

การศึกษา วิจัย และพัฒนาเฟดที่มีโครงสร้างใหม่แบบ MOIS

STUDY RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE NEW STRUCTURE MOIS FET



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
คำนำ	III
บทที่ 1 ทฤษฎีของมอสทรานซิสเตอร์	1
1.1 มอสทรานซิสเตอร์ (MOS Transistor)	1
1.2 หลักการให้ไป้อัส	6
1.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์	10
1.4 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage; $V_T$ ) ในมอสทรานซิสเตอร์	14
บทที่ 2 การพัฒนาโครงสร้าง MOS FET มาเป็น MOIS FET	16
2.1 บทนำ	16
2.2 โครงสร้างของมอซฟีเฟด (MOIS FET Structure)	16
2.3 ผลของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิกอน	18
2.3.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำ	18
2.3.2 ลักษณะระดับพลังงานของทองในซิลิกอน	18
2.3.3 คำนึงถึงความต้านทานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ	23
2.3.4 ทองคำเป็นตัวควบคุม life time	26
2.3.5 มอซฟีทรานซิสเตอร์ (MOIS Transistor)	28
2.3.5.1 ทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ชนิดพี-แชนแนล	28
2.3.5.2 ทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ชนิดเอ็น-แชนแนล	29
2.4 การเลือกชนิดของฐานรอง	30
2.5 การพัฒนาโครงสร้าง MOIS FET ไปเป็น CMOIS	31

บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการเก็บบรรจุ	35
3.1 การออกแบบมอยซ์เฟตและการทำมาสก์ต้นแบบ	35
3.2 กระบวนการสร้างมอยซ์เฟต	39
3.3 การเก็บบรรจุ	52
3.4 การออกแบบวงจรรวมที่มีโครงสร้างแบบคอมพลิเมนทารีมอยซ์	56
3.5 กระบวนการสร้างวงจรรวมแบบคอมพลิเมนทารีมอยซ์ (CMOIS)	58
3.6 การเก็บบรรจุ	60
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	61
4.1 การทดลองและศึกษาเฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกแพรวะต่อมทองคำเข้าไป	61
4.1.1 การออกแบบและทดลองสร้างมอยซ์เฟตบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิด พื้นที่ถูกแพรวะด้วยอะตอมทองคำ	61
4.1.2 การออกแบบและทดลองสร้างมอยซ์เฟตบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิด เอ็นที่ถูกแพรวะด้วยอะตอมทองคำ	65
4.1.3 การศึกษาผลของขนาด โครงสร้างของช่องทางเดินกระแสต่อคุณสมบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของมอยซ์เฟต	68
4.1.3.1 การศึกษาผลของขนาด โครงสร้างของช่องทางเดินกระแสต่อ คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของมอยซ์เฟต	68
4.1.3.2 การศึกษาผลของขนาด โครงสร้างของช่องทางเดินกระแสต่อ คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเอ็นมอยซ์เฟต	73
4.2 การศึกษาคุณสมบัติของมอยซ์เฟตที่มีการทำงานแบบ เอ็นฮานซ์เมนท์โหมด	79
4.2.1 การทดลองและผลการทดลองวัดคุณสมบัติของมอยซ์เฟตที่มีการทำงาน แบบ เอ็นฮานซ์เมนท์โหมด	79
4.2.1.1 การทดลองวัดรอยต่อ p-i (p-i junction)	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 การทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V char.)	81
4.2.2 การทดลองและผลการทดลองวัดคุณสมบัติของเอ็นเมอชพีเพดที่มีการทำงาน แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	82
4.2.2.1 การทดลองวัดรอยต่อ n-i (n-i junction)	83
4.2.2.2 การทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V char.)	84
4.3 การทดลองและการพัฒนาโครงสร้างคอมพลิเมนต์เมทัลอินเวอ์เตอร์ (CMOIS)	86
4.3.1 การทดลองสร้างคอมพลิเมนต์เมทัลอินเวอ์เตอร์	86
4.3.1.1 การทดลองและผลการทดลองวัดการตอบสนองต่อสัญญาณสี่เหลี่ยม	88
4.3.1.2 การทดลองและผลการทดลองวัดวัดความเร็วในการสวิตช์ (Switching speed)	89
4.3.1.3 การทดลองและผลการทดลองวัดการตอบสนองการส่งผ่านสัญญาณ (Transfer characteristic)	90
4.3.2 การทดลองและผลการทดลองศึกษาผลของขนาดโครงสร้างทาง เรขาคณิตต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ CMOIS อินเวอ์เตอร์	92
4.3.2.1 การทดลองและผลการทดลองศึกษาผลของ $\tau_p$ ต่อการส่งผ่าน สัญญาณของ CMOIS อินเวอ์เตอร์	92
4.3.2.2 การทดลองและผลการทดลองศึกษาผลของระยะห่างระหว่าง พินเมอชพีเพดและเอ็นเมอชพีเพดในวงจร CMOIS อินเวอ์เตอร์	95
4.4 การประยุกต์ใช้งาน CMOIS ในรูปของวงจรรวม	98
4.4.1 การทดลองสร้างวงจรรวม CMOIS NOR GATE และ OR GATE	98
4.4.2 การทดลองสร้างวงจรรวม CMOIS RING OSCILLATOR	100

บทที่ 5 การวิเคราะห์การทำงานและคุณสมบัติของมอดูลเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	104
5.1 การวิเคราะห์การทำงานของพีมอดูลเฟต	105
5.1.1 การหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) ของพีมอดูลเฟต	106
5.1.2 การหาค่าซอส - เดรน คอนดักแตนซ์ ( $g_{sd}$ ) ของพีมอดูลเฟต	107
5.1.3 การหาค่าความคล่องตัวของประจุพาหะโฮล ( $\mu_{pAu}$ ) ของพีมอดูลเฟต	110
5.1.4 การวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage; $V_T$ ) ของพีมอดูลเฟต	111
5.1.5 การวัดค่าการตอบสนองต่อความถี่ของพีมอดูลเฟต	114
5.2 การวิเคราะห์การทำงานของเอ็นมอดูลเฟต	116
5.2.1 การหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) ของเอ็นมอดูลเฟต	117
5.2.2 การหาค่าซอส - เดรน คอนดักแตนซ์ ( $g_{sd}$ ) ของเอ็นมอดูลเฟต	119
5.2.3 การหาค่าความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน ( $\mu_{nAu}$ ) ของเอ็นมอดูลเฟต	119
5.2.4 การวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage; $V_T$ ) ของเอ็นมอดูลเฟต	122
5.2.5 การวัดค่าการตอบสนองต่อความถี่ของเอ็นมอดูลเฟต	125
บทที่ 6 สรุปและบทวิจารณ์	127
กิตติกรรมประกาศ	136
เอกสารอ้างอิง	137
ภาคผนวก ก. Conversion table	139
ภาคผนวก ข. Physical constants	140
ภาคผนวก ค. List of Symbols	142
ภาคผนวก ง. การคำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำในฐานรองซิลิกอน	146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษา วิจัย และพัฒนาเฟดที่มีโครงสร้างใหม่แบบ MOIS
นักศึกษา	นาย สัจจา ส่งศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, อาจารย์วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	พ.ศ. 2532

