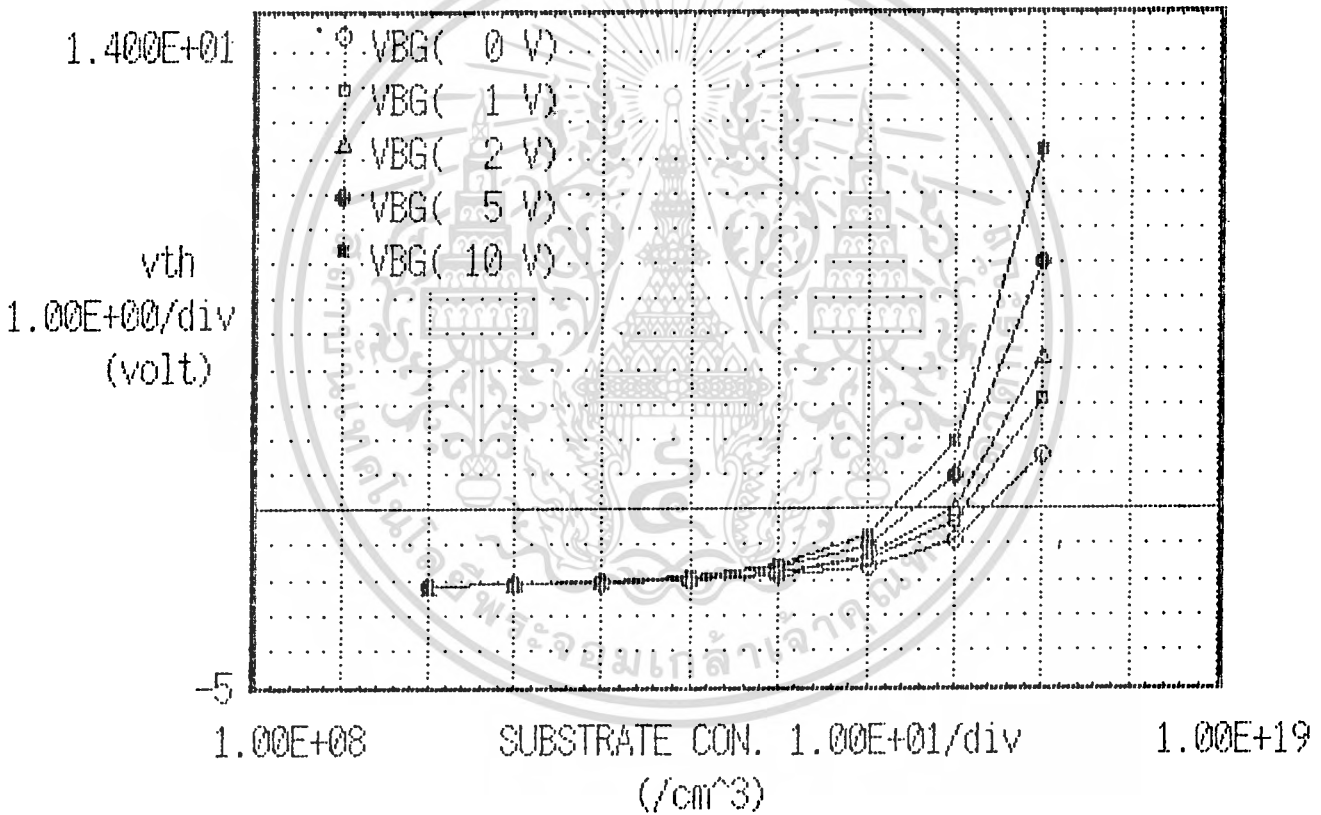
$\phi_{MS} = -0.3 \text{ V} : \langle 100 \rangle Q_{SS} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2$

$T_{ox} = 700 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER(N-ch)

## Vth-SUBSTRATE CON. RELATION



Tox = 700 °A

รูปที่ G.2 พล็อตกราฟระหว่าง  $V_T$  กับ  $N_A$  แบบ N-ch

$V_{BG} = 0, 1, 2, 5, 10 \text{ V}$

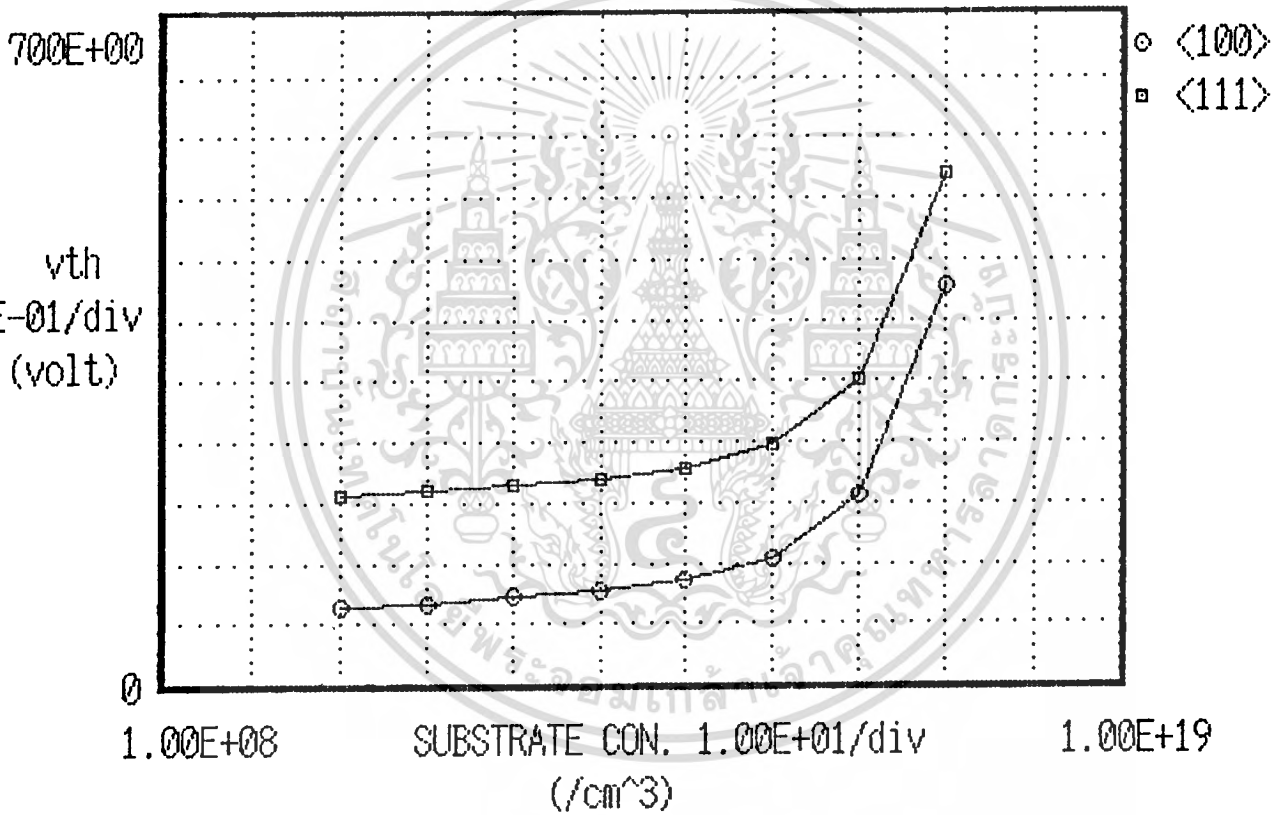
$\phi_{MS} = -0.9 \text{ V} \quad \langle 100 \rangle \quad Q_{SS} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$

$T_{ox} = 700 \text{ °A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## DATA PLOTTER (P-ch)

### V<sub>th</sub>-SUBSTRATE CON. RELATION



V<sub>BG</sub> = 0 V      T<sub>ox</sub> = 700 °A

รูปที่ G.3 พล็อตกราฟระหว่าง v<sub>T</sub> กับ N<sub>D</sub> แบบ P-ch

$$\langle 100 \rangle \quad Q_{SS} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2$$

$$\langle 111 \rangle \quad Q_{SS} = 8 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2$$

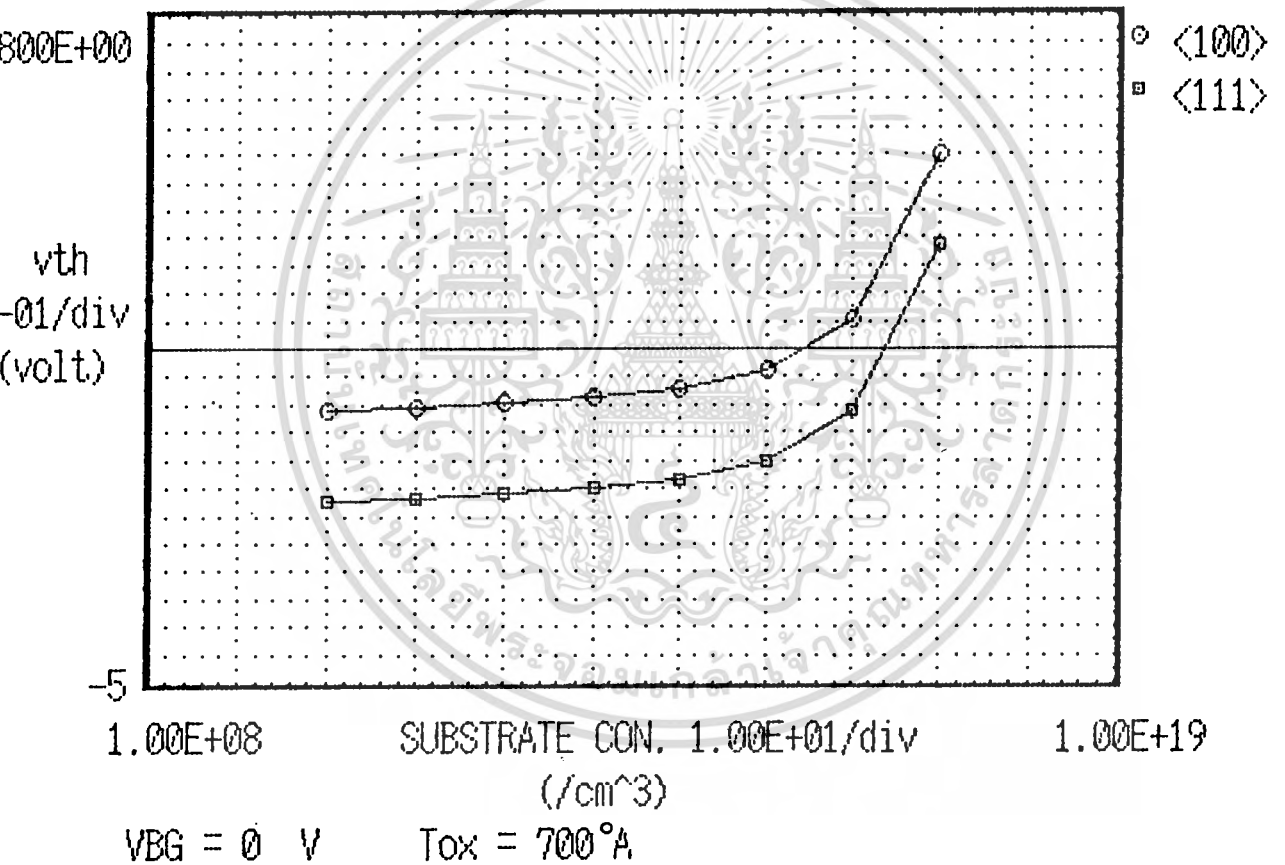
$$\phi_{MS} = -0.3 \text{ V} : T_{ox} = 700 \text{ °A}$$

$$V_{BG} = 0 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER (N-ch)

## V<sub>th</sub>-SUBSTRATE CON. RELATION



รูปที่ ๘.๔ พล็อตกราฟระหว่าง  $V_T$  กับ  $N_A$  แบบ N-ch

<100>  $Q_{SS} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2$

<111>  $Q_{SS} = 8 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2$

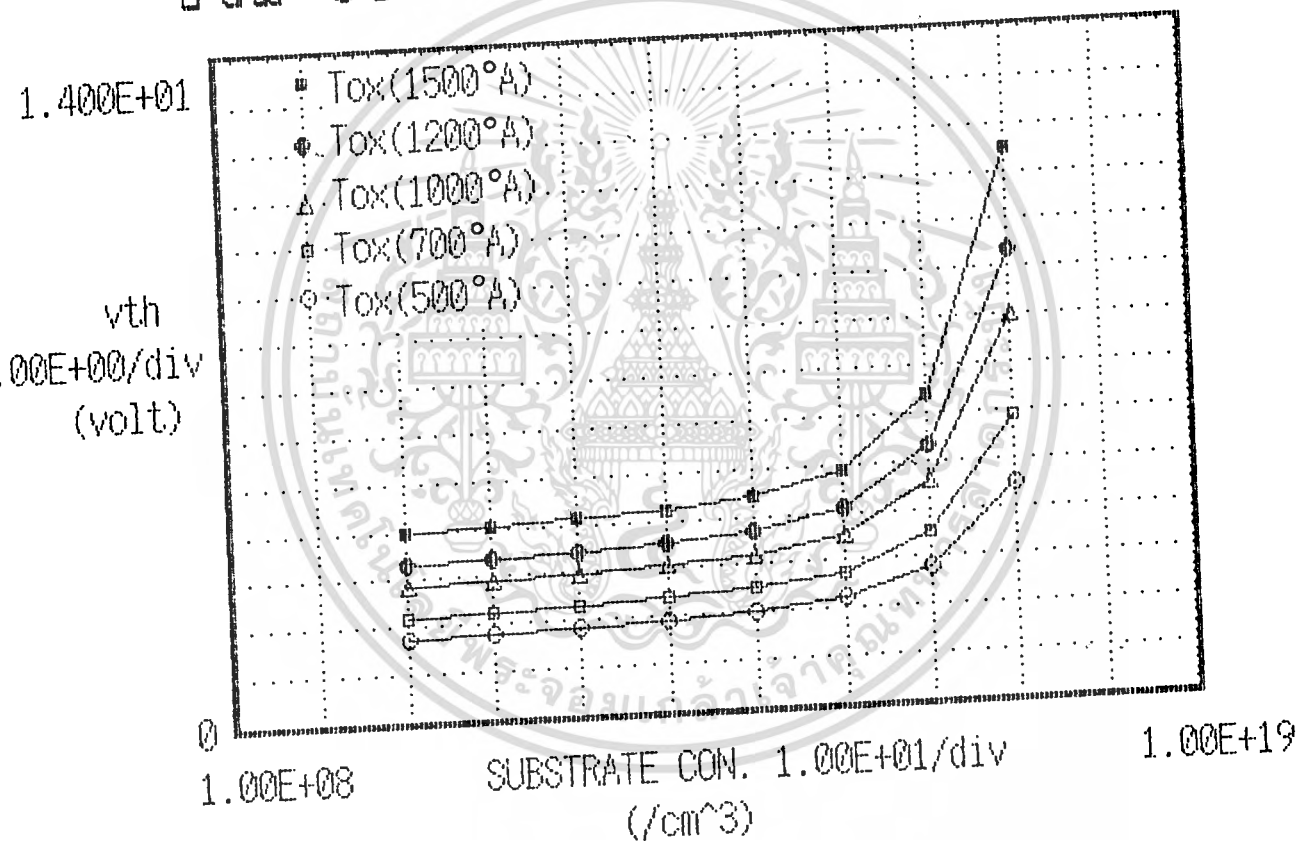
$\phi_{MS} = -0.9 \text{ V} : T_{ox} = 700 \text{ Å}$

$V_{BG} = 0 \text{ V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER (P-ch)

## V<sub>th</sub>-SUBSTRATE CON. RELATION



V<sub>BG</sub> = 0 V

รูปที่ 6.5 พล็อตกราฟระหว่าง  $v_T$  กับ  $N_D$  แบบ P-ch

$T_{ox} = 500, 700, 1000, 1200, 1500 \text{ \AA}$

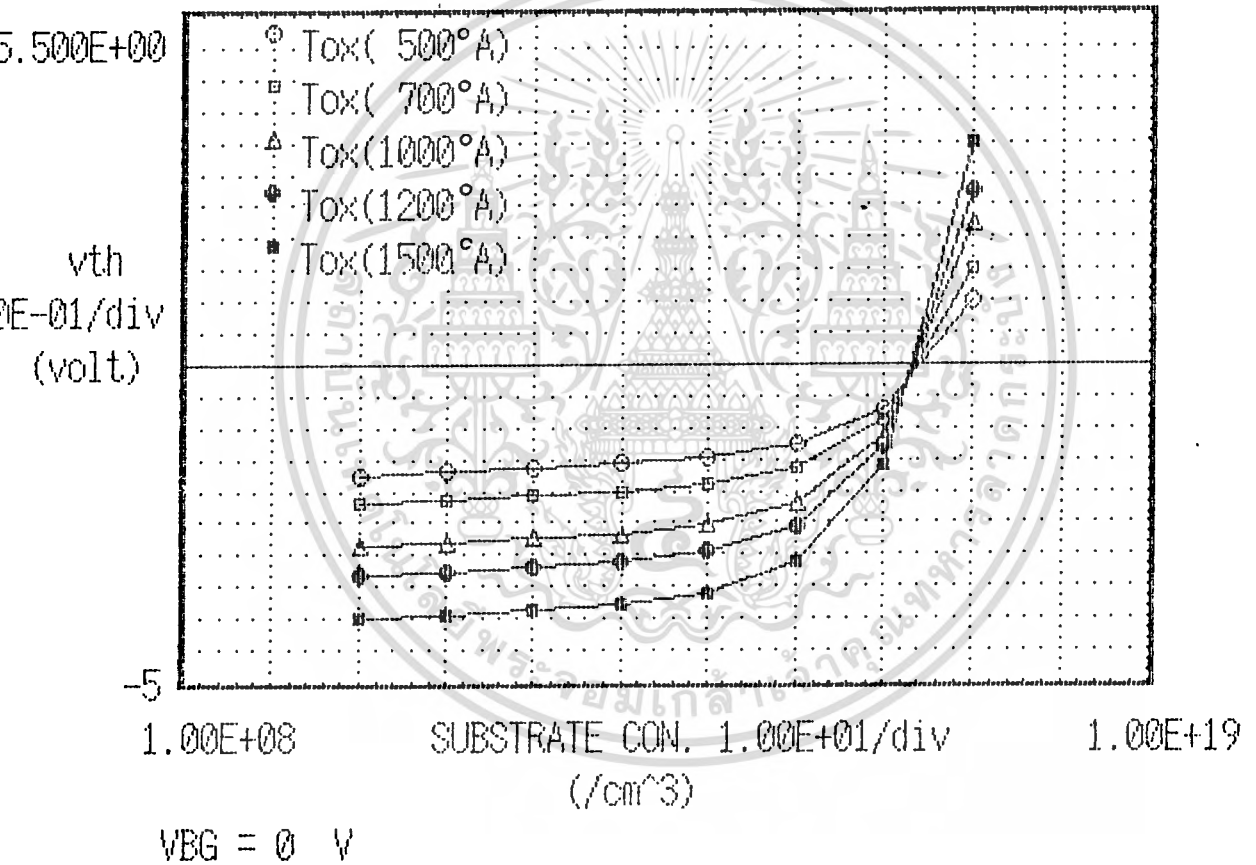
$\phi_{MS} = -0.3 \text{ V}; \langle 100 \rangle Q_{ss} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2$

$V_{BG} = 0V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER (N-ch)