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งทำการทดลองศึกษาเพื่อการพัฒนาโครงสร้าง และกระบวนการสร้างของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทผลของสนามไฟฟ้า โดยใช้วัสดุและเทคโนโลยีที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำให้เกิดการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างใหม่ขึ้น เรียกว่ามอยซ์เฟด หรือมอยซ์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย ส่วนเดรน ส่วนซอร์ส ส่วนเกต และฐานรอง โดยที่ฐานรองจะเป็นฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรินซิก ซึ่งเกิดจากการแพร่อะตอมของทองคำ เข้าไปในฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น หรือชนิดพี ดังนั้นบนฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรินซิกนี้ จึงสามารถใช้สร้างมอยซ์เฟดได้ทั้งชนิดเอ็นแซนแนล และพีแซนแนล บนฐานรองเดียวกัน จากข้อดีอันนี้ทำให้สามารถพัฒนาโครงสร้างของมอยซ์เฟด ไปสู่วงจรรวมแบบคอมพลีเมนทารี ที่ไม่ต้องมีบ่อแยกได้โดยง่าย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงการพัฒนาโครงสร้างของมอยซ์เฟด, การปรับปรุงใหม่ในการทำงานของเอ็นมอยซ์เฟดให้เป็นเอ็นฮานซ์เมนท์โหมด, การพัฒนามอยซ์เฟดไปสู่โครงสร้างแบบคอมพลีเมนทารีมอยซ์, การพัฒนาระยะห่างระหว่างพีมอยซ์เฟดและเอ็นมอยซ์เฟดในโครงสร้างแบบคอมพลีเมนทารี, การพัฒนาวงจรรวมแบบคอมพลีเมนทารีมอยซ์, กระบวนการสร้าง, การทดลองและผลการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอยซ์เฟด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Study Research and Development of the new structure  
MOIS FET

Name Sajja Songsiri

Thesis Advisors Assoc.Prof.Dr.Somkiate Supadech, Wisut Titiroongruang

Level of Study Master of Engineering in Electrical Engineering

Academic Year 1989

## ABSTRACT

This study intends to develop the structure and fabrication process of the field effect semiconductor devices by using the materials and technology providing at the Semiconductor laboratory of the Electronics Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The investigation yields a new formation of semiconductor devices, called MOIS FET or MOIS transistor. MOIS transistor consists of drain region, source region, gate and substrate. The substrate is an intrinsic semiconductor, that formed by Au doped in n-type or p-type silicon. Both n-channel and p-channel MOIS transistors can be formed on the intrinsic silicon substrate. Hence MOIS transistor can be easily developed to CMOIS ICs without wells.

This thesis report the development of the MOIS structure, the improvement of the NMOIS FET to be the NMOIS FET Enhancement Mode, the development of the MOIS FET to be the CMOIS structure, the fabrication process, the experiment of the MOIS devices' characteristics and its results.

## คำนำ

การศึกษาวิจัยและพัฒนาเฟตที่มีโครงสร้างใหม่แบบ MOIS (Metal Oxide Intrinsic Semiconductor) ที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ จะเป็นการศึกษาและวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ ซึ่งเริ่มต้นการศึกษาจากสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบเดิม คือทฤษฎีของ MOS จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อศึกษาหาแนวทางในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปสู่โครงสร้างแบบใหม่ ที่มีลักษณะการทำงานเหมือนกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภท MOS เมื่อมีแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างแล้ว จึงทำการศึกษา วิจัย เป็นเฉพาะกรณี โดยเลือกศึกษาในกรณีที่เหมาะสมกับวัสดุและเทคโนโลยีที่มีอยู่ แล้วทำการออกแบบและหากระบวนการสร้างที่เหมาะสม จากนั้นจึงศึกษาหาข้อมูลจากสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ที่สร้างขึ้น เพื่อหาแนวทางพัฒนาโครงสร้างจากเฟตตัวเดียว ๆ ไปสู่วงจรรวมที่มีโครงสร้างผสมแบบคอมพลีเมนท์ารี เพื่อที่จะก้าวสู่วงจรรวมที่มีขนาดใหญ่ต่อไป รายละเอียดต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พอจะสรุปเป็นบทได้ดังนี้

บทที่ 1 เป็นการศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอสเฟต การทำงานของโครงสร้างแบบมอส ตลอดจนวิธีการควบคุมคุณสมบัติและกำหนดลักษณะการใช้งาน

บทที่ 2 เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางที่จะเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบ MOS ไปสู่โครงสร้างใหม่ที่เรียกว่าแบบมอยซ์ โดยจะยังคงลักษณะการทำงานของโครงสร้าง และการใช้งานให้เหมือนกับแบบมอส นอกจากนี้ยังทำการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างของมอยซ์เฟต ไปสู่วงจรรวมที่มีโครงสร้างแบบคอมพลีเมนท์ารี

บทที่ 3 เป็นกระบวนการในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบมอยซ์เฟต และวงจรรวมแบบคอมพลีเมนท์ารีมอยซ์ โดยจะมีขั้นตอนต่างๆ เริ่มตั้งแต่การออกแบบ เลือกชนิดของวัสดุ จนถึงกระบวนการสร้างที่เหมาะสม และ การเก็บบรรจุ

บทที่ 4 จะเป็นการศึกษาหาข้อมูลจากสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นจากบทที่ 3 ในการศึกษา นี้จะเป็นการทดลองเพื่อเลือกชนิดของฐานรอง เริ่มต้น และกระบวนการสร้างที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีที่มีอยู่ แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของมอยซ์เฟต ทั้งชนิดพีมอยซ์ และ เอ็นมอยซ์ แล้วจึงทำการศึกษาดูการพัฒนาโครงสร้างไปสู่วงจรรวม ที่มีโครงสร้างแบบคอมพลีเมนท์ารีมอยซ์ และศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของวงจรรวมตัวอย่างที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นแนวทาง ในการพัฒนาโครงสร้างนี้ไปสู่วงจรรวมอื่นๆ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองพัฒนาโครงสร้างแบบคอมพลีเมนท์ารีมอยซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปสร้างเป็นวงจรรวมพื้นฐานทางลอจิกด้วย

บทที่ 5 เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอยซ์เฟต โดยการพิจารณาอ้างอิงจากสมการกระแสของมอสเฟตเพื่อหาสมการกระแสของมอยซ์เฟต จากนั้นนำสมการกระแสของมอยซ์เฟตมาพิจารณากับกราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของมอยซ์เฟตที่วัดจากชิ้นงาน เพื่อนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้วัดค่าแรงดันขีดเริ่ม และผลการวัดการตอบสนองต่อความถี่ของมอยซ์เฟตด้วย

บทที่ 6 ในบทนี้จะเป็นการสรุปแนวความคิด การพัฒนาโครงสร้างของมอยซ์เฟต ตลอดจนผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของมอยซ์เฟต และหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขให้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีประสิทธิภาพดียิ่งๆขึ้นไป เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงจึ่ต่อไป นอกจากนี้ยังได้มีการพิจารณาหาสมการกระแสของมอยซ์เฟต เพื่อใช้เป็นสมการหลักในการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอยซ์เฟต

ผลจากการศึกษา วิจัย และพัฒนามอยซ์เฟตครั้งนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาเทคโนโลยีการออกแบบ และสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทผลของสนามไฟฟ้า ให้มีขีดความสามารถสูงยิ่งขึ้น

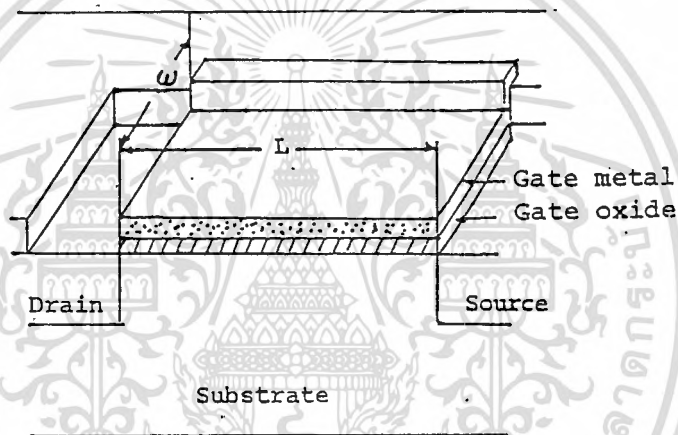
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### ทฤษฎีของมอสทรานซิสเตอร์

#### 1.1 มอสทรานซิสเตอร์ (MOS Transistor)

มอสทรานซิสเตอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งในตระกูลของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทผลของสนามไฟฟ้า (Field Effect devices) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือมีความต้องการพลังงานในขณะใช้งานต่ำ แต่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เมื่อเทียบกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทอื่น ๆ ที่มีลักษณะการใช้งานเช่นเดียวกัน จึงทำให้มอสทรานซิสเตอร์เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยเฉพาะในวงจรที่ต้องการใช้พลังงานต่ำ ๆ หรือ ในโครงสร้างของวงจรรวม (Integrated Circuit) ที่มีจำนวนตัวประกอบ (Component) มาก ๆ เช่น ไอซี ระดับ LSI และ VLSI ทั่ว ๆ ไป เป็นต้น



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป

ภาพตัดขวางแสดง โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนเดรน (Drain region) ส่วนเกต (Gate region) และ ส่วนซอร์ส (Source region) โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่การทำงานและคุณสมบัติแตกต่างกันดังนี้

- ส่วนซอร์ส เป็นบริเวณของสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิด (Different type) กับฐานรอง (Substrate) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายประจุพาหะที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าของมอส ( $I_{DS}$ )
- ส่วนเดรน เป็นอีกบริเวณหนึ่งของสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิดกับฐานรอง แต่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน (Same type) กับส่วนซอร์สทำหน้าที่เป็นทางออกไปสู่วงจรภายนอกของประจุพาหะที่มาจากส่วนซอร์ส

- ส่วนเกต เป็นบริเวณที่เชื่อมอยู่ระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอส มีโครงสร้างทั่ว ๆ ไป ประกอบด้วยชั้นบนสุดเป็นโลหะ (Metal) ตัวนำ ชั้นรองลงมาเป็นพวกฉนวนได้ออกไซด์ (Oxide) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ และชั้นล่างสุดเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งใช้เป็นฐานรองด้วย ส่วนเกตนี้จะทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมปริมาณประจุพาหะที่เคลื่อนที่จากส่วนซอสไปยังส่วนเดรนตามต้องการ

จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าว ซึ่งบริเวณส่วนเกตประกอบด้วย Metal - Oxide - Semiconductor นี้ จึงเรียกรวมชนิดนี้ว่า MOS Transistor และจะเห็นว่ากระแสไหลผ่านส่วนเกตนี้ไปได้น้อยมาก ๆ เนื่องจากมีชั้นของฉนวนป้องกันอยู่ชั้นเอง ดังนั้นในขณะที่ใช้งานส่วนเกตจึงต้องการเพียงแหล่งจ่ายศักดาเท่านั้น ไม่ต้องการแหล่งจ่ายกระแสเลย จึงทำให้มอสทรานซิสเตอร์มีความต้องการพลังงานในขณะที่ใช้งาน (Power Consumption) ต่ำนั่นเอง สำหรับส่วนเดรนและส่วนซอสนั้นโดยปกติแล้วจะมีโครงสร้างเหมือนกันทุกประการ ซึ่งสามารถใช้แทนกันได้ อันเป็นคุณสมบัติพิเศษอีกประการหนึ่งของมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งเรียกว่ามีความสมมาตร (Bilaterally Symmetric) แต่สำหรับในโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ตัวเดียว ๆ นั้น เพื่อความสะดวกในการใช้งาน จึงสร้างให้ส่วนซอสต่อเชื่อมกับส่วนของฐานรองเลย อันเป็นการกำหนดส่วนต่าง ๆ ของมอสทรานซิสเตอร์ให้มีหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกันไป ดังนั้นสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ตัวเดียว ๆ โดยทั่วไปจึงเขียนขาของฐานรอง (Substrate) เชื่อมต่อกับซอส (S) หรือละเว้นไม่เขียนขาของฐานรองเลยโดยให้เข้าใจเองว่า ส่วนของฐานรองต่ออยู่กับส่วนซอสดังกล่าว