## V<sub>th</sub>-SUBSTRATE CON. RELATION



รูปที่ 6.6 พล็อตกราฟระหว่าง  $v_T$  กับ  $N_A$  แบบ N-ch

$$T_{ox} = 500, 700, 1000, 1200, 1500 \text{ \AA}$$

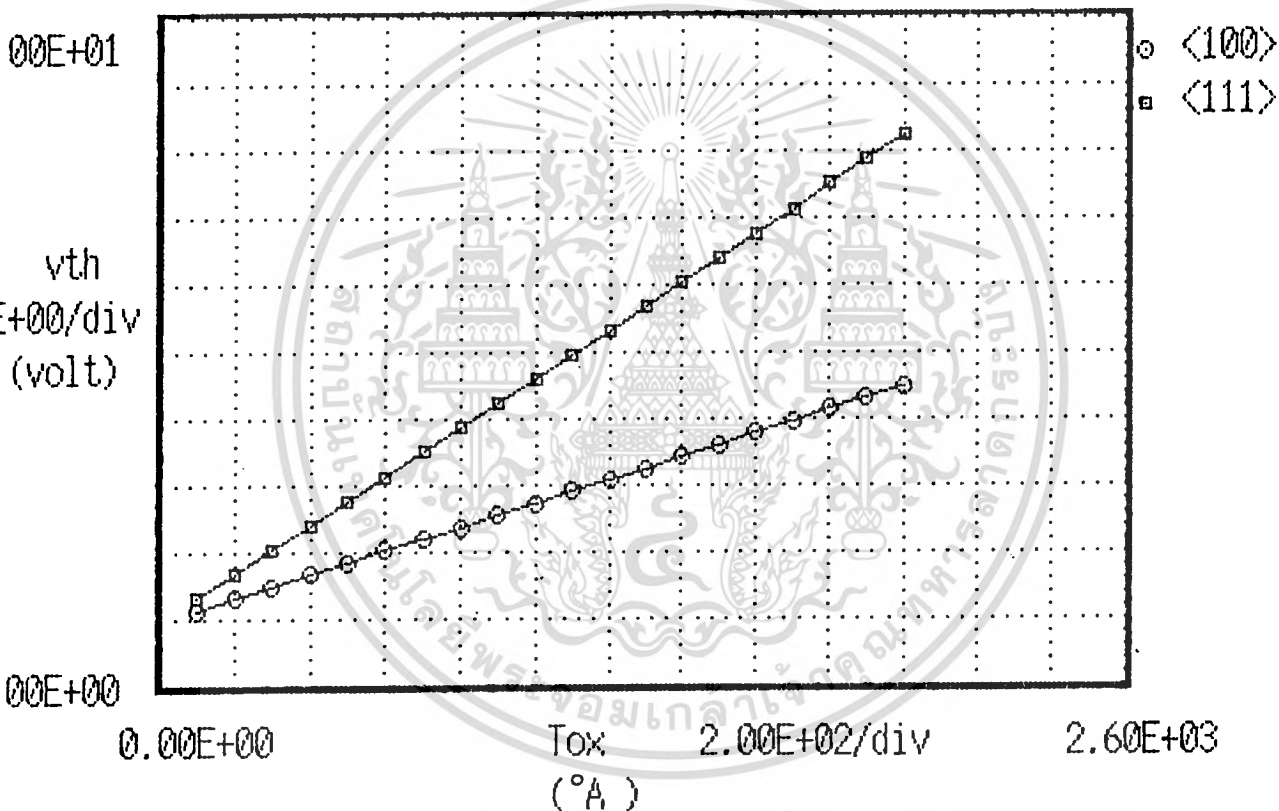
$$\phi_{MS} = -0.9V : \langle 100 \rangle Q_{ss} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$$

$$V_{BG} = 0 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER(P-ch)

## V<sub>th</sub> - T<sub>ox</sub> RELATION



VBG = 0 V      ND = 1E+16 /CM<sup>3</sup>

รูปที่ ๘.7 พล็อตกราฟระหว่าง  $v_T$  กับ  $T_{ox}$  แบบ P-ch

<100>  $Q_{ss} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2$

<111>  $Q_{ss} = 8 \times 10^{-8} \text{ c/cm}^2$

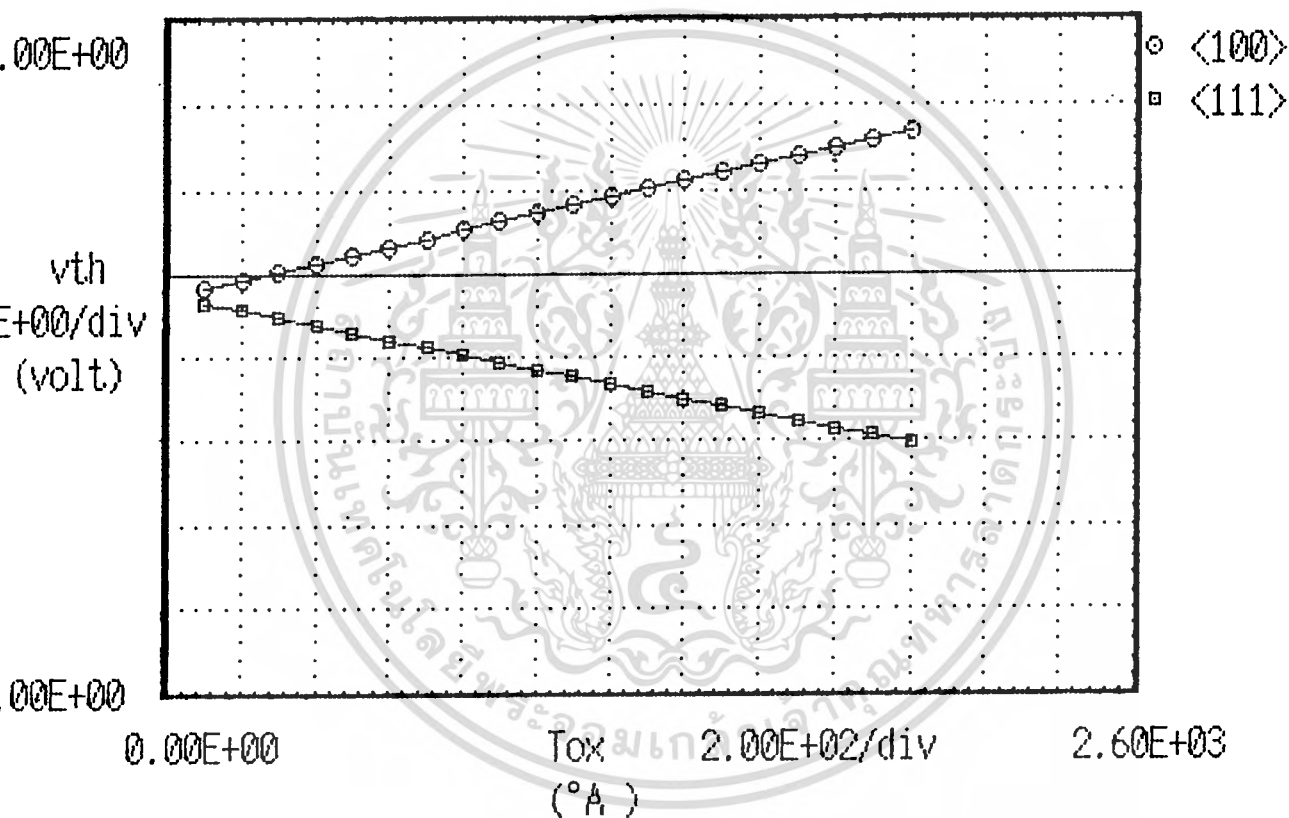
$\phi_{MS} = -0.3 \text{ V}; v_{BG} = 0 \text{ V}$

$N_D = 1 \times 10^{16} \text{ /cm}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA PLOTTER (N-ch)

## V<sub>th</sub> - T<sub>ox</sub> RELATION



V<sub>BG</sub> = 0 V      N<sub>A</sub> = 1E+16 /CM<sup>3</sup>

รูปที่ 6.8      พล็อตกราฟระหว่าง V<sub>T</sub> กับ T<sub>ox</sub> แบบ P-ch

<100>      Q<sub>SS</sub> = 1.4 × 10<sup>-8</sup> c/cm<sup>2</sup>

<111>      Q<sub>SS</sub> = 8 × 10<sup>-8</sup> c/cm<sup>2</sup>

Φ<sub>MS</sub> = -0.9 V      V<sub>BG</sub> = 0 V

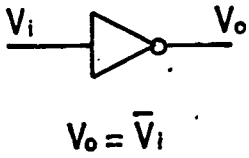
N<sub>A</sub> = 1 × 10<sup>16</sup> /cm<sup>3</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

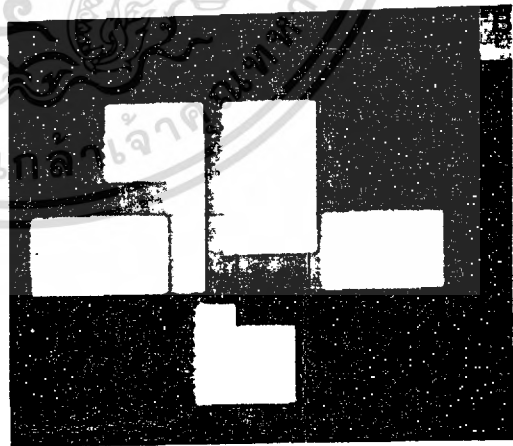
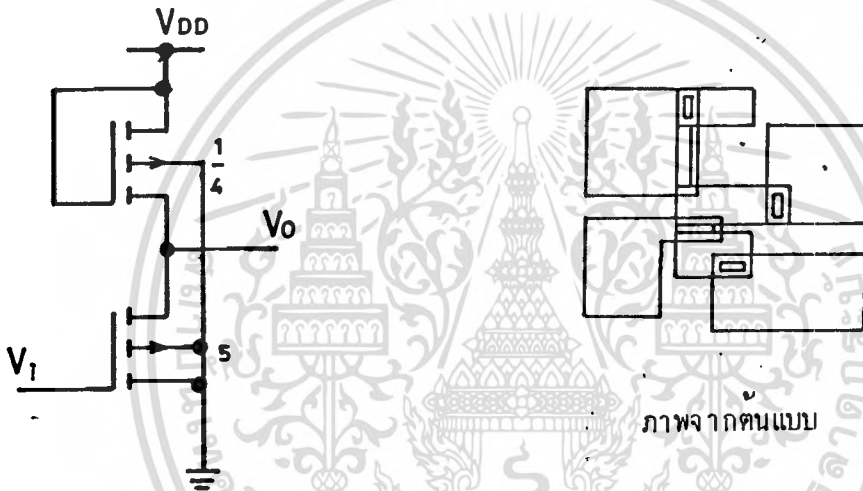
Appendix H

PMOS IC DESIGN

INVERTER



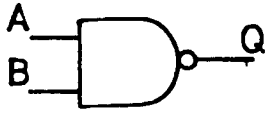
$V_i$	$V_o$
0	1
1	0



ภาพถ่ายจากชิ้นงาน

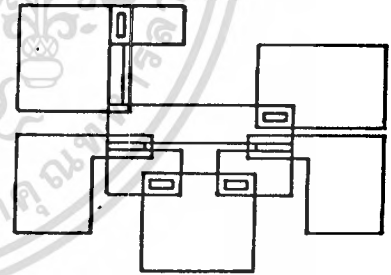
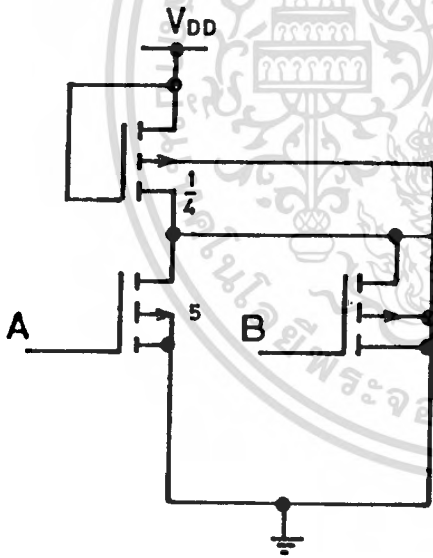
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# NAND GATE

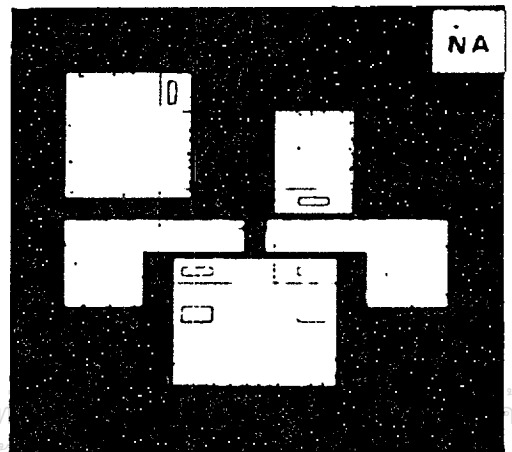


$$Q = \overline{A \cdot B}$$

A	B	Q
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



ภาพจากต้นแบบ

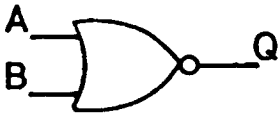


ภาพถ่ายจากโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น

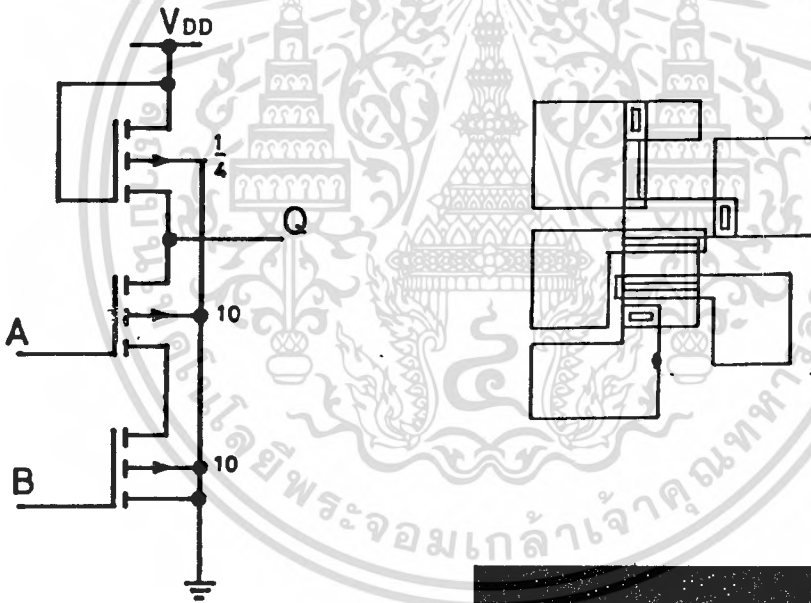
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# NOR GATE

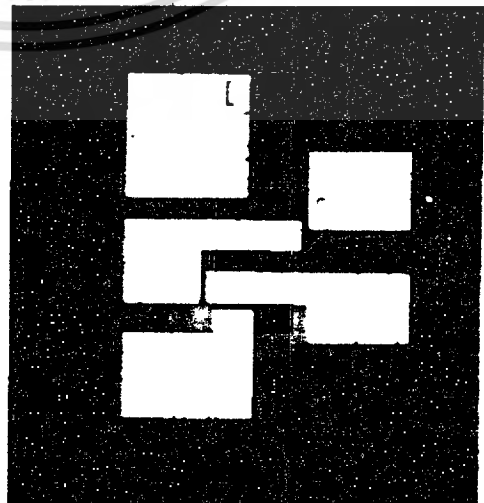


$$Q = \overline{A+B}$$

A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



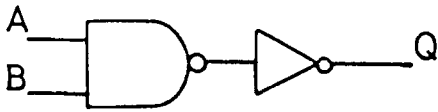
ภาพจากต้นแบบ



ภาพถ่ายจากชิ้นงาน

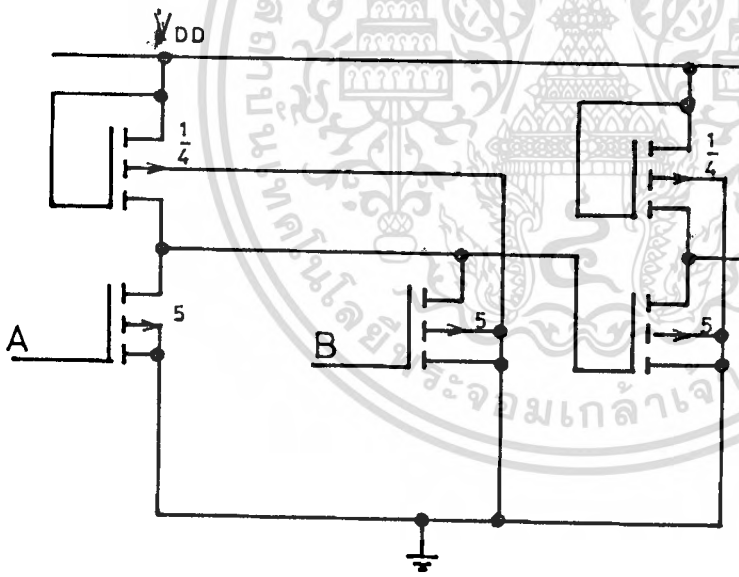
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# AND GATE



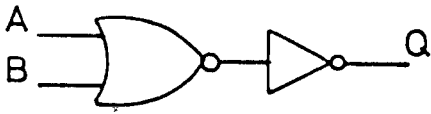
$$Q = A \cdot B$$

A	B	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



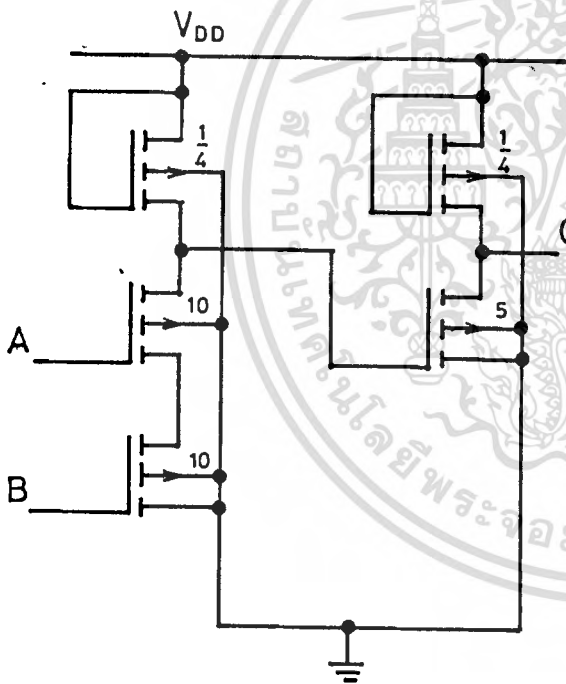
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# OR GATE



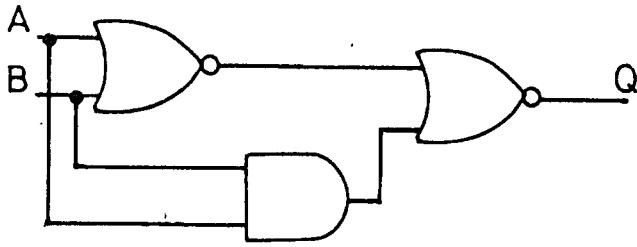
$$Q = A + B$$

A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



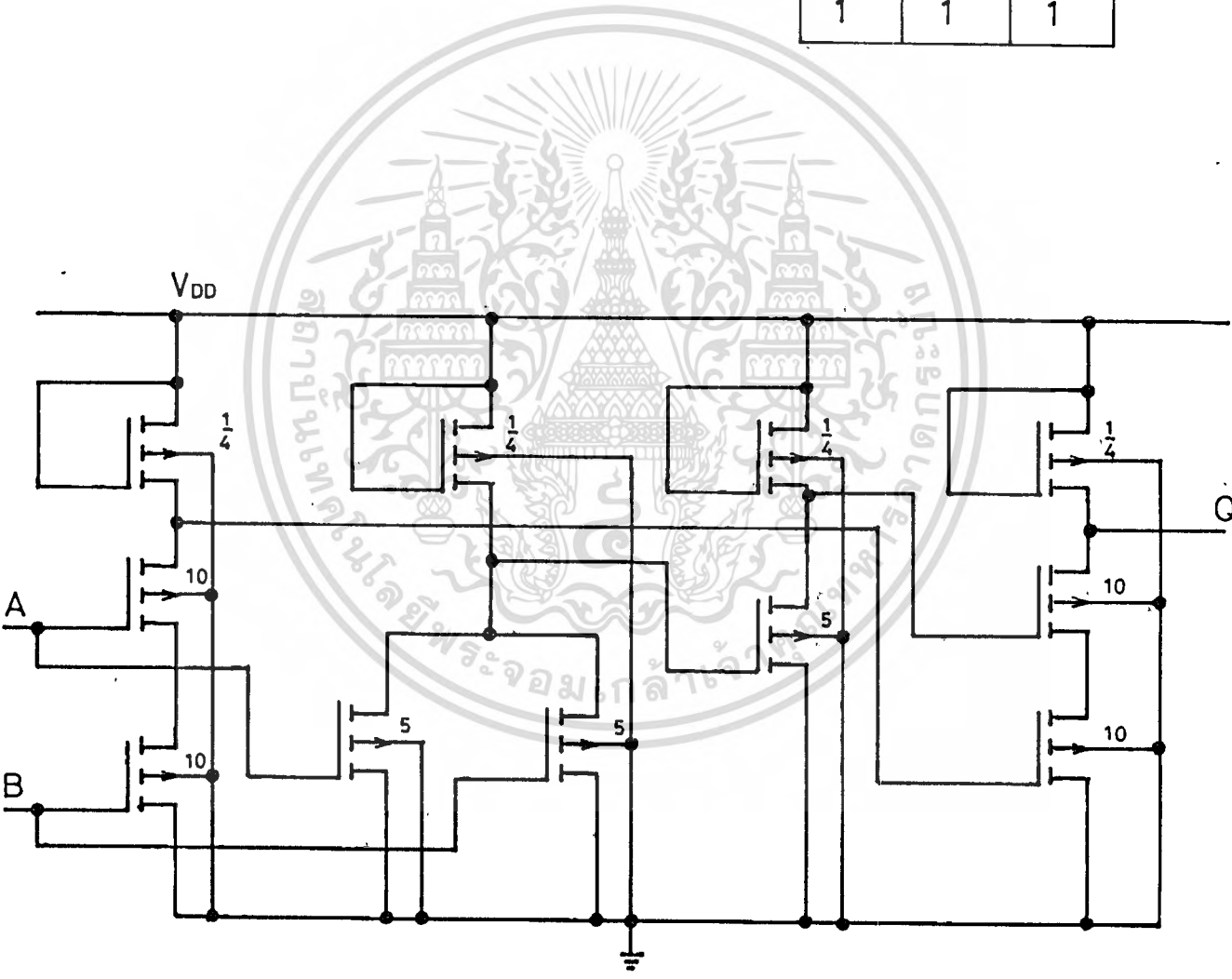
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# XOR GATE



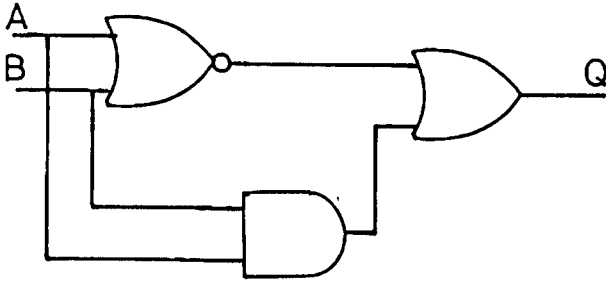
$$Q = A \oplus B = \bar{A}B + A\bar{B}$$

A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### XNOR GATE

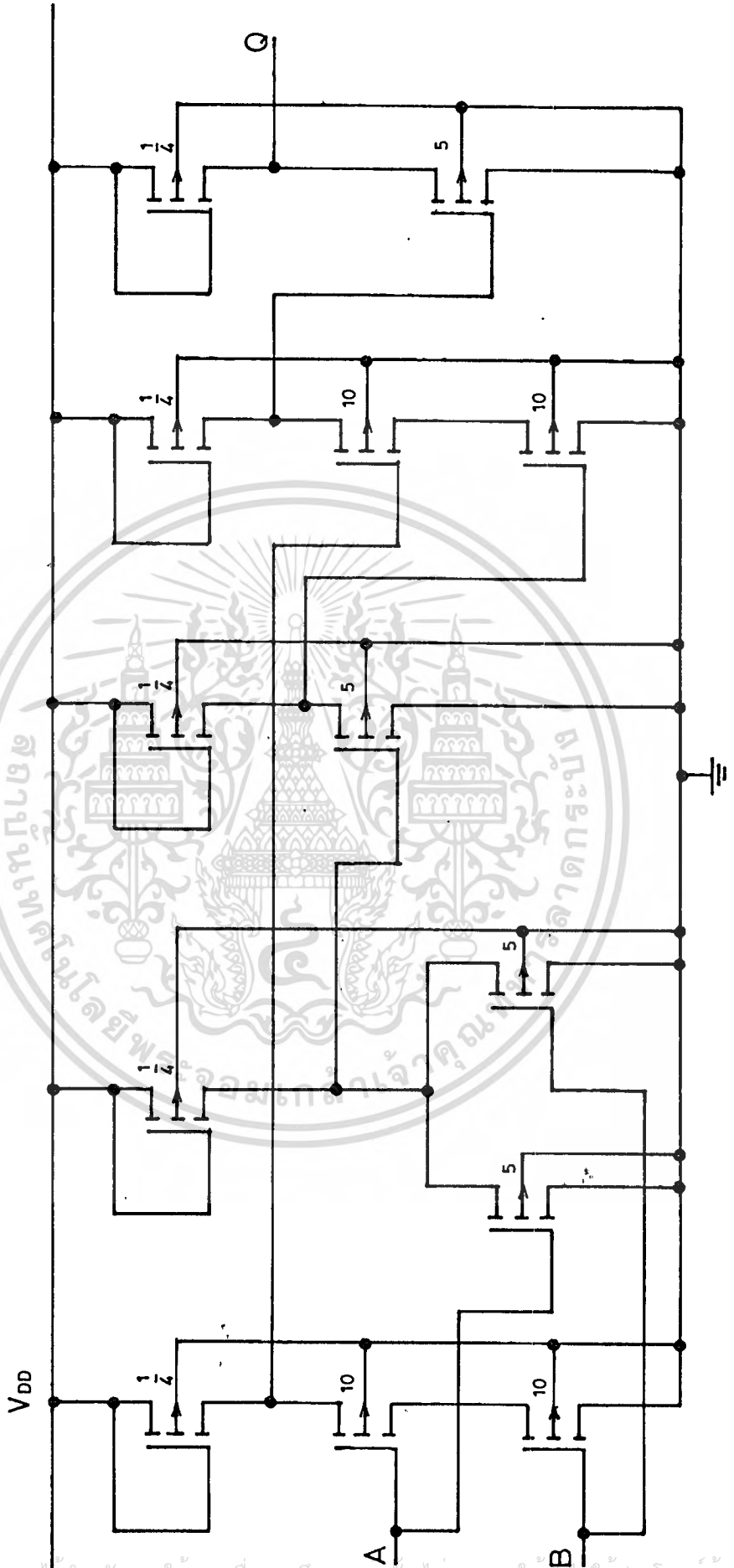


A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	1
1	1	1

$$Q = A \odot B = \bar{A}\bar{B} + AB$$

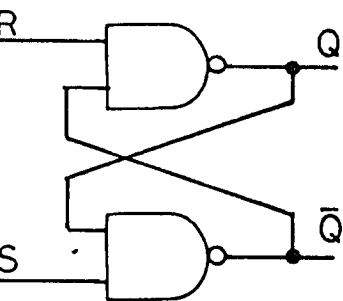


XNOR GATE

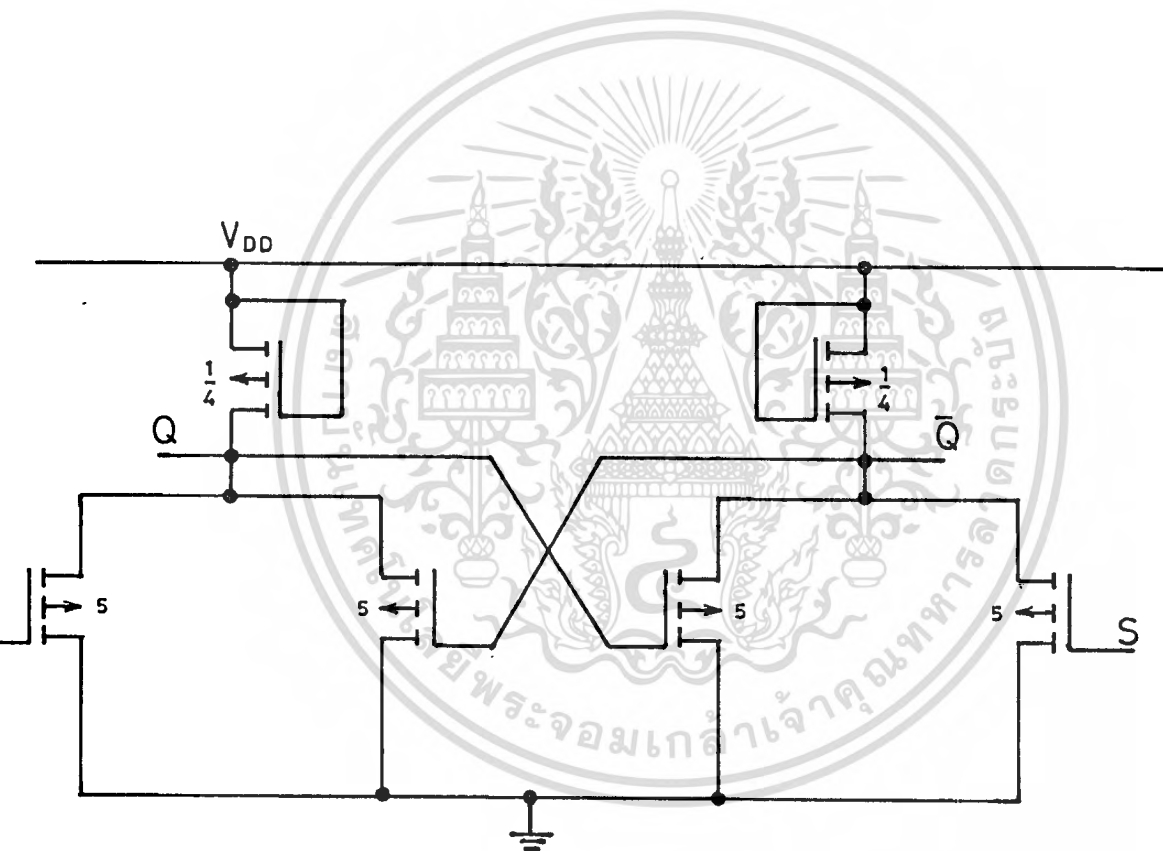


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### R.S. flip-flop (NAND)

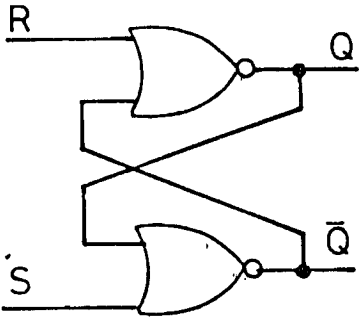


R	S	Q
0	0	?
0	1	1
1	0	0
1	1	N.C.

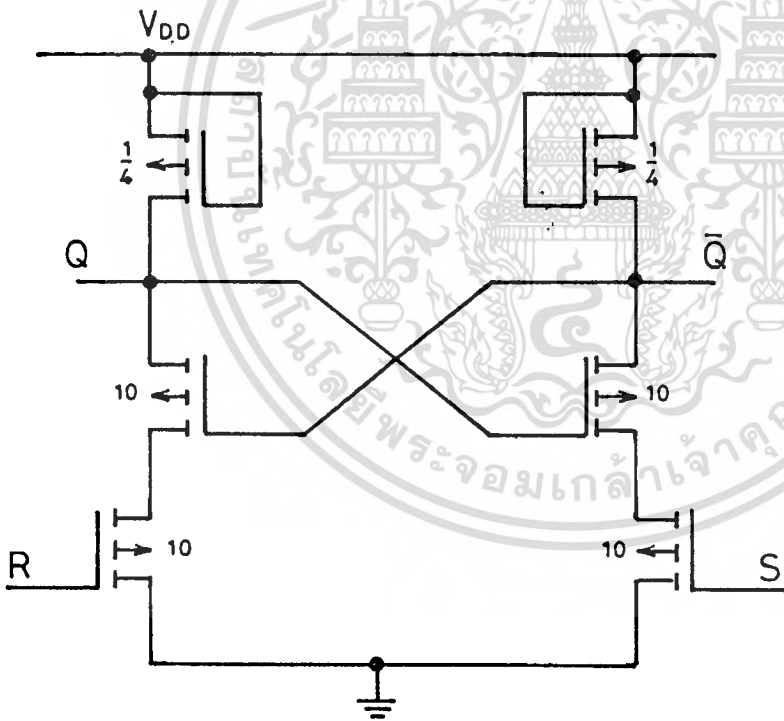


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### R.S. flip-flop(NOR )

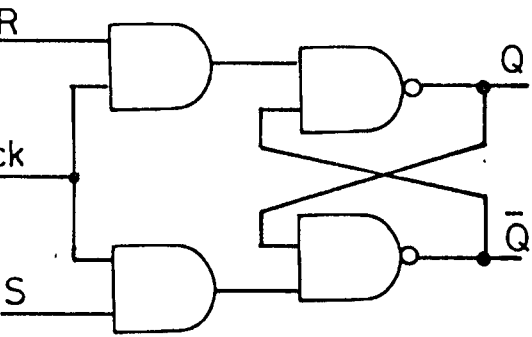


R	S	Q
0	0	N.C.
0	1	1
1	0	0
1	1	?

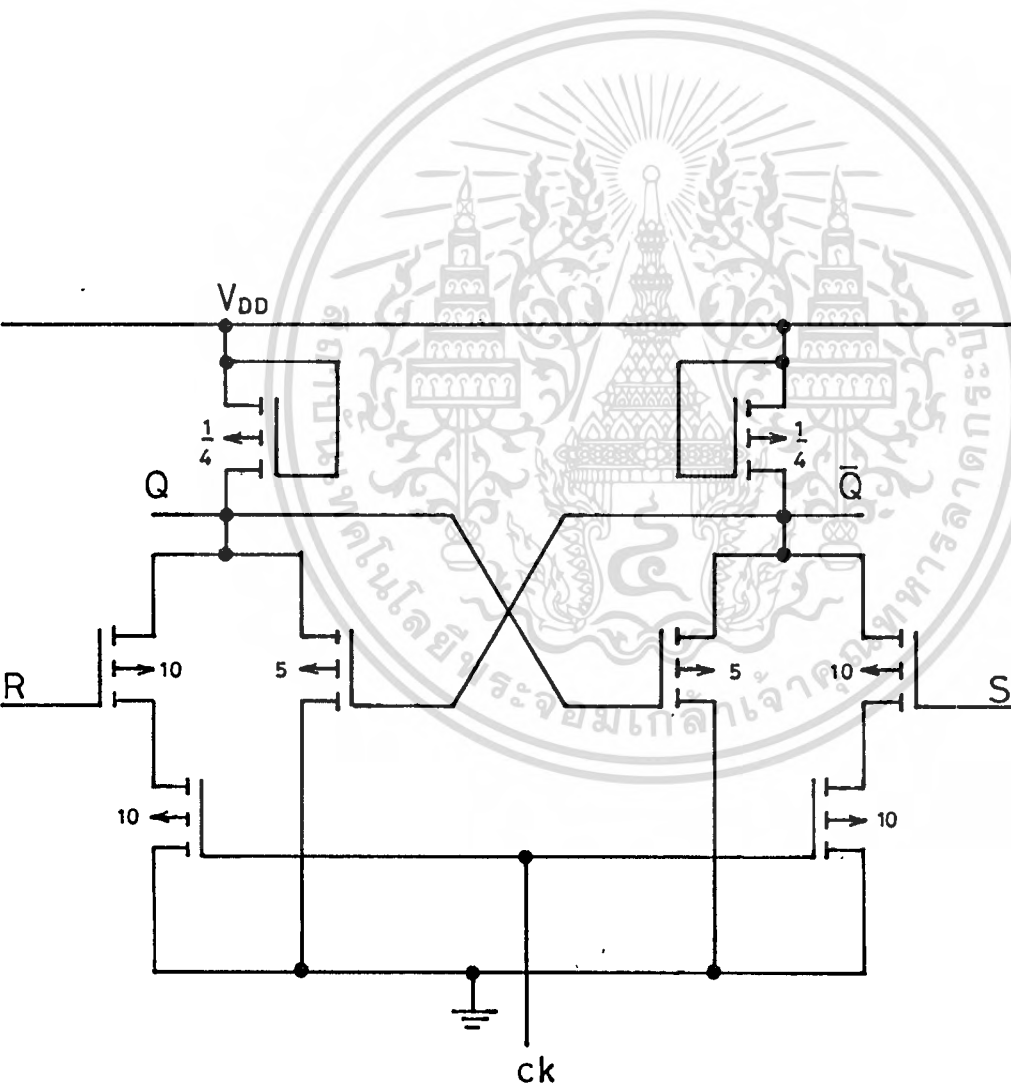


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### R.S. flip-flop+ck (NAND)

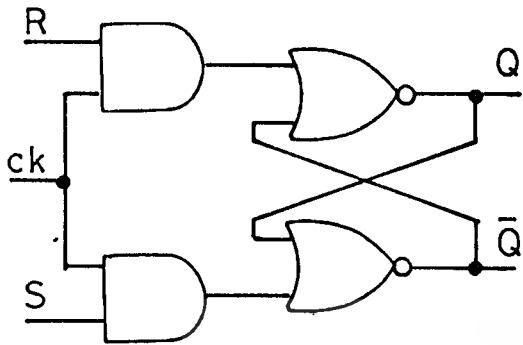


R	S	Q
0	0	?
0	1	1
1	0	0
1	1	N.C.