เมื่อให้ไบอัสที่เหมาะสมกับส่วนต่าง ๆ ของมอสทรานซิสเตอร์แล้ว ประจุพาหะจากส่วนซอสจะเคลื่อนที่ผ่านช่องทางเดินกระแส (Channel) ในส่วนเกต (ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของฐานรองที่อยู่ใกล้ ๆ กับผิวสัมผัสระหว่างออกไซด์ ส่วนเกตกับฐานรองที่เกิดการเปลี่ยนแปลงชนิด (type) ของสารกึ่งตัวนำไปเป็นชนิดเดียวกับสารกึ่งตัวนำส่วนเดรนและส่วนซอสแล้ว) ไปยังส่วนเดรน การเคลื่อนที่ของประจุพาหะดังกล่าวเกิดจากสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมตลอดจากส่วนซอสถึงส่วนเดรน อันเนื่องมาจากความต่างศักดา ระหว่างส่วนทั้งสองนั้น ดังนั้นกระแสดังกล่าวจึงเป็นกระแสดริฟท์ (drift) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมนั้น โดยที่ขนาดของสนามไฟฟ้างกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดของความต่างศักดาและระยะห่างระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอสนั่นเอง กระแสดริฟท์ที่เกิดขึ้นนี้จะถูกประมาณว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมากที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นเพียงชนิดเดียว ด้วยเหตุนี้ มอสทรานซิสเตอร์จึงถูกเรียกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าเป็น ยูนิโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Unipolar Transistor) และเนื่องจากประจุพาหะส่วนมากในสารกึ่งตัวนำมีเพียง 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอน หรือประจุลบในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และโฮล หรือประจุบวกในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นจึงอาจแบ่งมอสทรานซิสเตอร์ตามชนิดของประจุพาหะที่ทำให้เกิดกระแสโดยพิจารณาที่ชนิดของประจุพาหะที่บริเวณช่องทางเดินกระแสในขณะที่เกิดกระแสได้เป็น 2 ชนิด คือ

- เอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ (n-channel) MOS transistor : NMOS)

ซึ่งหมายถึงมอสทรานซิสเตอร์ที่มีประจุลบหรืออิเล็กตรอน เป็นประจุพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสได้ ดังนั้น มอสทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ส่วนเดรน และส่วนซอส จึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N type Semiconductor)

- พี-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ (P-channel MOS transistor : PMOS)

ซึ่งหมายถึงมอสทรานซิสเตอร์ที่มีประจุบวกหรือโฮล เป็นประจุพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแสได้ ดังนั้น มอสทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ส่วนเดรนและส่วนซอสจึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type Semiconductor)

อย่างไรก็ตามในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสของมอสทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสกับสารกึ่งตัวนำส่วนเดรน และซอสอาจเป็นชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดกันก็ได้ ซึ่งแต่ละแบบจะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าในขณะใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีนิยามคำศัพท์เพื่อบอกประเภทของสารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสไว้ดังนี้

+ ดิพลีชัน (depletion) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับสารกึ่งตัวนำส่วนซอสและเดรน

+ เอ็นฮานซ์เมนต์ (enhancement) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกับสารกึ่งตัวนำส่วนซอสและเดรน

ฉะนั้นจึงอาจแบ่งมอสทรานซิสเตอร์ ตามลักษณะการควบคุมปริมาณประจุพาหะในช่องทางเดินกระแสได้เป็น 4 แบบคือ

1. เอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด มอสทรานซิสเตอร์ (n-channel enhancement mode MOS transistor) หมายถึง เอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ที่ในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสที่เกต มีสารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นชนิดพี ดังนั้นในขณะใช้งานจึงจำเป็นต้องเหนี่ยวนำให้สารกึ่งตัวนำชนิดพี บริเวณช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อน โดยการให้ศักดาที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกทเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง

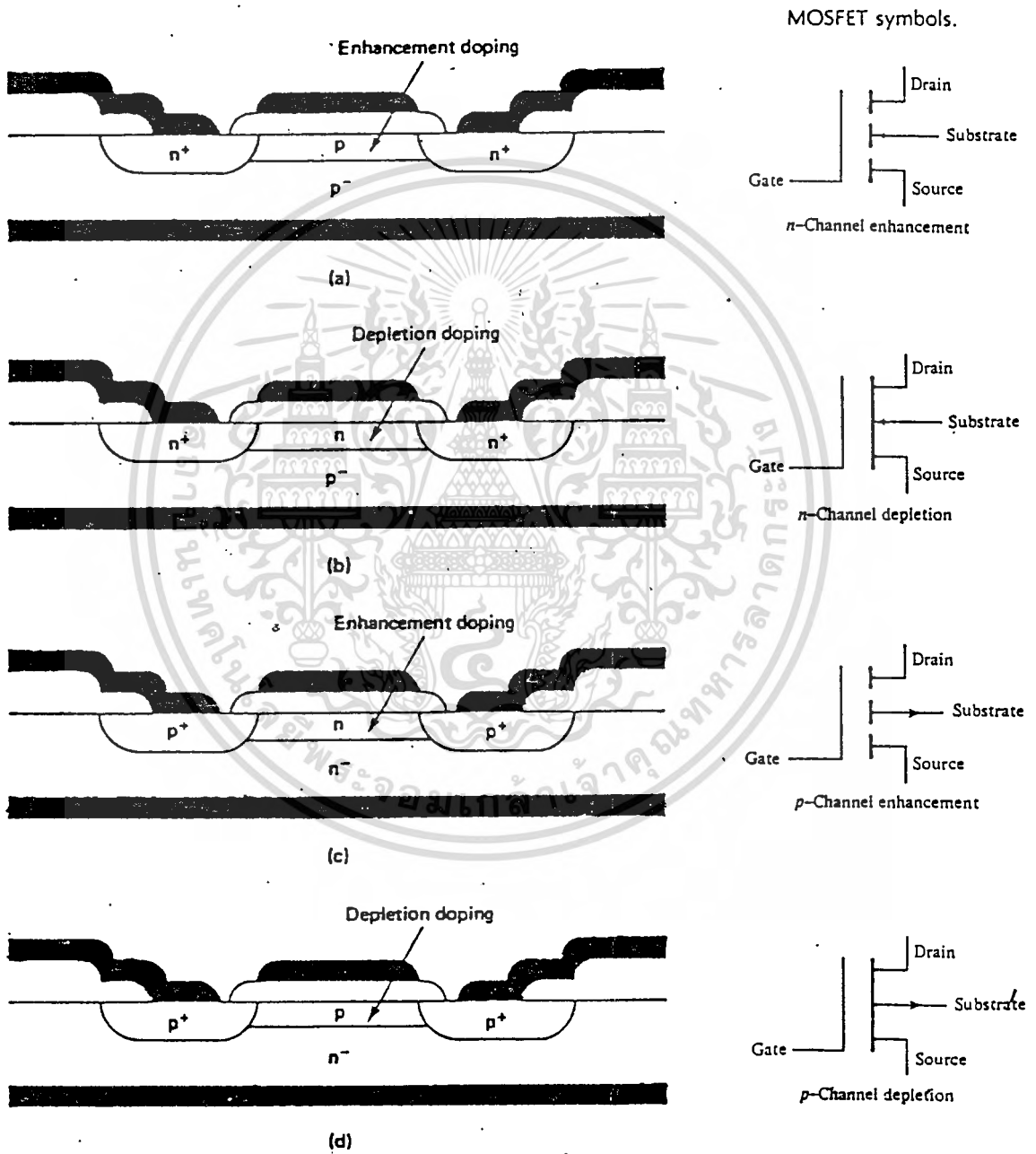
2. เอ็น-แชนแนล ดิฟฟิเคชัน โหมด มอสทรานซิสเตอร์ (n-channel depletion mode MOS transistor) หมายถึง เอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ที่ในสภาวะปกติก่อนให้ไบแอสที่เกท มีสารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นชนิดเอ็น ทำให้เกิดการเชื่อมต่อเนื้อสารกึ่งตัวนำระหว่างส่วนซอสกับส่วนเดรน อันเป็นผลให้เกิดกระแสดริฟท์ขึ้นทันที ที่มีความต่างศักราระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอส ในการควบคุมปริมาณกระแสดริฟท์นี้สามารถทำได้ทั้งในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสดริฟท์เพิ่มขึ้น โดยการให้ศักดาไฟฟ้าที่เกทเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง และในทางที่ทำให้ปริมาณกระแสดริฟท์ลดลง โดยการให้ศักดาไฟฟ้าที่เกทเป็นลบเมื่อเทียบกับฐานรอง