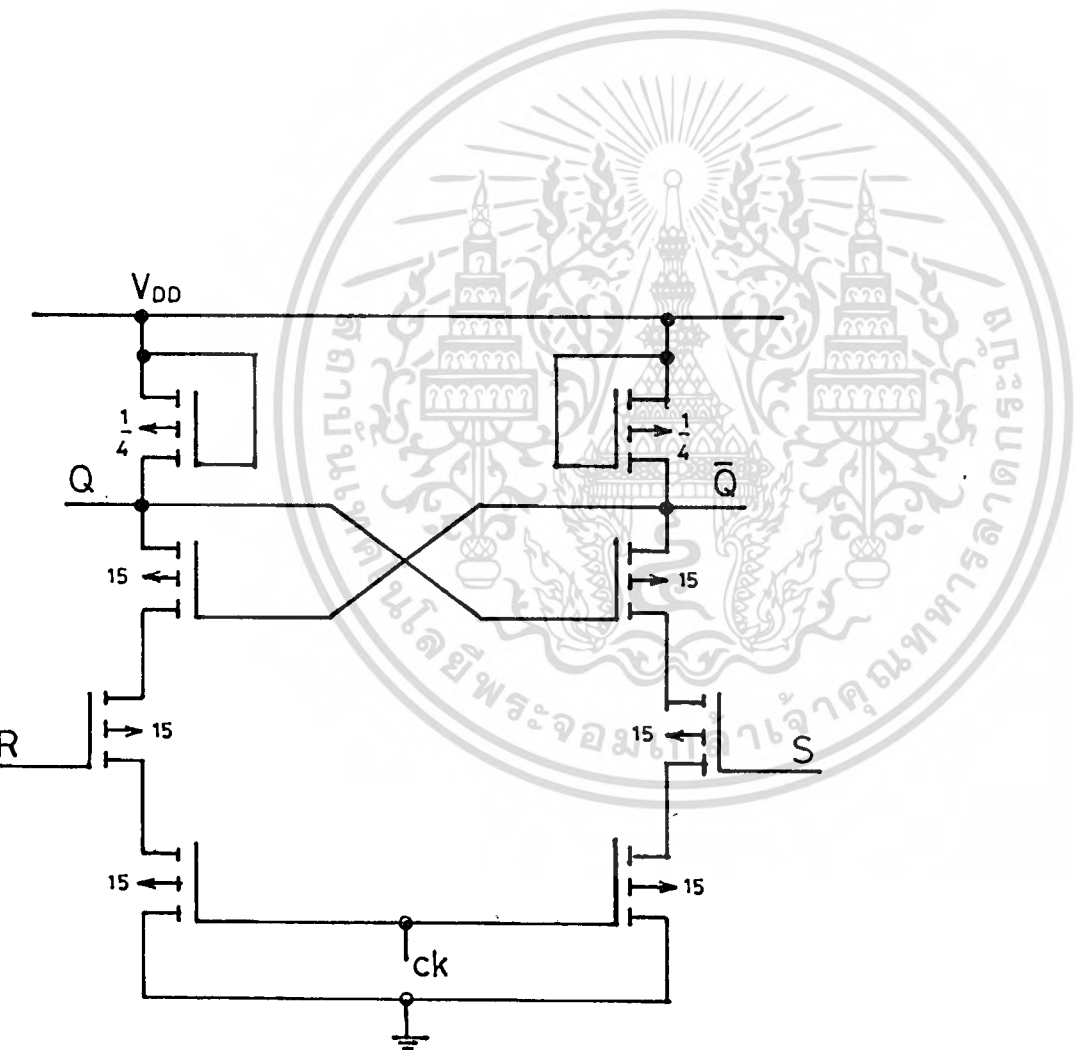


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### R.S. flip-flop+ck(NOR)

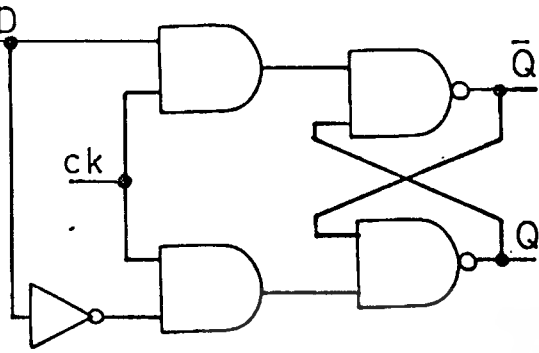


R	S	Q
0	0	N.C.
0	1	1
1	0	0
1	1	?

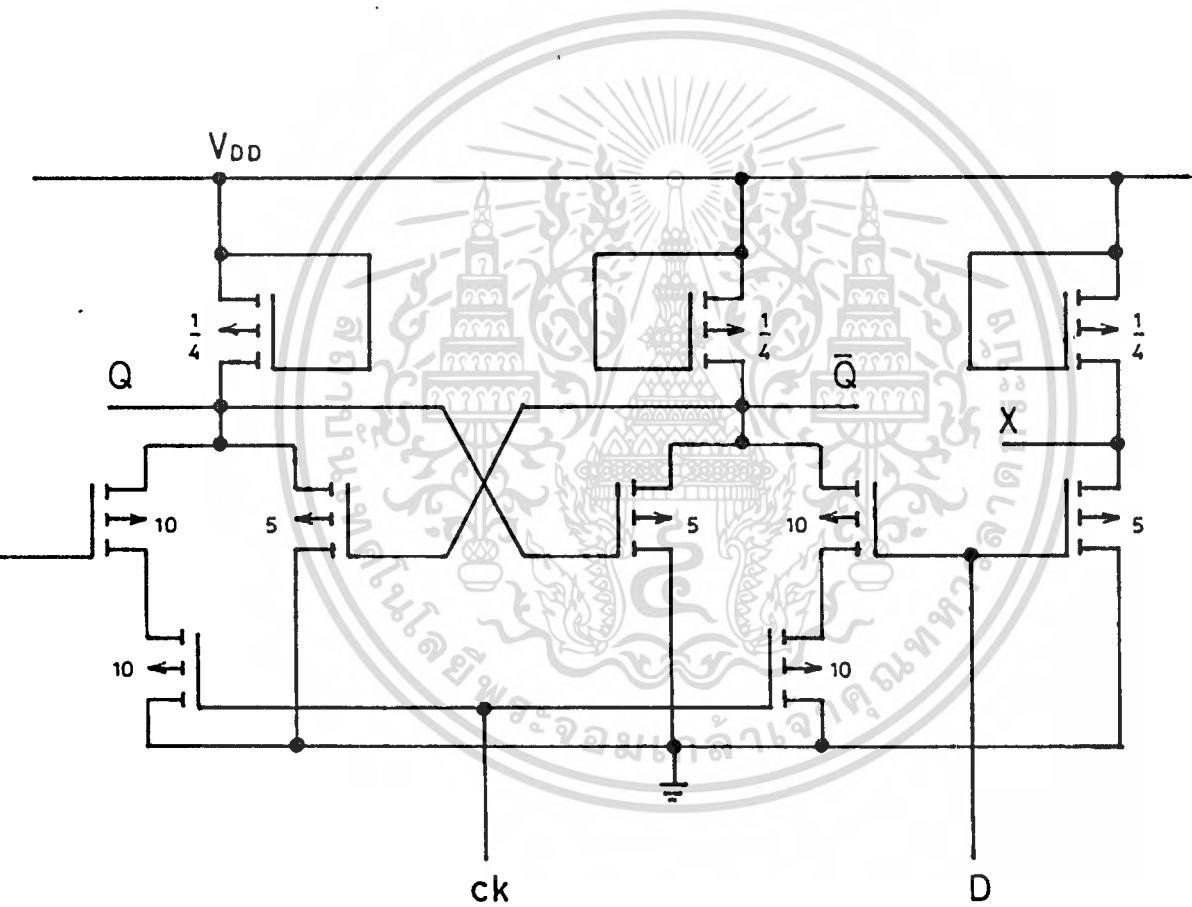


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D. flip-flop+ck

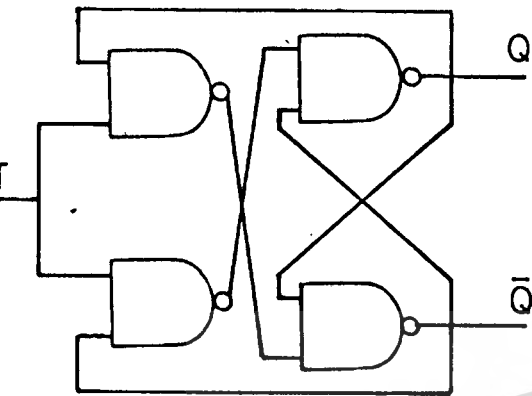


D	ck	$Q^{N+1}$
0	0	$Q^N$
0	1	0
1	0	$Q^N$
1	1	1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

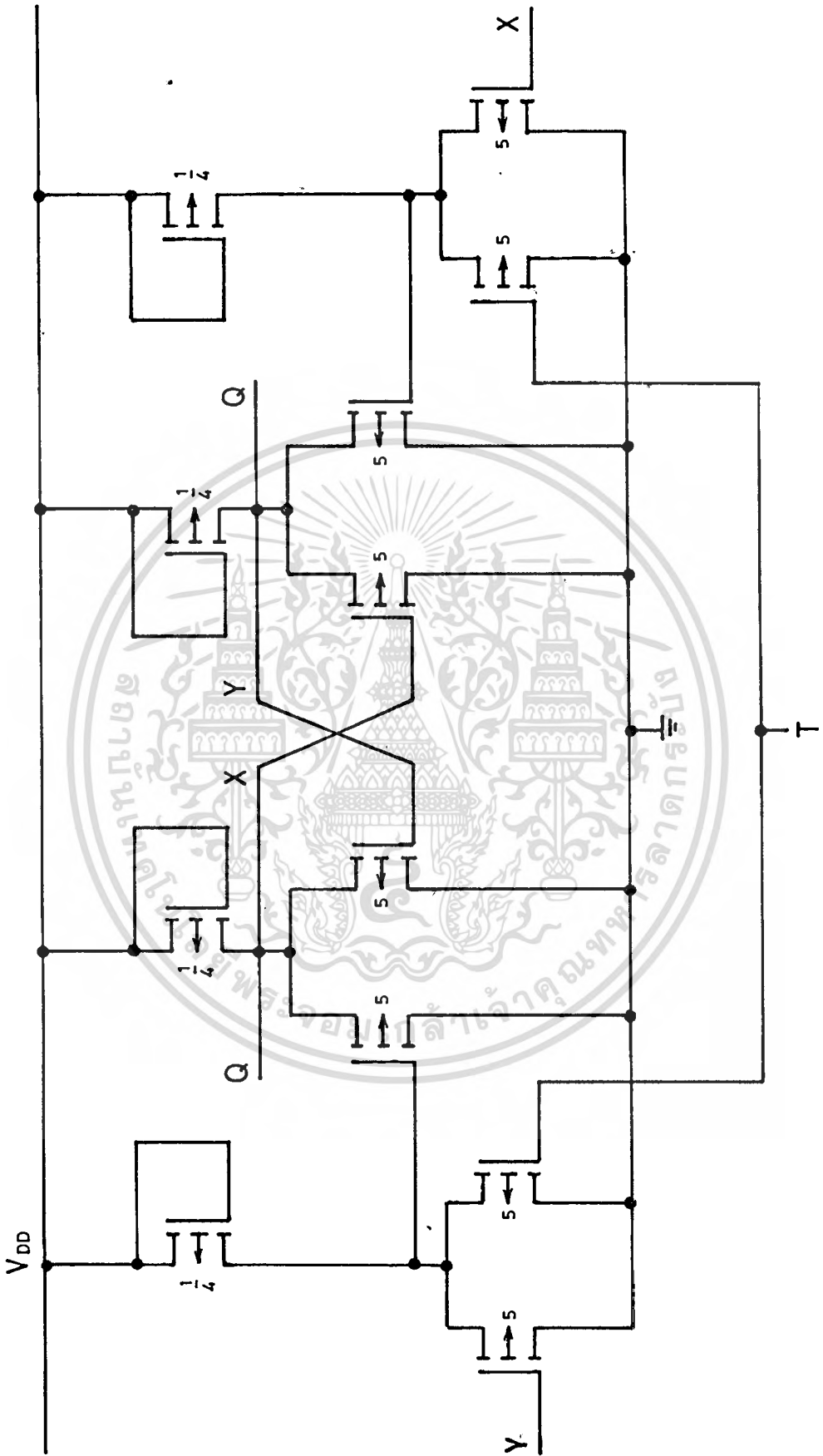
### T. flip-flop



T	$Q^{N+1}$
0	$Q^N$
1	$\bar{Q}^N$

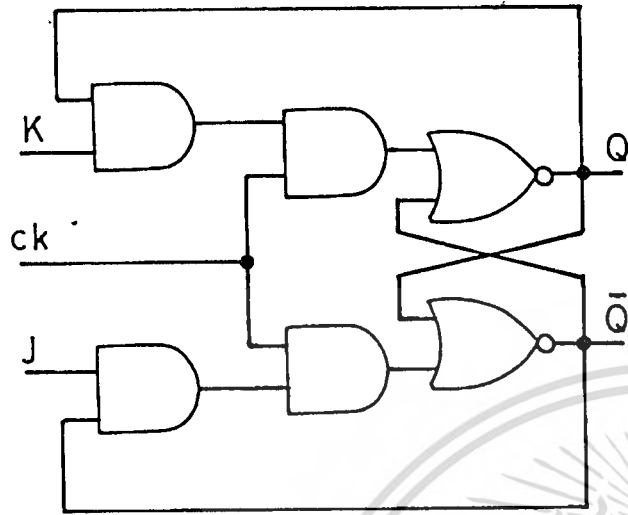


T. flip-flop

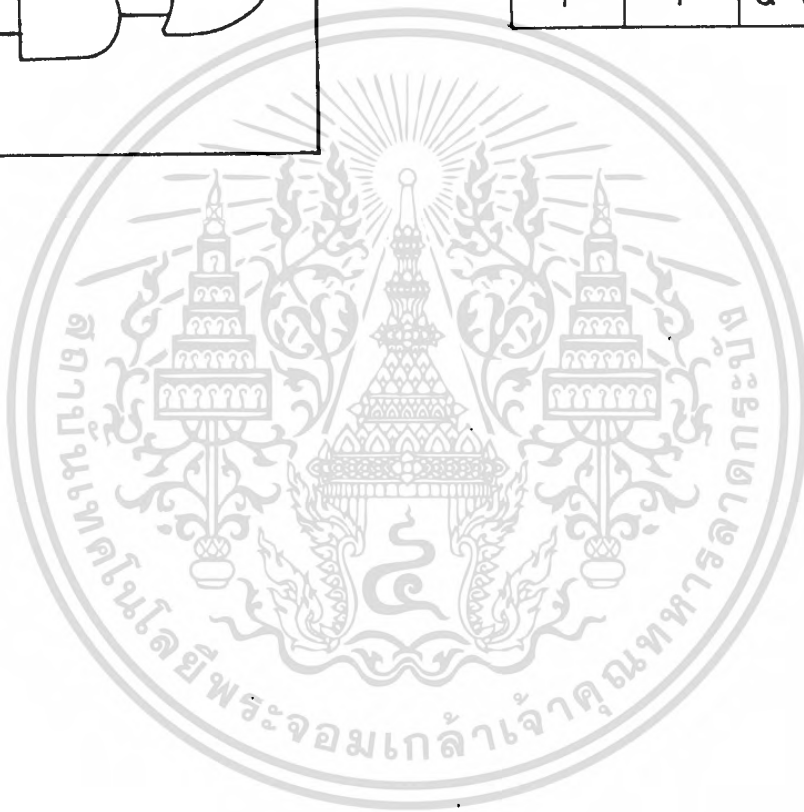


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

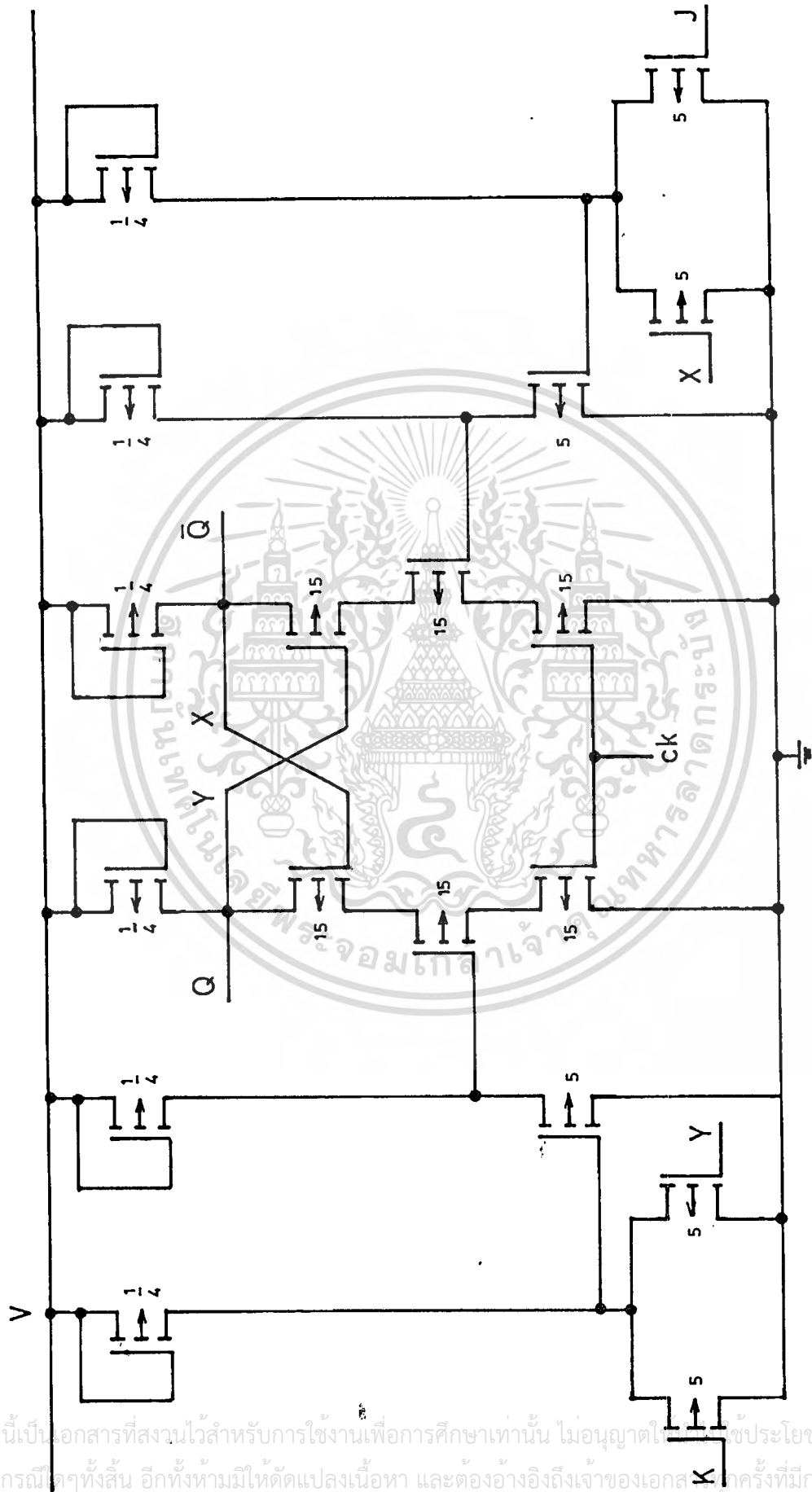
### J.K. flip-flop + ck



J	K	$Q^{N+1}$
0	0	$Q^N$ (NC)
0	1	0
1	0	1
1	1	$\bar{Q}^N$ (T.)

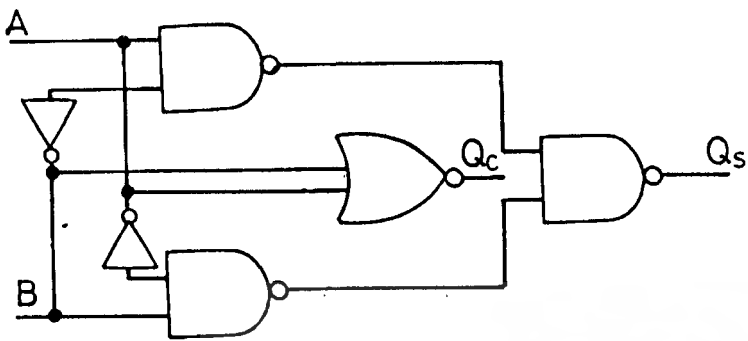


J.K. flip-flop + ck



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HALF ADDER

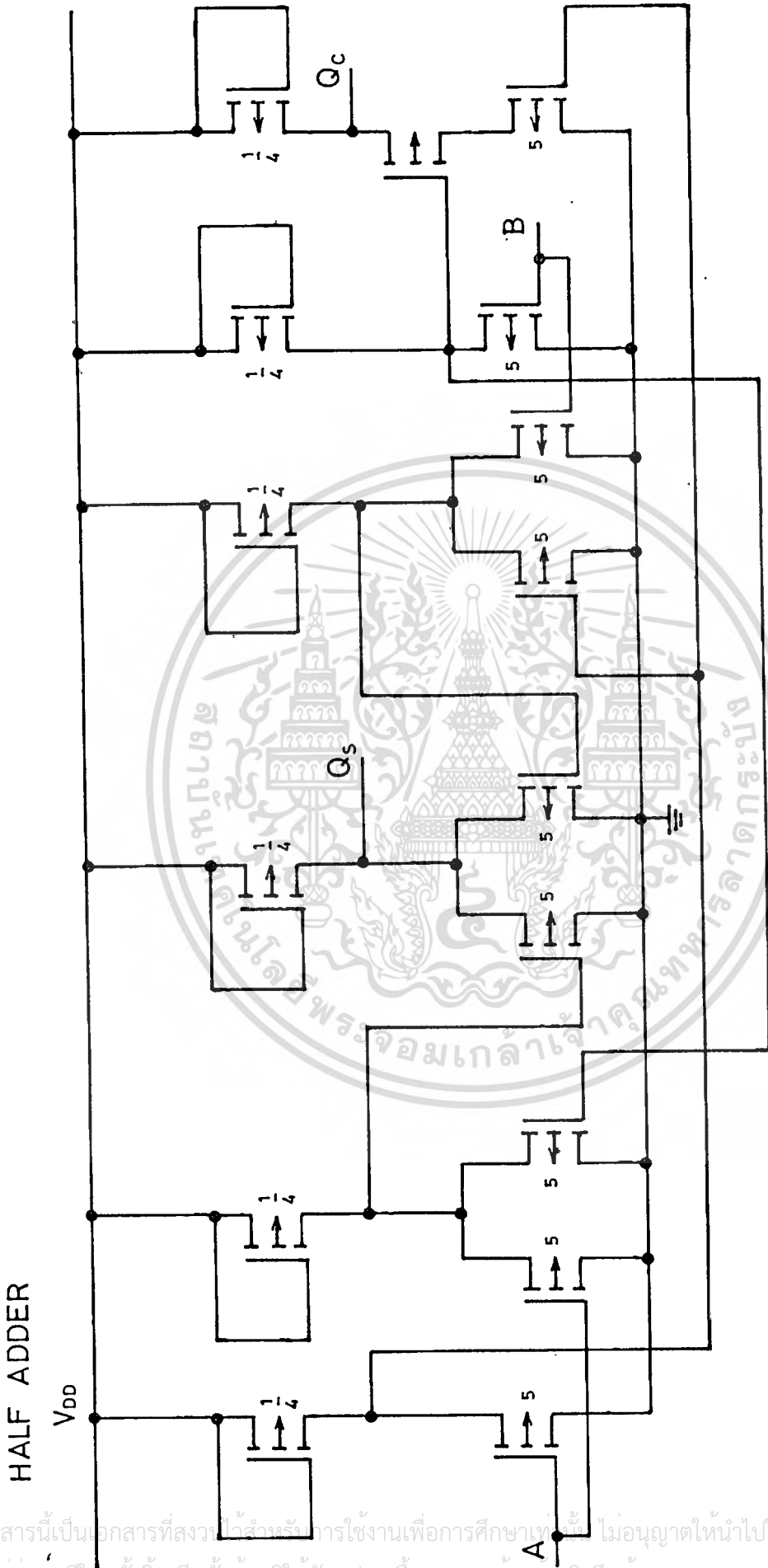


$$Q_s = A \oplus B$$

$$Q_c = A \cdot B$$

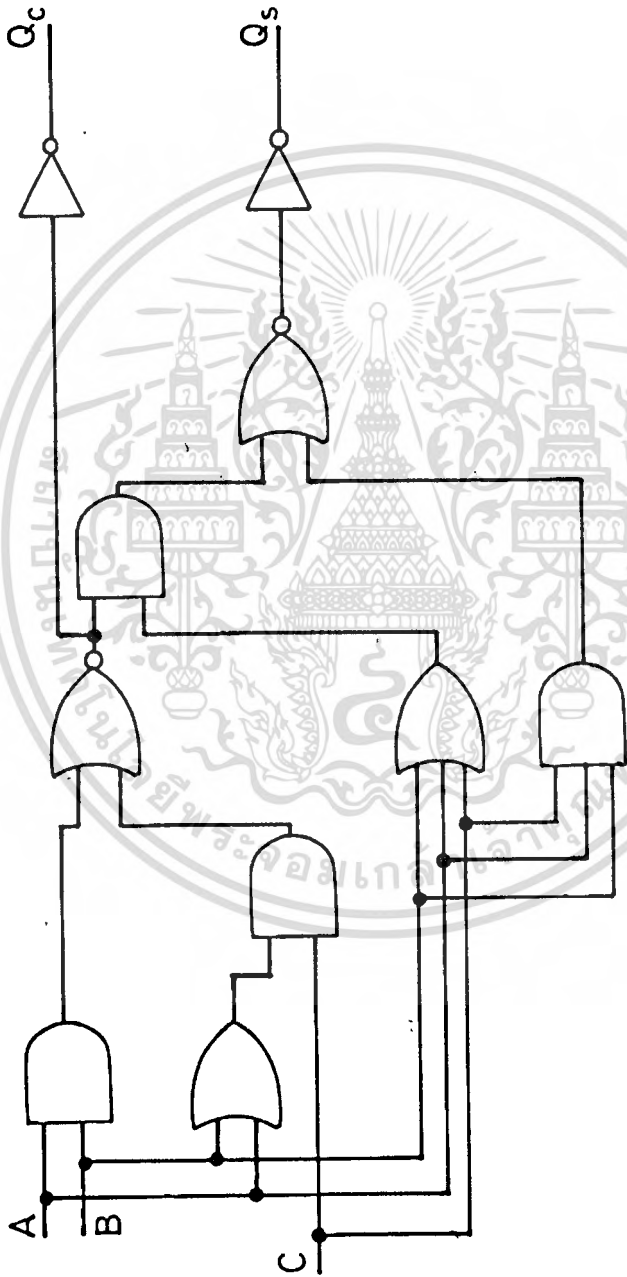


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

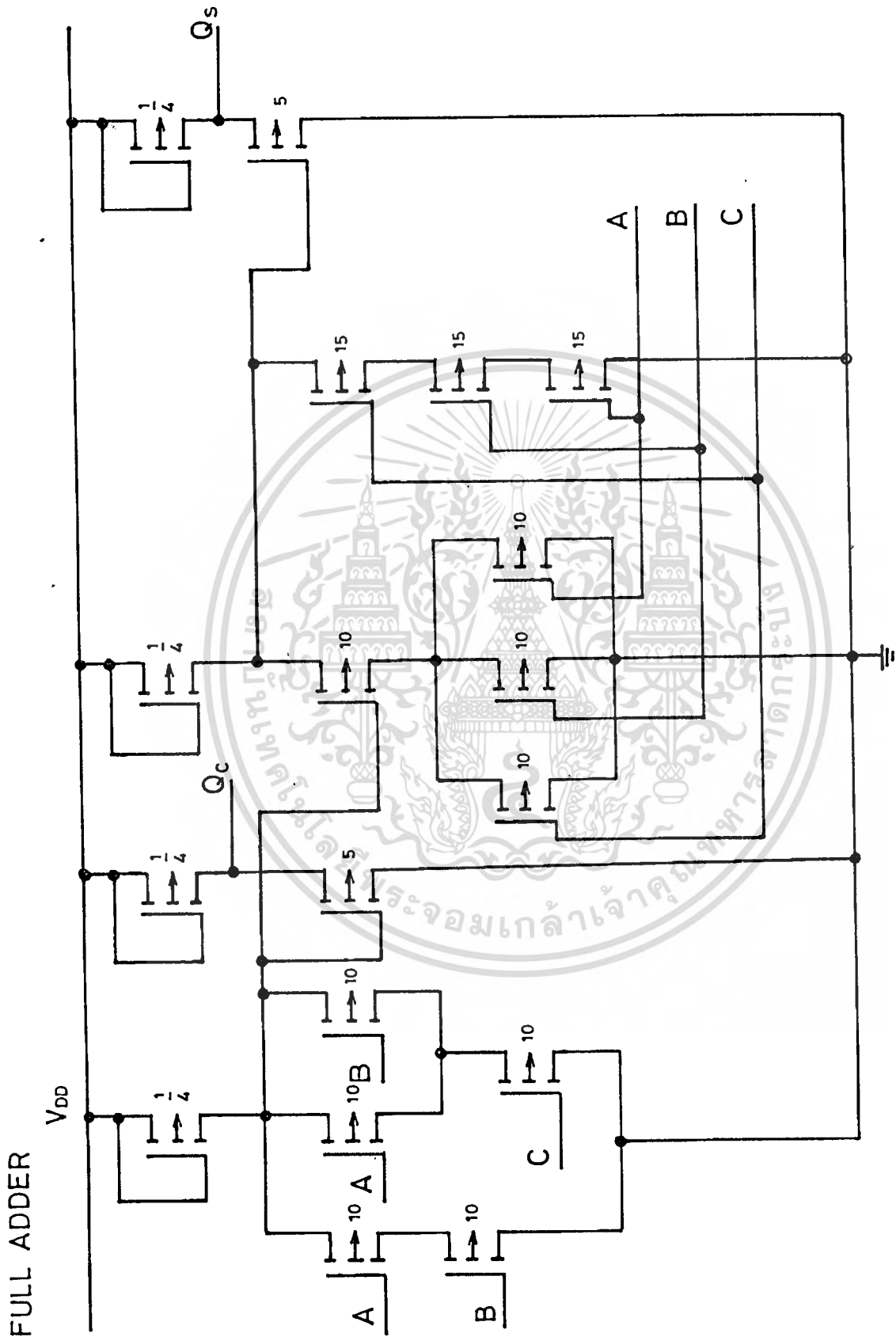
# FULL ADDER



$$Q_s = \bar{Q}_c(A+B+C) + ABC$$

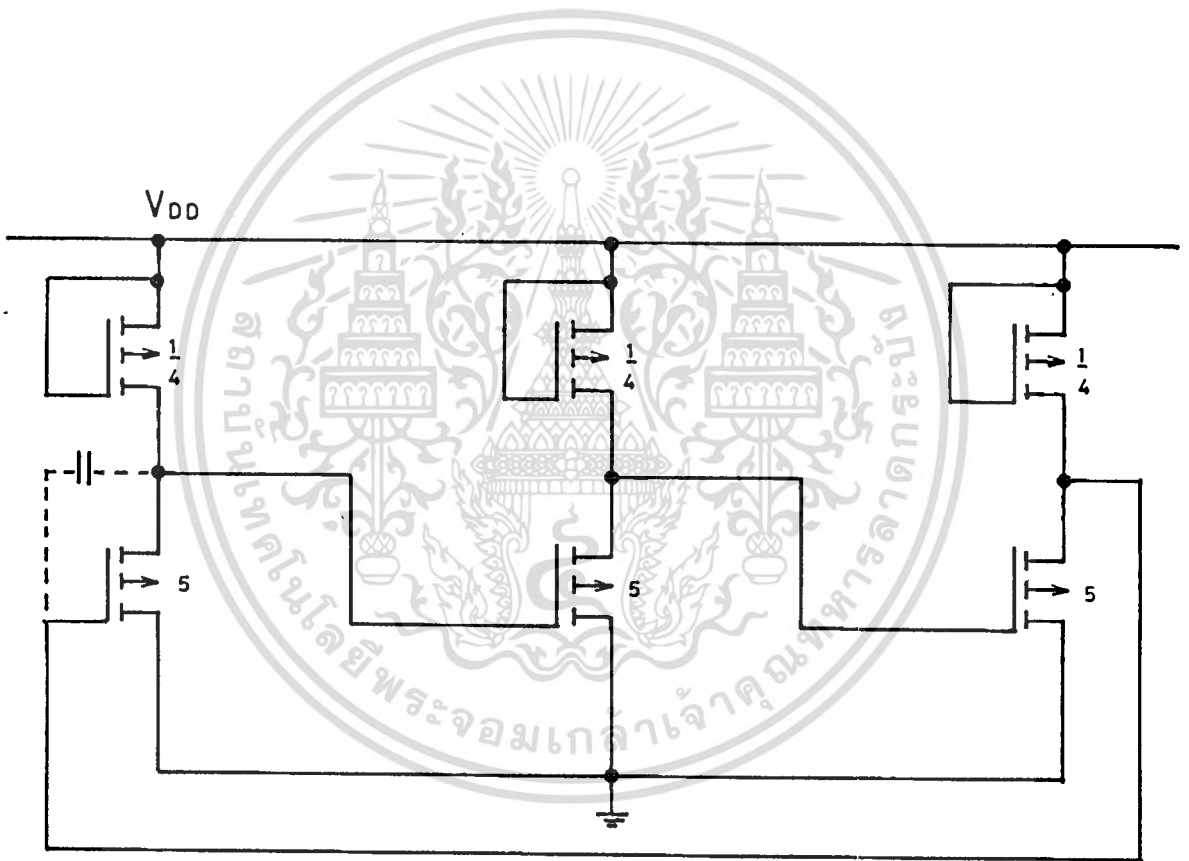
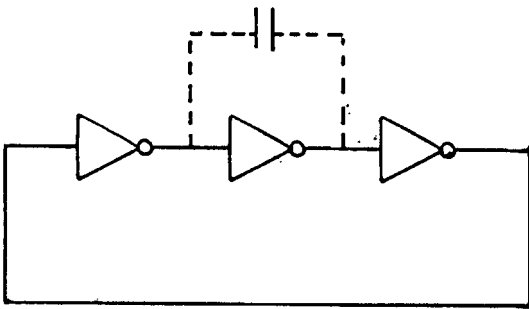
$$Q_c = AB+(A+B)C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# RING OSC.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix I

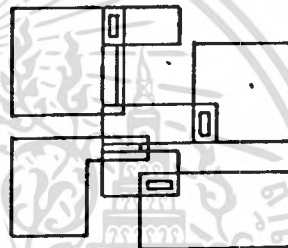
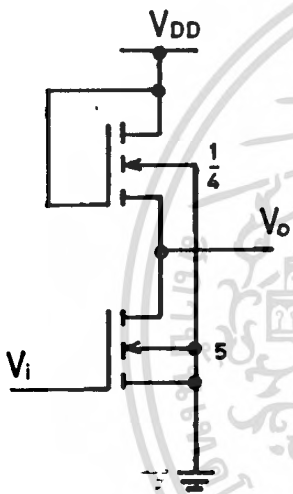
NMOS IC DESIGN

INVERTER

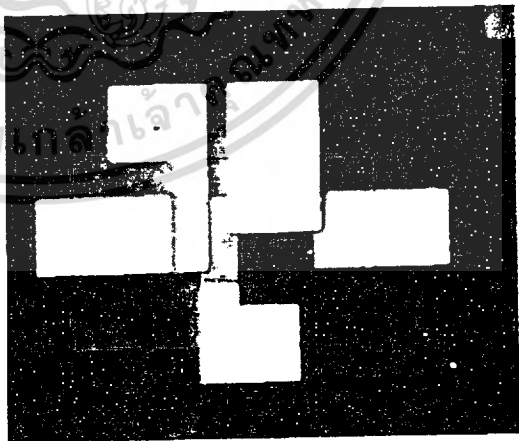


$$V_o = \bar{V}_i$$

$V_i$	$V_o$
0	1
1	0



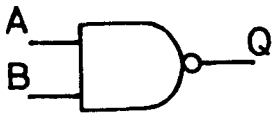
ภาพจากต้นแบบ



ภาพถ่ายจากชิ้นงาน

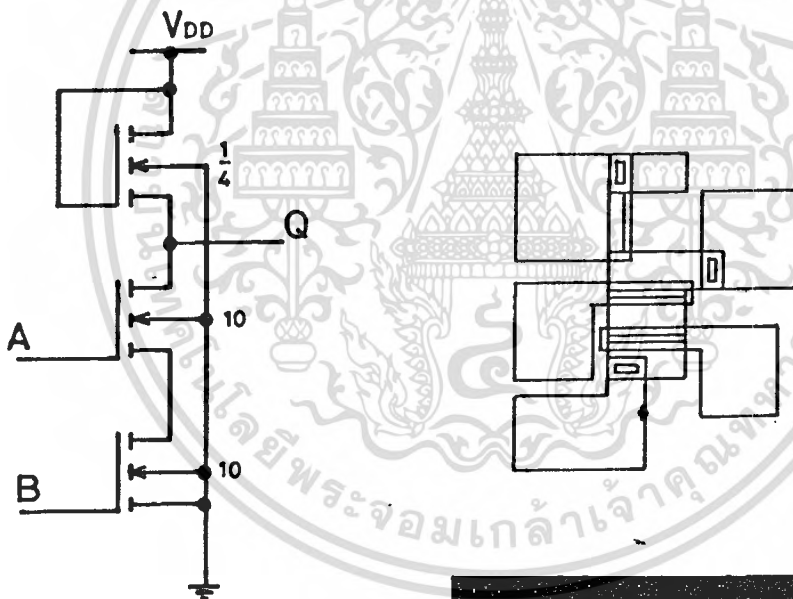
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# NAND GATE

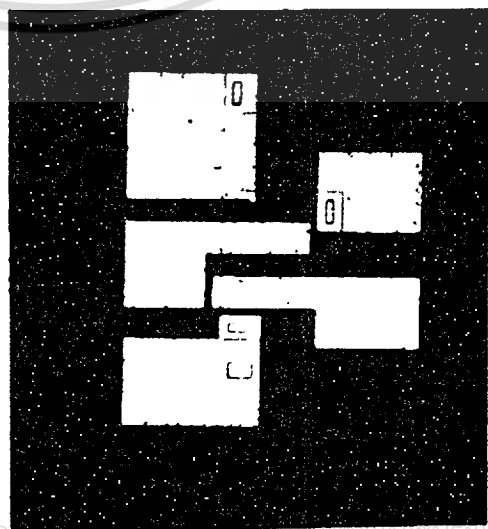


$$Q = \overline{A \cdot B}$$

A	B	Q
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



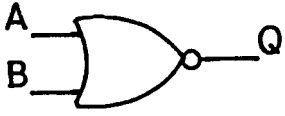
ภาพจากสมบ



ภาพถ่ายจากชน

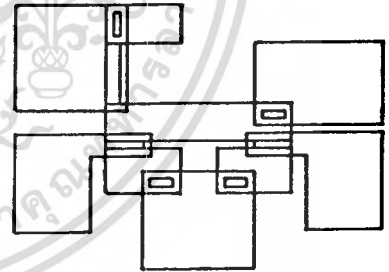
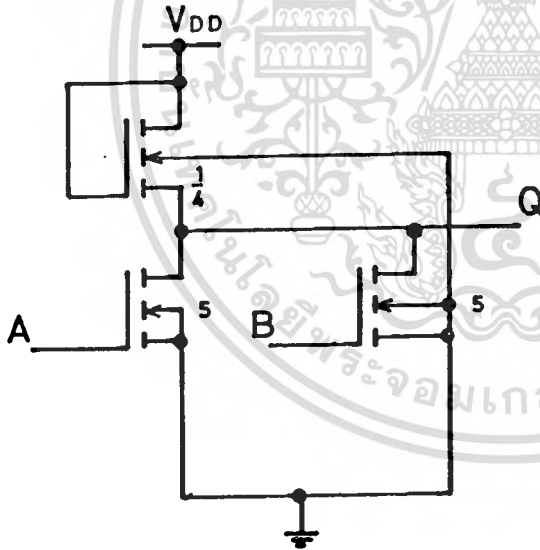
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูยูเอเทเห็นาเบเซบระเยช่นด้านกรคำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# NOR GATE