3. พี-แชนแนล เอ็นฮานซ์เม้นท์ โหมด มอสทรานซิสเตอร์ (p-channel enhancement mode MOS transistor) หมายถึง พี-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ที่ในสภาวะปกติก่อนให้ไบแอสที่เกท มีสารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นชนิดเอ็น ดังนั้นในขณะที่ใช้งานจึงควบคุมปริมาณกระแสให้ไหลมากขึ้นได้ โดยการให้ศักดาที่เกทเป็นลบเมื่อเทียบกับฐานรองเท่านั้น

4. พี-แชนแนล ดิฟฟิเคชัน โหมด มอสทรานซิสเตอร์ (p-channel depletion mode MOS transistor) หมายถึง พี-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ที่ในสภาวะปกติก่อนให้ไบแอสที่เกท มีสารกึ่งตัวนำในบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นชนิดพี ดังนั้นในการทำงานจะควบคุมปริมาณกระแสให้ไหลมากขึ้นได้ โดยการให้ศักดาไฟฟ้าที่เกทเป็นลบเมื่อเทียบกับฐานรอง หรือควบคุมให้ปริมาณกระแสดริฟท์ให้น้อยลง โดยการให้ศักดาไฟฟ้าที่เกทเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรองนั่นเอง

ลักษณะโครงสร้างทั่ว ๆ ไป และสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 แบบ แสดงได้ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งจะเห็นว่าสัญลักษณ์แต่ละแบบ จะบอกให้ทราบถึงลักษณะทางโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบนั้น ๆ ได้ด้วย เช่น ในลักษณะของดิฟฟิเคชัน โหมด จะเห็นว่าส่วนของเดรน ฐานรอง และซอส จะต้องขีดเส้นเติมต่อกัน ซึ่งหมายถึงสารกึ่งตัวนำในส่วนทั้ง 3 นั้นเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด หรือในลักษณะของเอ็นฮานซ์เม้นท์ โหมด จะเห็นว่าส่วนของเดรน ฐานรอง และซอส ขีดเป็นเส้นปะไม่ต่อกัน ซึ่งหมายถึงว่าส่วนทั้ง 3 นั้นแยกขาดจากกันทางไฟฟ้า นั่นคือส่วนของฐานรองจะเป็นสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกับส่วนซอสและส่วนเดรน อย่างไรก็ตามดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า มอสทรานซิสเตอร์ตัวเดียว ๆ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

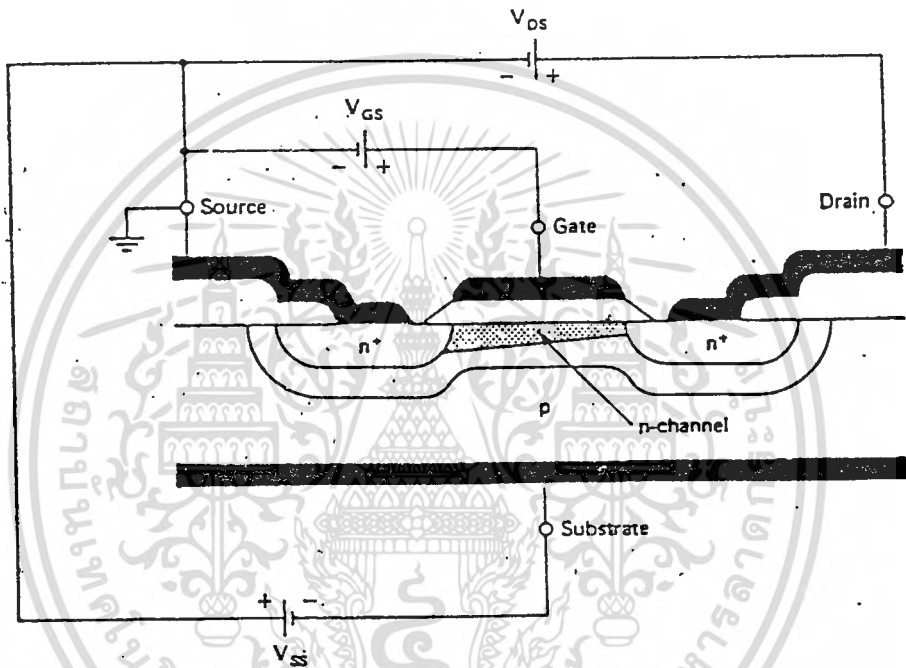
ทั่วไป ส่วนของซอสจะต่ออยู่กับฐานรอง ดังนั้นสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ตัวเดียว ๆ จึงมีเส้นกับ ลากเชื่อมต่อมาจากฐานรองมายังซอสเสมอ เป็นต้น



รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะ โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 แบบ [7]  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 หลักการให้ไบอัส

ในการที่จะทำให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพตามต้องการนั้น จำเป็นต้องให้ไบอัสกับส่วนต่าง ๆ อย่างเหมาะสม โดยคำนึงถึงหน้าที่หลักของแต่ละส่วนดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เช่น ส่วนซอสซึ่งถูกกำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายประจุพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแส แล้วประจุเหล่านี้จะเคลื่อนที่ผ่านช่องทางเดินกระแสไปยังส่วนเดรนออกไปสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก ทำให้เกิดเป็นกระแสเดรน-ซอส ;  $I_{DS}$ , ดังนั้นในการให้แรงดันไบอัสที่เหมาะสมระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอส