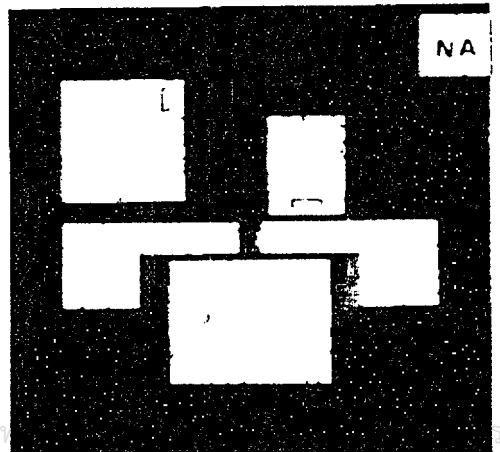


$$Q = \overline{A+B}$$

A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



ภาพต้นแบบ

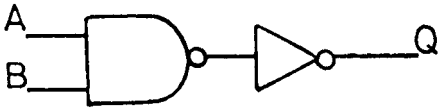


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารด้วย

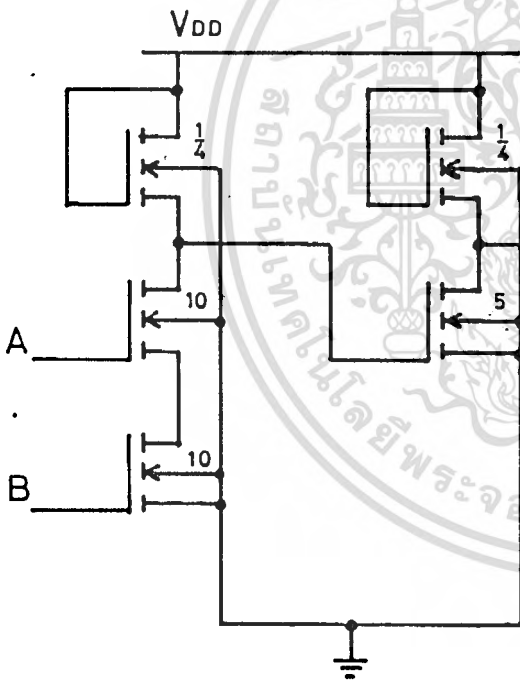
ภาพถ่ายจากโรงงาน

# AND GATE



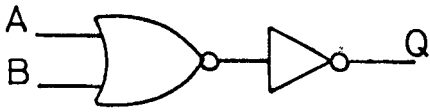
$$Q = A \cdot B$$

A	B	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



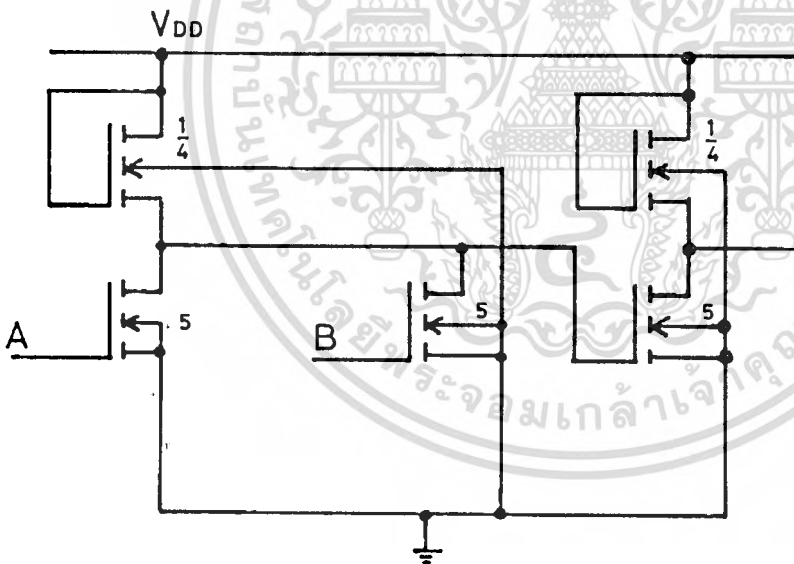
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# OR GATE



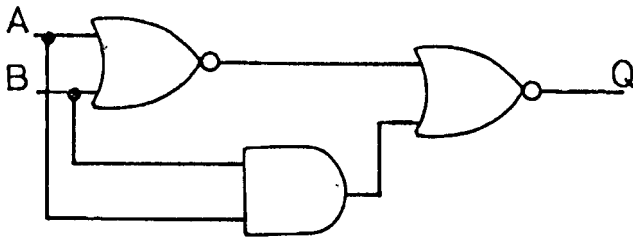
$$Q = A + B$$

A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



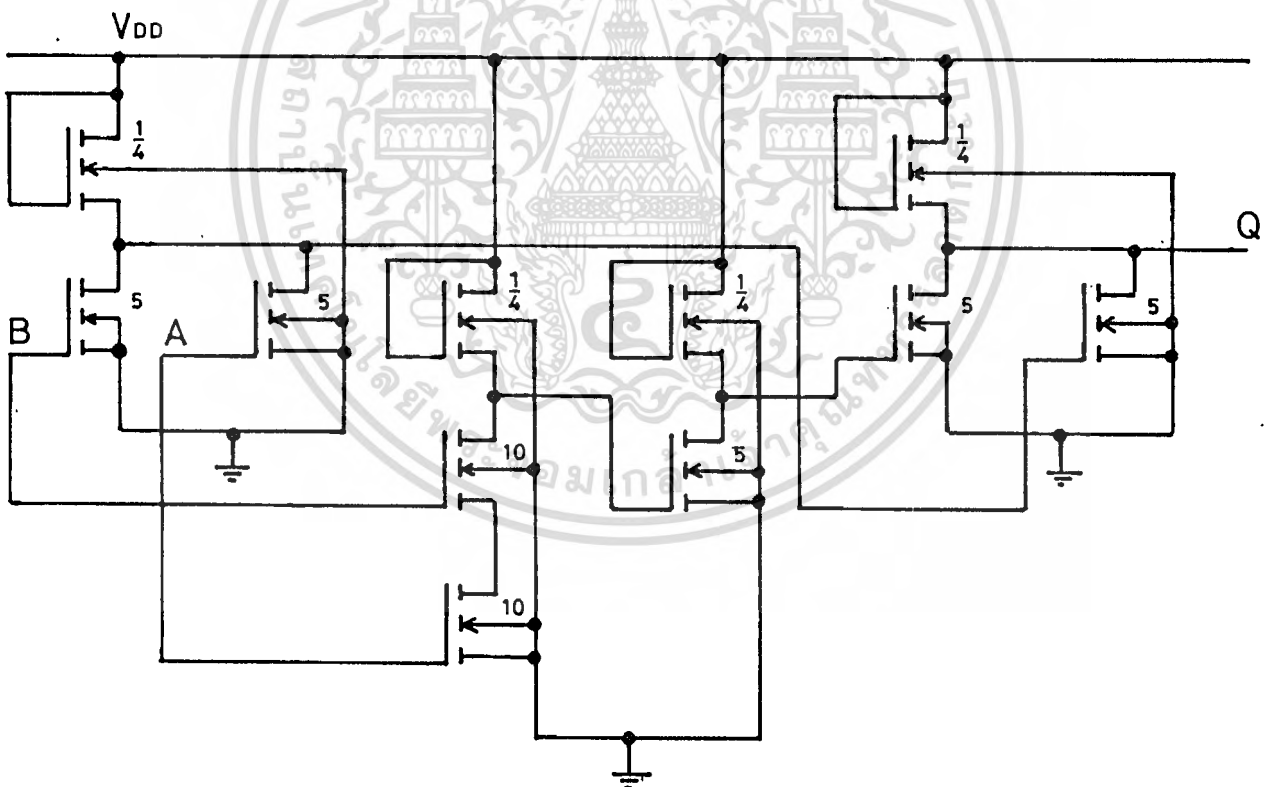
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# XOR GATE



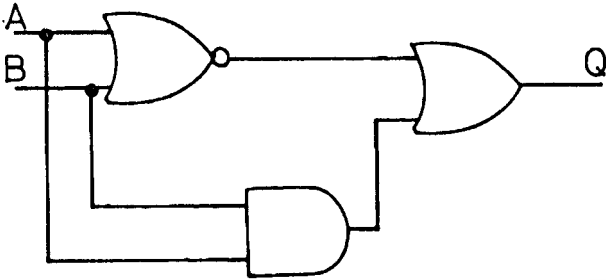
$$Q = A \oplus B = \bar{A}B + A\bar{B}$$

A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



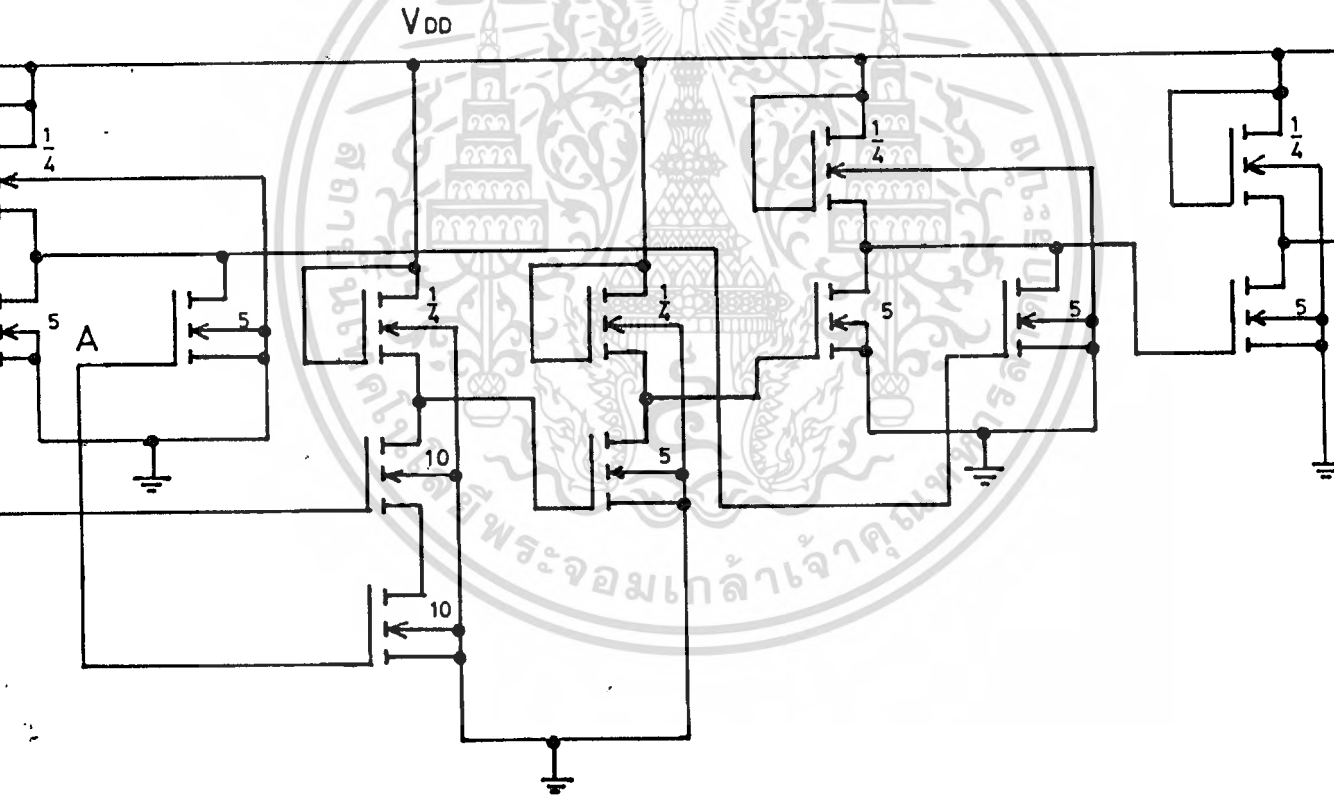
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# XNOR GATE



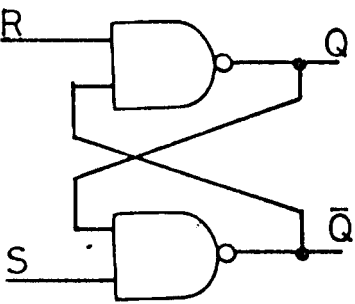
A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	1
1	1	1

$$Q = A \oplus B = \bar{A}\bar{B} + AB$$

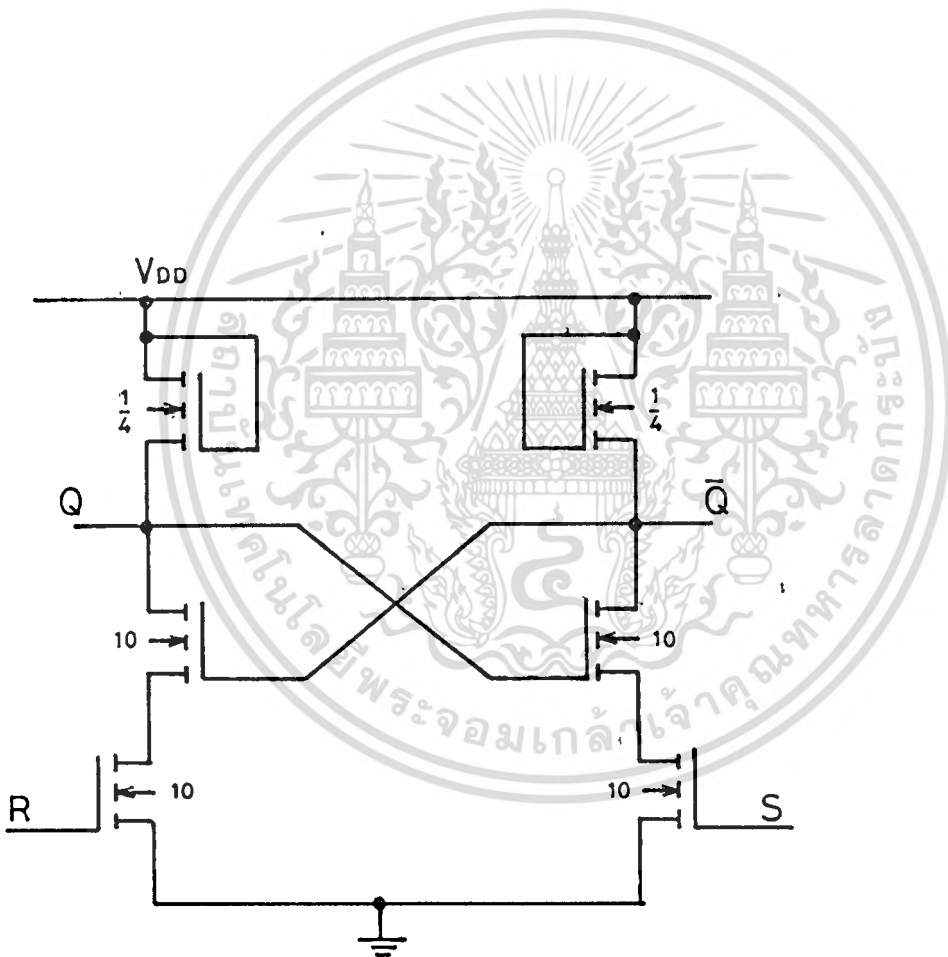


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### R.S. flip-flop (NAND)

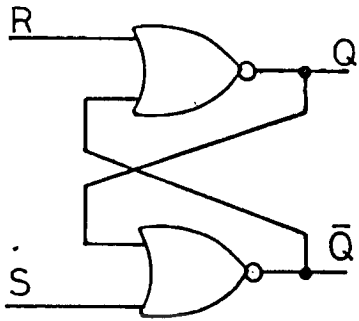


R	S	Q
0	0	?
0	1	1
1	0	0
1	1	N.C.

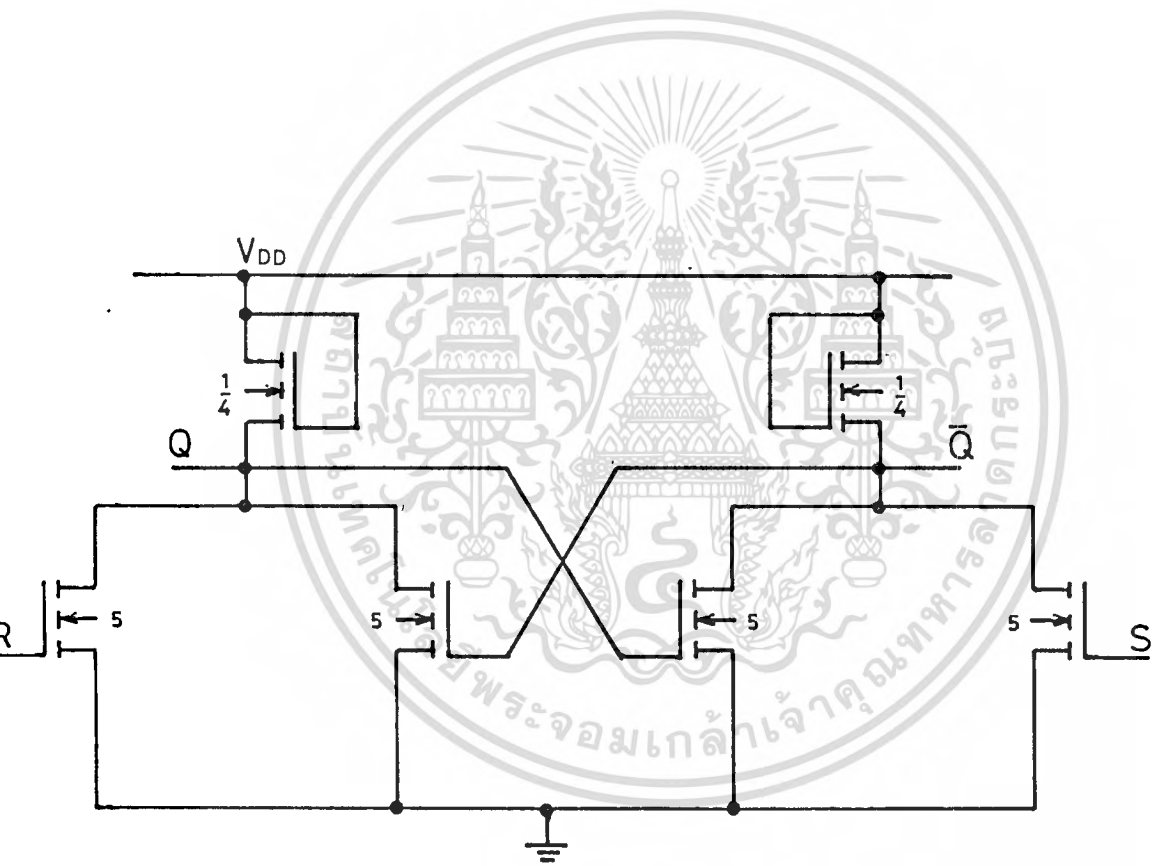


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### R.S. flip-flop(NOR)

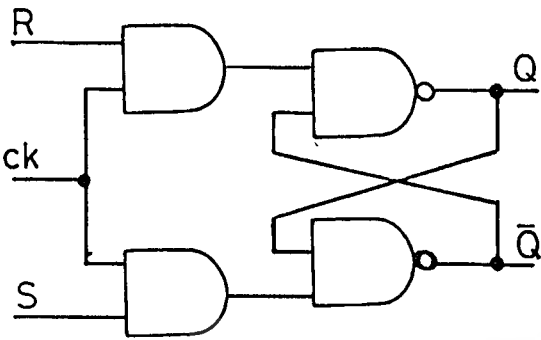


R	S	Q
0	0	N.C.
0	1	1
1	0	0
1	1	?