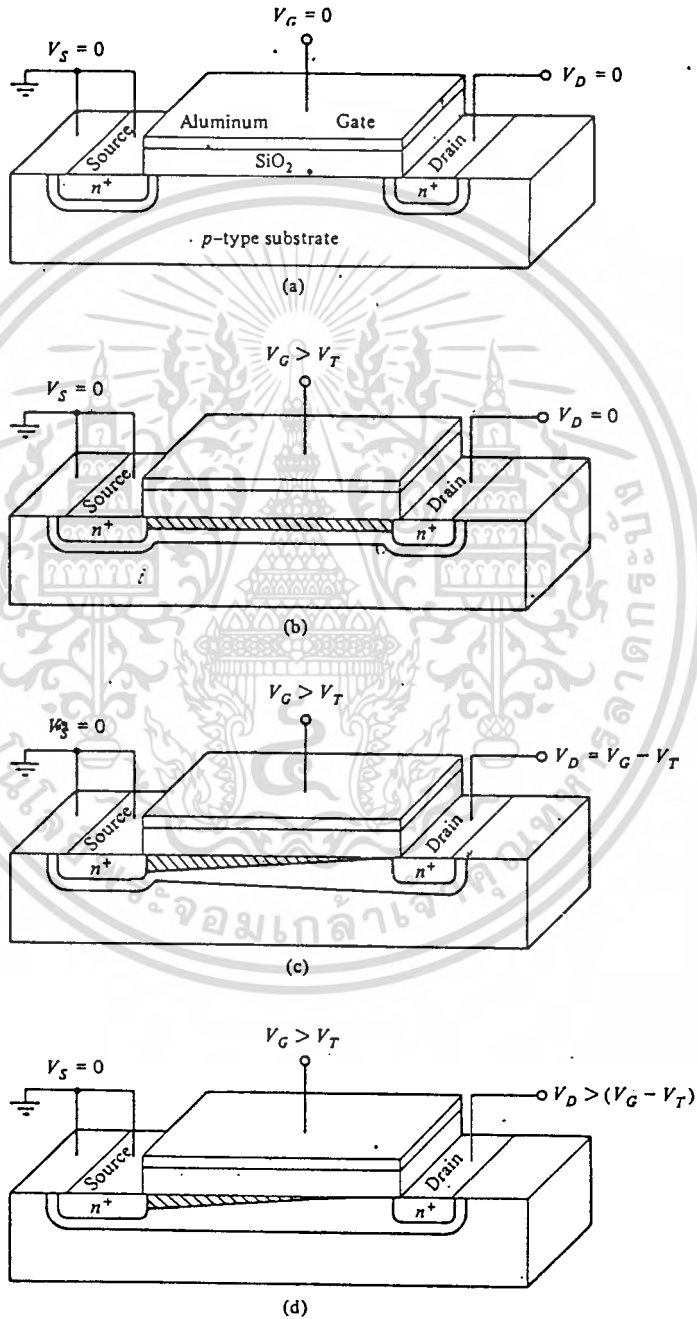
รูปที่ 1.3 แสดงการไบอัส n-channel MOSFET [7]

จึงหมายถึงการให้ศักดาไฟฟ้าแก่ส่วนซอสเมื่อเทียบกับส่วนเดรนแล้ว ส่วนซอสจะต้องเป็นแหล่งจ่ายประจุพาหะส่วนมากเสมอ เช่น ในกรณีของ เอ็น-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีอิเล็กตรอนหรือประจุลบ เป็นประจุพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแส ดังนั้นจะต้องให้ศักดาไฟฟ้าเป็นลบที่ส่วนซอส เมื่อเทียบกับส่วนเดรนเพื่อให้ส่วนซอสทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายอิเล็กตรอนนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 1.3 หรือในกรณีของ พี-แชนแนล มอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีโฮลหรือประจุบวกเป็นประจุพาหะส่วนมากที่ทำให้เกิดกระแส ก็จะต้องให้ศักดาไฟฟ้าเป็นบวกที่ส่วนซอสเมื่อเทียบกับส่วนเดรน สำหรับส่วนเกตจะต้องให้ศักดาไฟฟ้า (เมื่อเทียบกับฐานรอง) ในลักษณะที่สามารถควบคุมการเปิดหรือปิดช่องทางเดินกระแสได้ โดยใช้การพิจารณาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักเดียวกับการให้ศักดาไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) ทั่ว ๆ ไป เช่น ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1.3 เป็นเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด มอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งโดยปกติถ้าไม่มีศักดาไฟฟ้าให้ที่ส่วนเกทช่องทางเดินกระแสจะเปิดอยู่ ทำให้ส่วนเดรนกับส่วนซอสแยกออกจากกัน ดังนั้นจึงจะมีความต่างศักดาระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอสเกิดขึ้น กระแส  $I_{DS}$  ก็ไม่สามารถไหลได้ ในกรณีนี้จะต้องให้ศักดาไฟฟ้าที่ส่วนเกทเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง เพื่อทำให้เกิดการสะสมประจุลบในช่องทางเดินกระแส อันจะเป็นการควบคุมช่องทางเดินกระแส ให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมากหรือน้อยได้ตามต้องการ นั่นก็คือการควบคุมการ เปิด-ปิด ช่องทางเดินกระแสนั่นเอง หรือในกรณีของเอ็นแชนแนล ดิฟฟิวชัน โหมด มอสทรานซิสเตอร์ ซึ่ง โดยปกติขณะที่ไม่มีแรงดันไบอัสที่ส่วนเกท สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสจะมีสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอยู่แล้ว ทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอส ดังนั้นเมื่อมีความต่างศักดาระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอส เกิดขึ้นจะทำให้กระแส  $I_{DS}$  ไหลได้ทันที ฉะนั้น ในการควบคุมปริมาณกระแส  $I_{DS}$  ก็ทำได้ โดยการควบคุมความนำไฟฟ้าของช่องทางเดินกระแส นั้น โดยการให้แรงดันไบอัสส่วนเกท ในลักษณะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการสะสมประจุหรืออิเล็กตรอน เช่น ถ้าให้ส่วนเกทมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรอง จะทำให้เกิดการสะสมประจุลบที่ช่องทางเดินกระแสมากขึ้น เป็นผลให้ความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น กระแส  $I_{DS}$  ก็ไหลได้มากขึ้น แต่ถ้าให้ส่วนเกทมีศักดาไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับฐานรอง จะทำให้เกิดการสะสมประจุบวกที่ช่องทางเดินกระแส เป็นผลให้ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นบริเวณช่องทางเดินกระแสลดลง ดังนั้นกระแส  $I_{DS}$  ก็จะไหลได้น้อยลงด้วย ส่วนในกรณีของ PMOS ก็พิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน