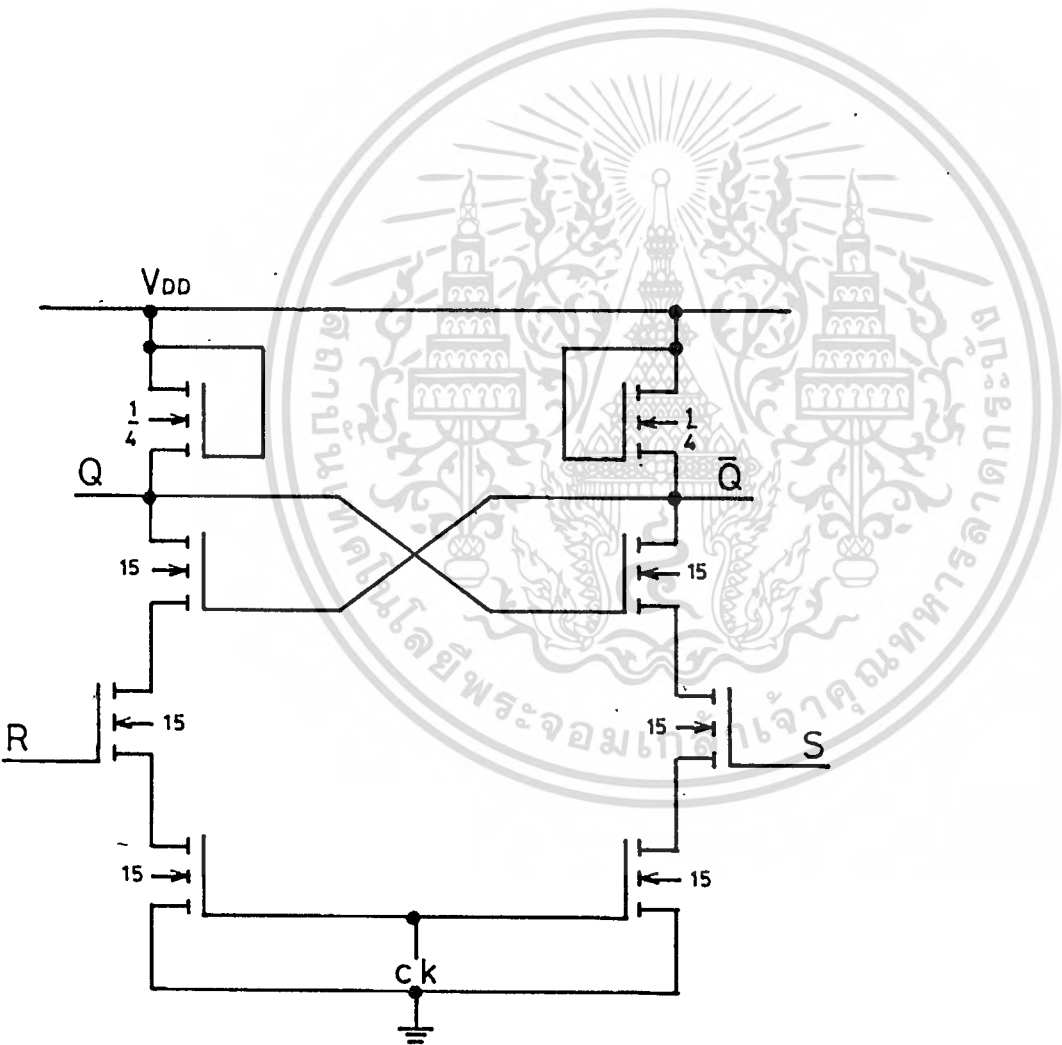


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### R.S. flip-flop + ck ( NAND)

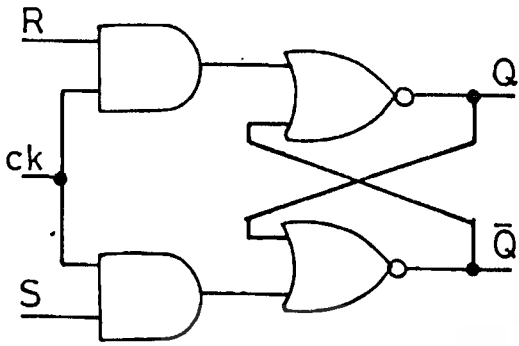


R	S	Q
0	0	?
0	1	1
1	0	0
1	1	N.C.

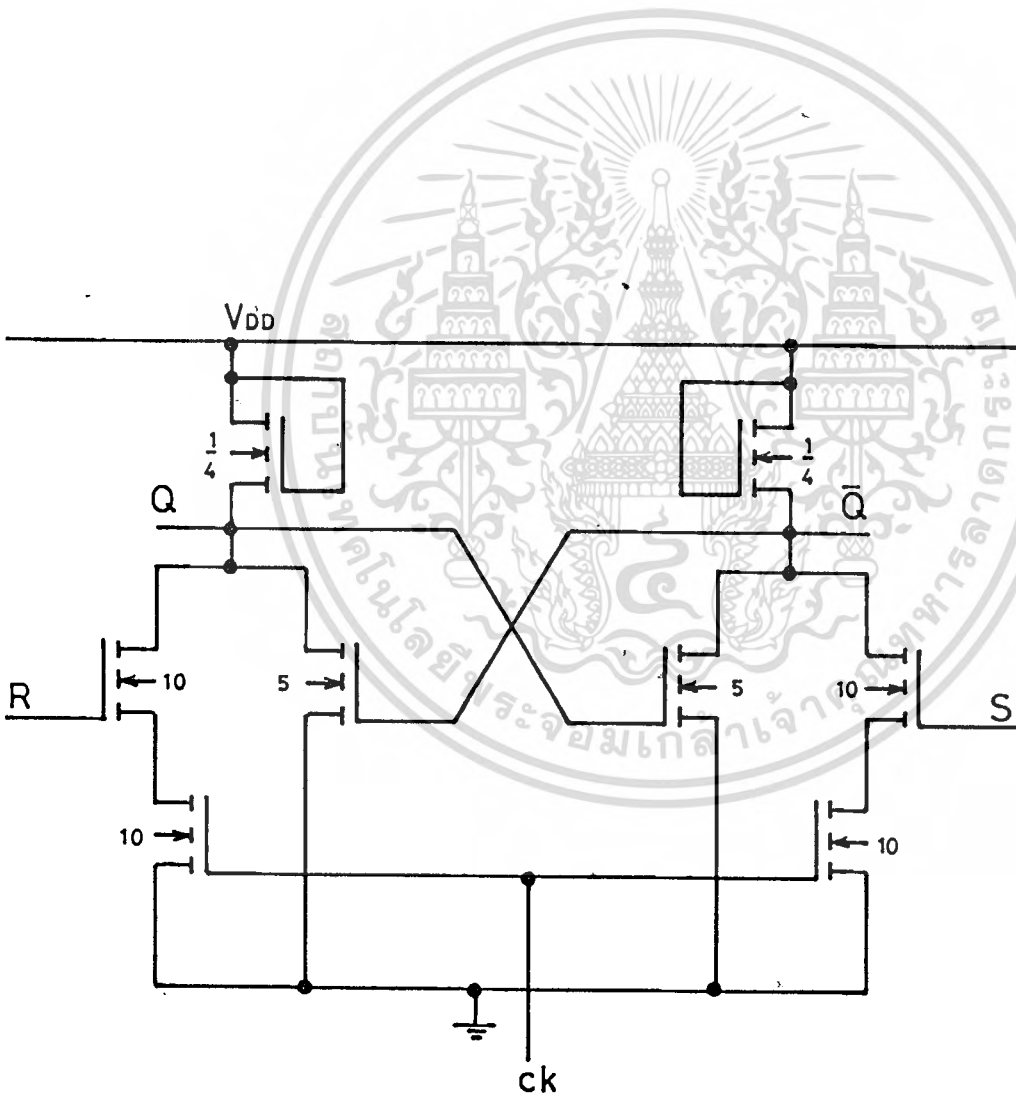


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### R.S. flip-flop+ck(NOR)

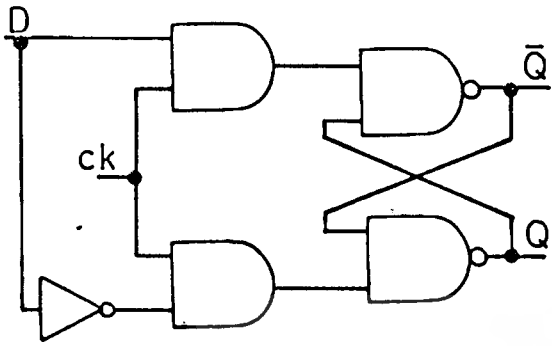


R	S	Q
0	0	N.C.
0	1	1
1	0	0
1	1	?