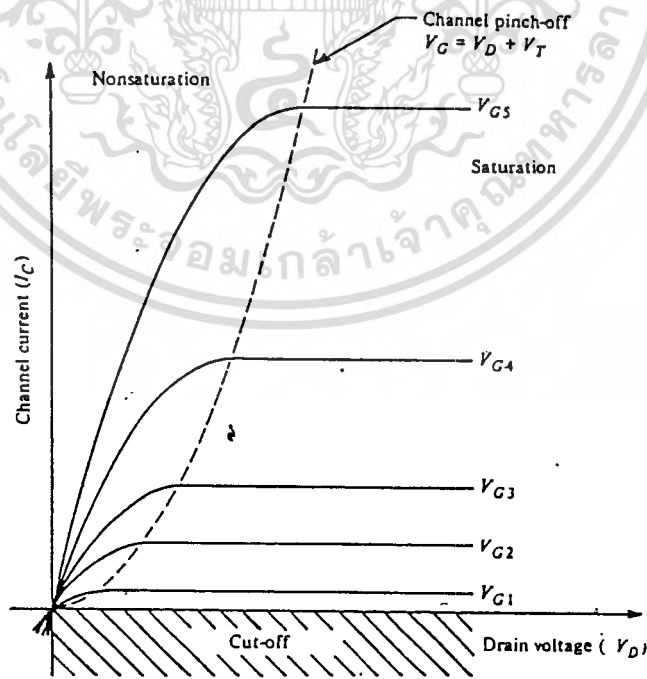
โดยหลักการที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการเตรียมพร้อมที่จะให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานตามที่ต้องการ ซึ่งกลไกการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายในของมันพอจะอธิบายได้ดังนี้ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของเอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด มอสทรานซิสเตอร์ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสที่เหมาะสม จะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (a) - (d) ซึ่งจะเห็นว่าในรูปที่ 1.4 (a) จะแสดงสภาพปกติของมอสทรานซิสเตอร์ที่กำลังพิจารณา ในขณะที่สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นชนิดพี ทำให้ส่วนเดรนกับส่วนซอสแยกออกจากกันทางไฟฟ้า ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีความต่างศักดาไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างเดรนกับซอส ประจุพาหะส่วนมากก็จะเคลื่อนจากซอสไปเดรนไม่ได้ นั่นคือกระแส  $I_{DS}$  เป็นศูนย์ ในรูป 1.4 (b) เมื่อให้ศักดาไฟฟ้าที่เกทมีค่ามากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage

; $V_T$ ) ของมันแล้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำประจุลบขึ้นที่ส่วนของฐานรองรับบริเวณผิวสัมผัสกับออกไซด์ส่วนแรก ทำให้สารกึ่งตัวนำบริเวณนั้นมีคุณสมบัติเหมือนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เชื่อมต่อระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอส ซึ่งเรียกลำนี้ว่าช่องทางเดินกระแส ให้สังเกตว่าตรงรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับชนิดพี จะมี



รูปที่ 1.4 (a) - (d) แสดงการไบอัสแบบต่าง ๆ ของเอ็นแชนแนลเอ็นอีพานซ์เมทัลโหมด [8]  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณหลอดประจุพาหะอยู่เสมอ (จากทฤษฎีของรอยต่อ พี-เอ็น) ในรูป 1.4 (c) ขณะที่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอร์สมีค่าเป็น  $(V_G - V_T)$  แล้ว แต่เนื่องจากส่วนซอร์สต่อเชื่อมสัมผัสทางไฟฟ้า (Short) อยู่กับฐานรอง ดังนั้นจึงเกิดการไบอัสย้อนกลับขึ้นระหว่างรอยต่อ พี-เอ็นที่ส่วนฐานรองรอบ ๆ ส่วนเดรน เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจำนวนประจุพาหะที่ช่องทางเดินกระแสบริเวณใกล้เคียง ๆ กับส่วนเดรน แต่เนื่องจากแรงดันไบอัส  $V_D$  พอดีเท่ากับแรงดัน  $(V_G - V_T)$  ที่ทำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ดังนั้นช่องทางเดินกระแสจึงยังคงเชื่อมต่อยู่นพืดกับส่วนเดรนเสมือนเป็นความต้านทานตัวหนึ่ง ฉะนั้นกระแส  $I_{DS}$  จึงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับค่าแรงดัน  $V_D$  ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง  $(V_G - V_T)$  ในรูปที่ 1.4 (d) เป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ส่วนเดรนมีค่ามากกว่าแรงดัน  $(V_G - V_T)$  ซึ่งจะทำให้ช่องทางเดินกระแสถูกแยกออกจากส่วนเดรน โดยสนามไฟฟ้าของรอยต่อ พี-เอ็น ที่เกิดจากการไบอัสย้อนกลับด้วยแรงดันไบอัส  $V_D$  นั้นเอง ในกรณีที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างส่วนเดรนกับซอร์ส ส่วนใหญ่จะปรากฏอยู่ที่รอยต่อ พี-เอ็น ดังนั้นถึงแม้จะเพิ่มแรงดัน  $V_D$  ให้มากขึ้นอีก แต่ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสก็ยังคงมีค่าประมาณเท่าเดิม ฉะนั้นกระแส  $I_{DS}$  จึงมีค่าประมาณคงที่ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_D$  ในขั้นตอนต่าง ๆ แสดงได้ดังในรูปที่ 1.5

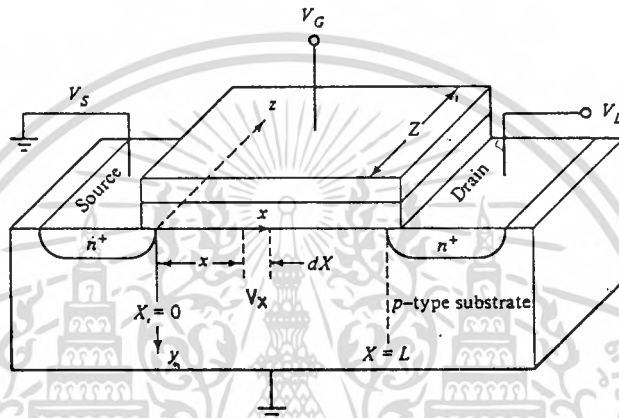


รูปที่ 1.5 แสดงกราฟ I-V characteristic ของเอ็นแชนแนลเอ็นพีเอ็มที่โหมด [๑]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์

การวิเคราะห์คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_D$  ของมอสทรานซิสเตอร์ ในที่นี้จะพิจารณาในกรณีของ เอ็น-แชนแนล เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด มอสทรานซิสเตอร์ เป็นแนวทางให้เท่านั้น ซึ่งจะสามารถใช้หลักการเดียวกันนี้ในการพิจารณามอสทรานซิสเตอร์แบบอื่นๆ ได้ด้วยดังนี้