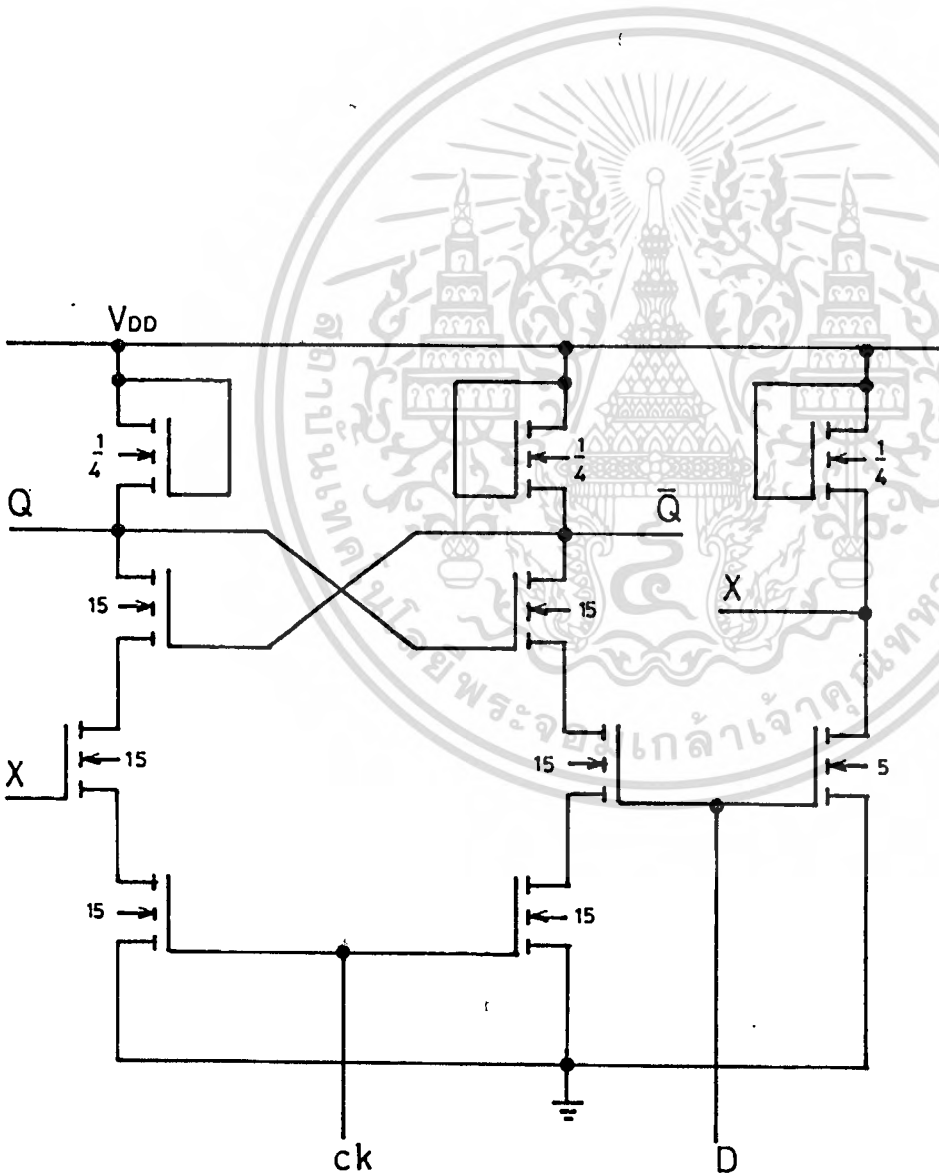


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### D. flip-flop+ck

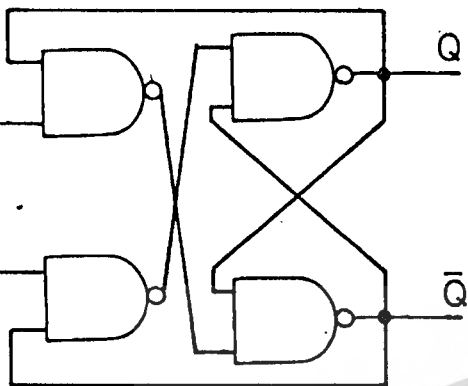


D	ck	$Q^{N+1}$
0	0	$Q^N$
0	1	0
1	0	$Q^N$
1	1	1

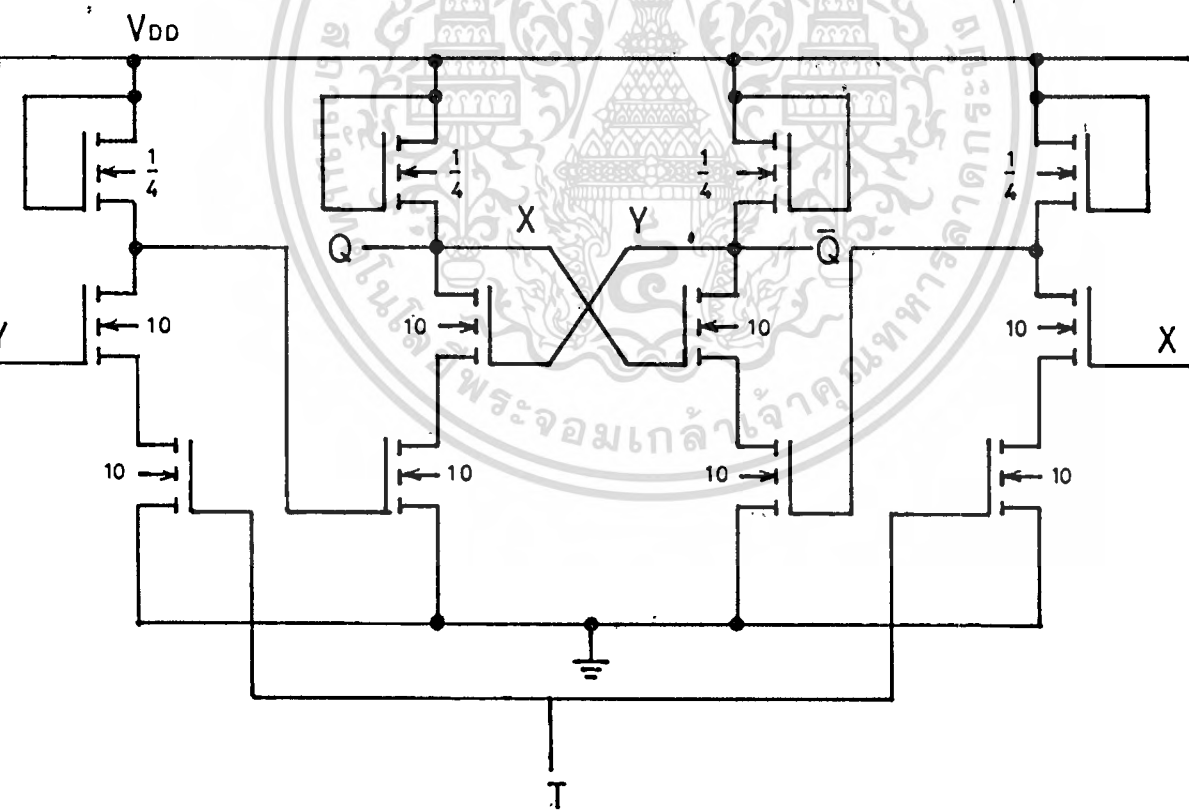


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### T. flip-flop

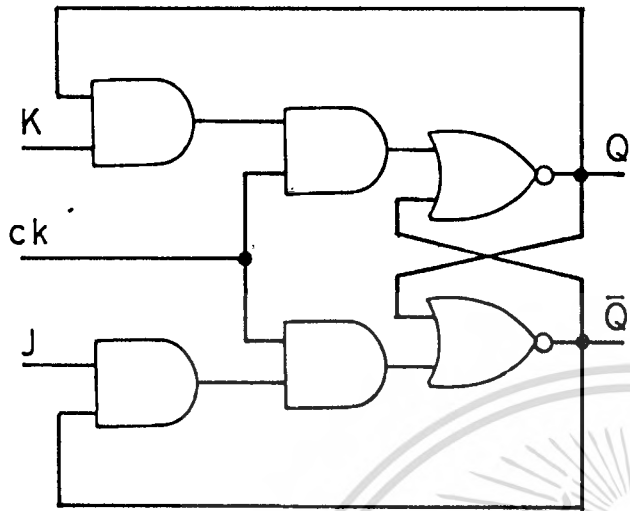


T	$Q^{N+1}$
0	$Q^N$
1	$\bar{Q}^N$

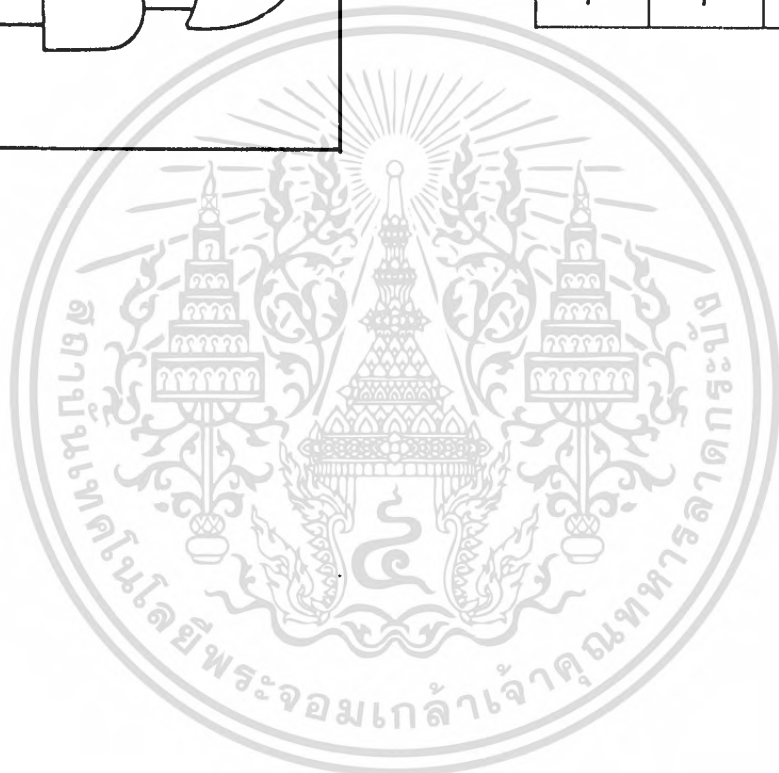


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

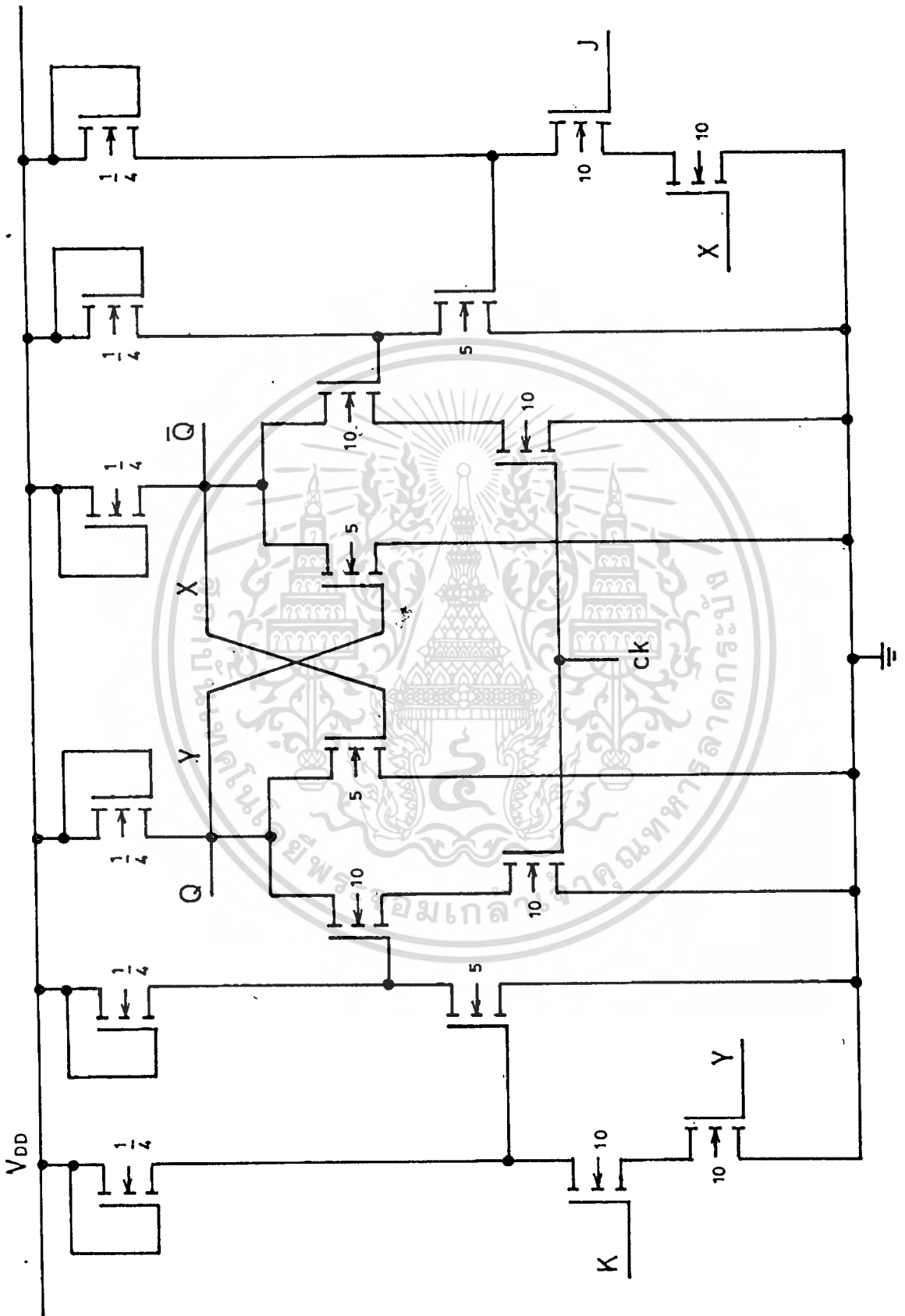
### J.K. flip-flop + ck



J	K	$Q^{N+1}$
0	0	$Q^N$ (NC)
0	1	0
1	0	1
1	1	$\bar{Q}^N$ (T.)



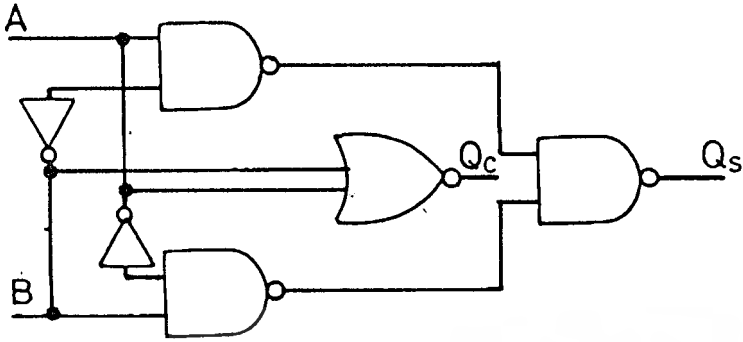
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



J.K. 11lp-11op + ck

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

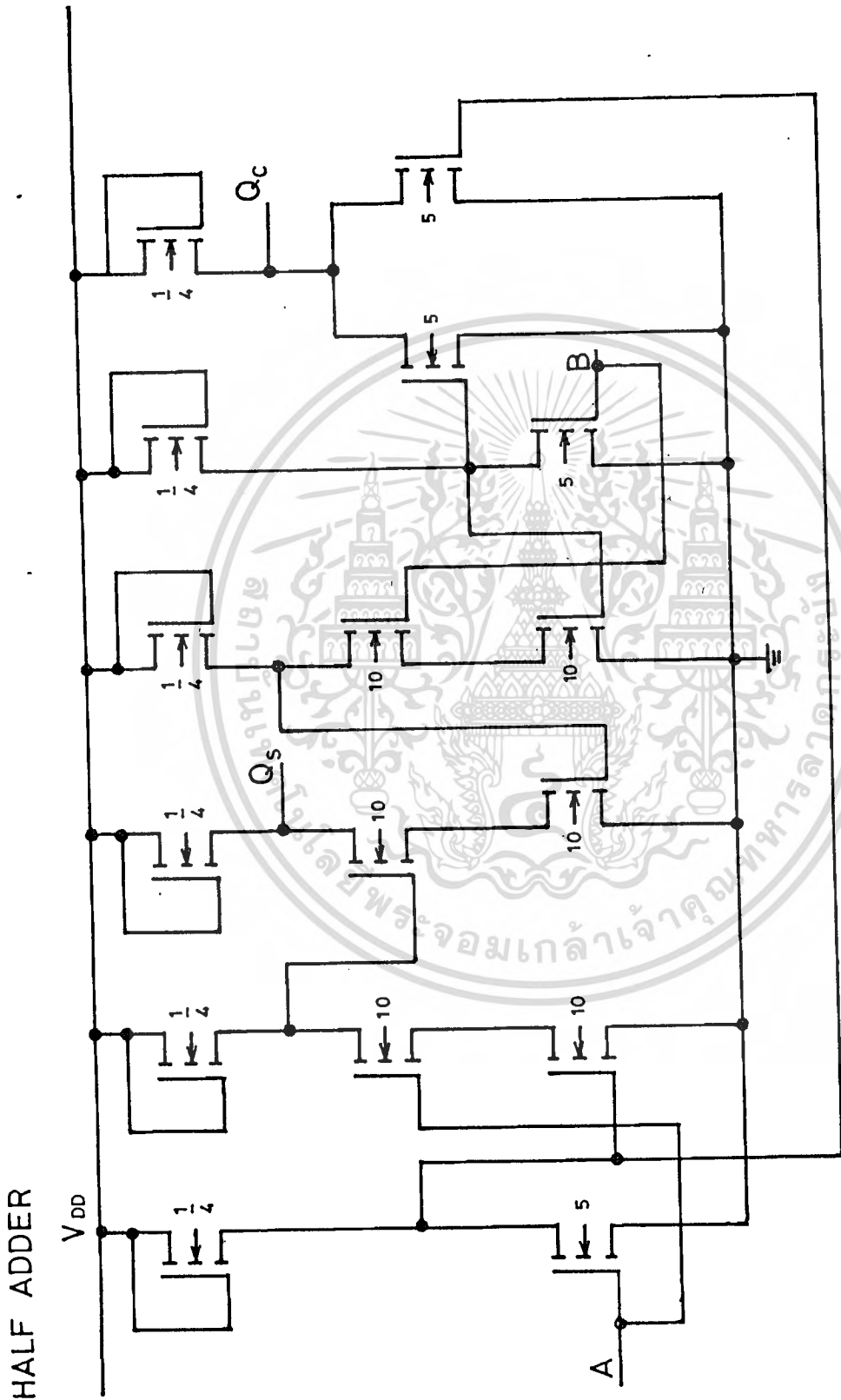
# HALF ADDER



$$Q_s = A \oplus B$$

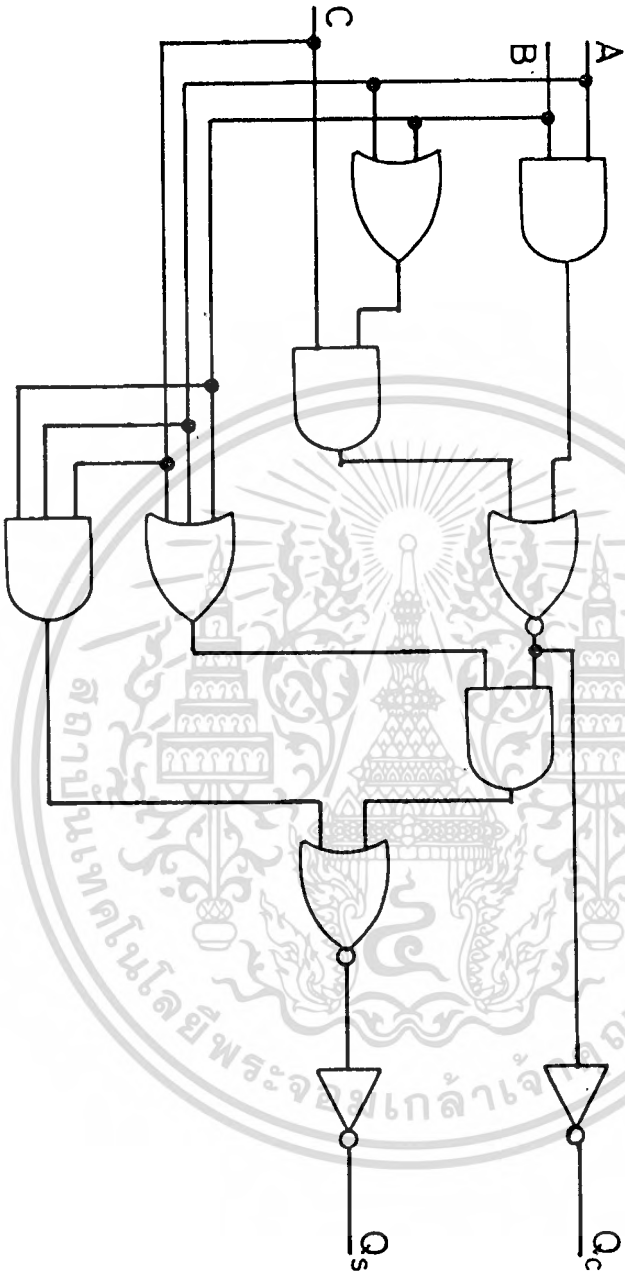
$$Q_c = A \cdot B$$





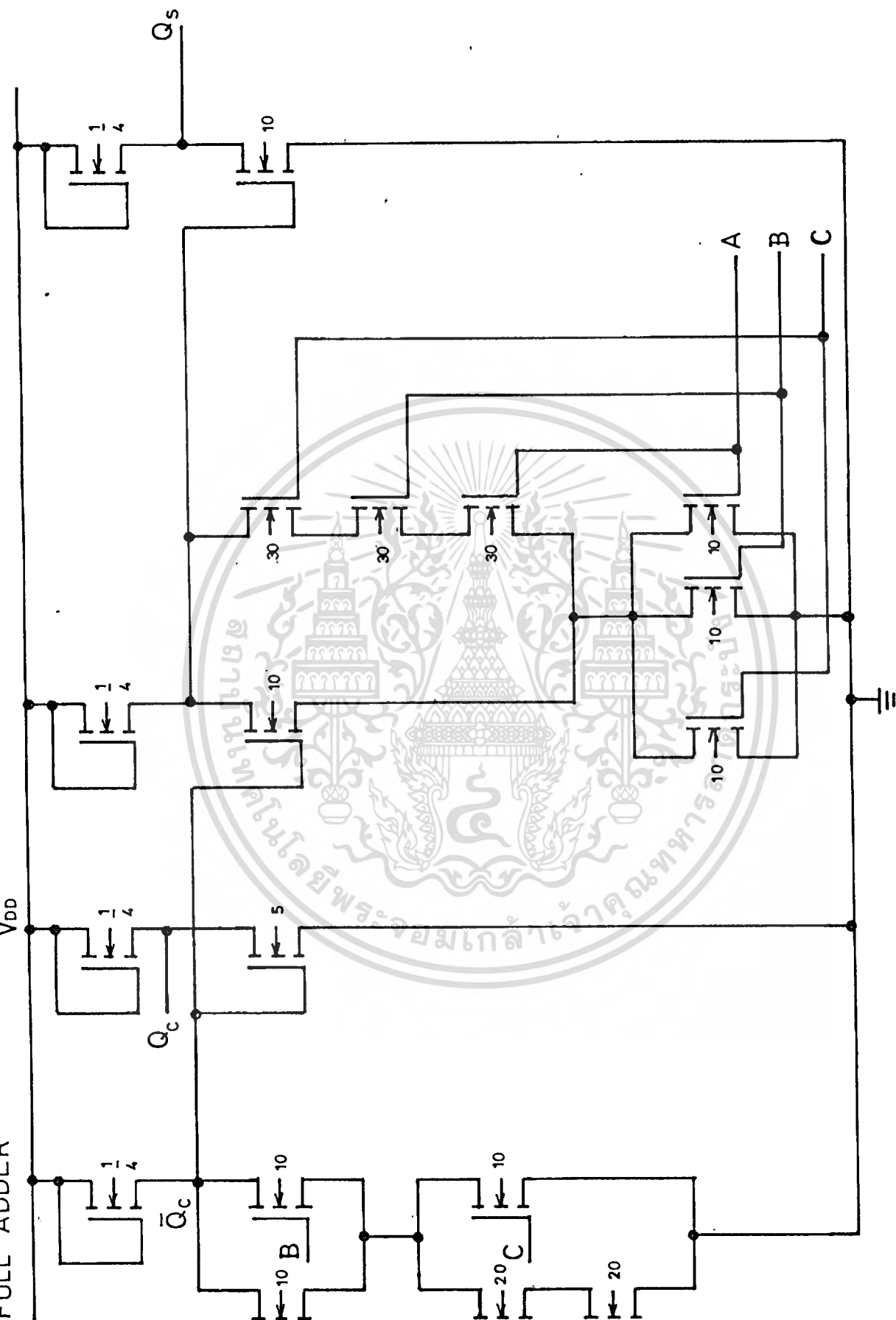
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FULL ADDER



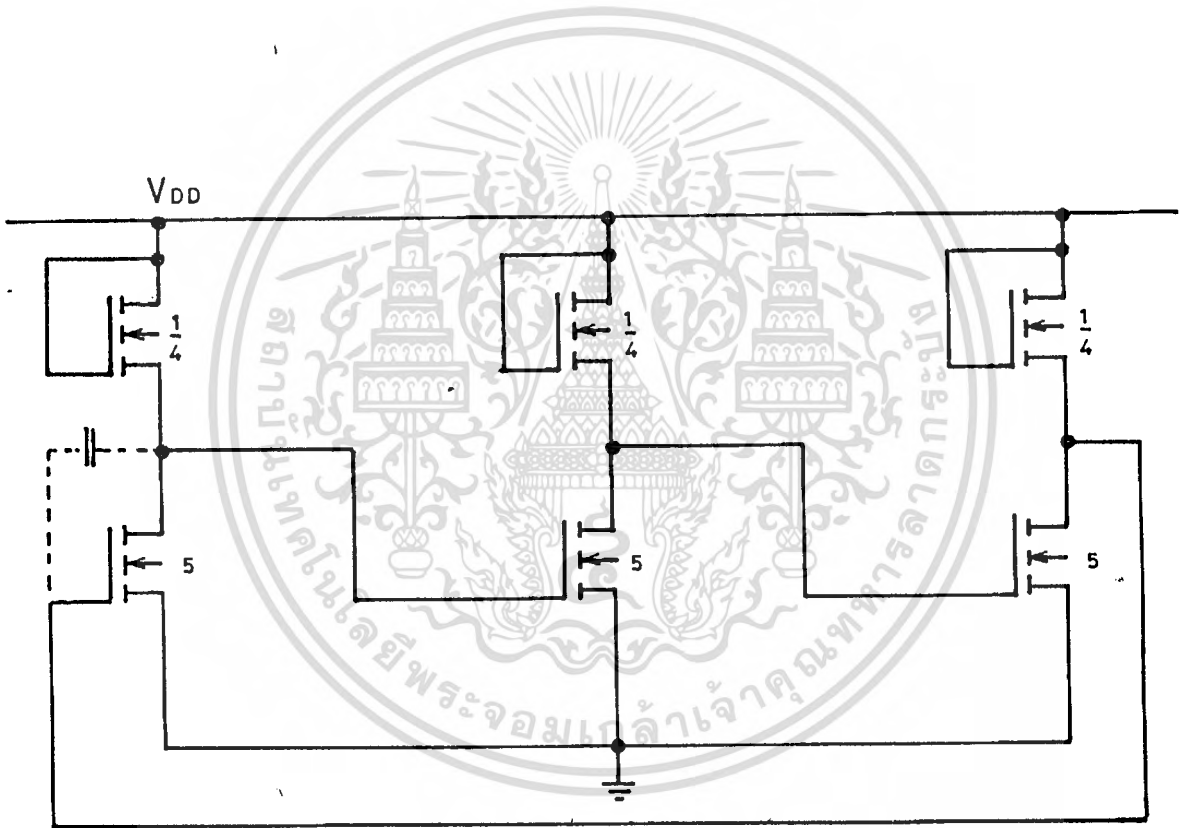
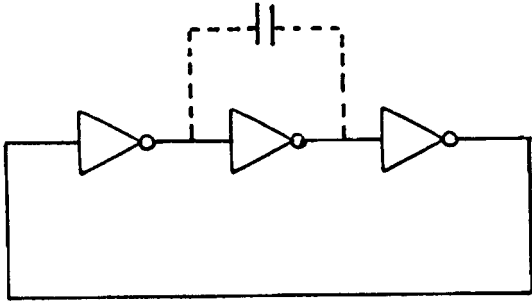
$$Q_s = \bar{Q}_c(A+B+C) + ABC$$

$$Q_c = AB + (A+B)C$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RING OSC.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้