รูปที่ 1.6 แสดงการไบอัสเอ็นแชนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด [๑]

จากรูปที่ 1.6 สมมติว่าให้แรงดันไบอัสระหว่าง เดรน-ซอส เป็น  $V_D$  และแรงดันไบอัสที่ส่วนเกตเป็น  $V_G$  ถ้าให้แรงดันที่จุด  $x$  บนแนวของแชนแนลมีค่าเป็น  $V(x)$  ซึ่งก็คือ แรงดันที่เปลี่ยนแปลงในแนวแกน  $x$  จากส่วนซอสคือ  $V_S$  ถึงส่วนเดรนคือ  $V_D$  มีค่าแรงดันเป็น  $I_D R$  เมื่อ  $R$  คือความต้านทานของช่องทางเดินกระแส ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่จุด  $x$  นี้ก็คือ  $V_G - V(x)$  และถ้าชั้นออกไซด์ที่หนา  $t_{ox}$  ซึ่งหนามากกว่าความลึกของช่องทางเดินกระแสมาก ๆ จะได้ว่าสนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ที่จุด  $x$  ก็คือ

$$\xi(x) = [V_G - V(x)]/t_{ox} \quad \text{V/m} \quad (1.1)$$

จากกฎของเกาส์ จะหาความหนาแน่นของประจุผิว (Surface charge;  $\rho_s$ ) ซึ่งถูกเหนี่ยวนำในช่องทางเดินกระแสที่จุด  $x$  ได้เป็น  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \rho_1(x) &= \epsilon \xi(x) && \text{c/m}^2 \\
 &= \epsilon_0 \epsilon_{ox} \xi(x) && \text{c/m}^2 \\
 \rho_1(x) &= (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) (V_G - V(x)) && \text{c/m}^2 \quad (1.2)
 \end{aligned}$$

โดยที่  $\epsilon_{ox}$  คือ Relative Permittivity ของชั้นออกไซด์มีค่าคงที่เป็น 4

อย่างไรก็ตามประจุที่เกิดขึ้นนี้จะยังไม่สามารถนำกระแสใน채นแนลได้ ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่แรงดัน  $V_G$  มีค่าน้อย ๆ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำฐานรอง จะเกิดบริเวณปลอดประจุพาหะขึ้นเท่านั้นยังไม่เกิดเป็นชั้นกลับ แต่ถ้าแรงดัน  $V_G$  มีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม  $V_T$  (ซึ่งนิยามว่าเป็นแรงดันที่ให้ที่ส่วนเกตตกคร่อมชั้นออกไซด์พอดีทำให้ความหนาแน่นของประจุในช่องทางเดินกระแสมีค่าเป็นศูนย์) แล้วจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับขึ้นได้ ซึ่งก็จะนำไฟฟ้าระหว่างส่วนเดรนกับส่วนซอสได้ทันที สมมติว่าความหนาแน่นของประจุพาหะที่เพิ่มขึ้นในช่องทางเดินกระแส ซึ่งเป็นชั้นกลับมีค่าเป็น  $\Delta n$  แล้ว ดังนั้นจะได้ว่า

$$\rho_1(x) = q\Delta n \quad \text{c/m}^2 \quad (1.3)$$

จากนิยามของ  $V_T$  จะได้ว่า

$$q\Delta n = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) [(V_G - V(x)) - V_T] \quad \text{เมื่อ } (V_G - V(x)) > V_T \quad (1.4)$$

และ

$$q\Delta n = 0 \quad \text{เมื่อ } (V_G - V(x)) < V_T \quad (1.5)$$

ถ้าให้  $G(x)$  แทนค่าความนำไฟฟ้า ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าของส่วนเล็ก ๆ ของช่องทางเดินกระแสซึ่งบางมาก ๆ ในช่วงความยาว  $dx$  และกว้าง  $w$  จะมีค่าเป็น

$$G(x) = \sigma(x) w/dx \quad (1.6)$$

โดยที่  $\sigma(x)$  คือความนำที่ผิวต่อหนึ่งตารางหน่วยของ채นแนล ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 G(x) &= q\Delta n \mu_0 w/dx \\
 &= (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) \mu_0 (w/dx) [(V_G - V(x)) - V_T] \quad (1.7)
 \end{aligned}$$

โดยที่  $\mu_0$  คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอนใน채นแนล

จากกฎของโอห์มจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{DS} = G(x) \cdot dV \quad (1.8)$$

โดยที่  $dV$  คือแรงดันที่ตกคร่อมส่วนเล็ก ๆ ในแกนแนลซึ่งยาว  $dx$  ดังนี้

$$I_{DS} = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) \mu_e (w/dx) [(V_G - V(x)) - V_T] dV \quad (1.9)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตตลอดแนวแก่งผลึกซึ่งยาว  $L$  และมีแรงดันตกคร่อมรวมทั้งหมดเป็น  $V_D$  และสมมติว่าความต้านทานที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นซึ่งเกิดที่ขั้วเดรนและซอสมีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นจะได้

$$\int_0^L I_{DS} dx = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) \mu_e w \int_0^{V_D} [(V_G - V(x)) - V_T] dV$$

$$I_{DS} \cdot L = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) \mu_e w [(V_G - V_T)(V_D - (V_D^2/2))]$$

หรือ

$$I_{DS} = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) \mu_e (w/L) [(V_G - V_T)(V_D - (V_D^2/2))] \quad (1.10)$$

สมการที่ (1.10) นี้เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_D$  ที่ค่าแรงดัน  $V_D \leq (V_G - V_T)$  อย่างไรก็ตามจากสมการที่ (1.10) นี้ สามารถนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในแต่ละกรณี ของการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ได้ดังนี้

- ในกรณีที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในเชิงเส้น (Linear or Triode region) โดยพิจารณาว่า แรงดัน  $V_D$  มีค่าน้อย ๆ หรือ  $(V_G - V_T) > V_D$  เพื่อให้เกิดช่องทางเดินกระแสเชื่อมต่อระหว่างส่วนซอสกับส่วนเดรน ดังนี้

$$(V_G - V_T) V_D \gg V_D^2/2 \quad (1.11)$$

ซึ่งจากสมการที่ (1.10) จะลดรูปลงได้เป็น

$$I_{DS} = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) \mu_e (w/L) [(V_G - V_T) V_D] \quad (1.12)$$

จากสมการที่ (1.12) นี้จะเห็นว่ากระแส  $I_{DS}$  แปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดัน  $V_D$  ที่  $V_G$  คงที่ค่าหนึ่ง ๆ

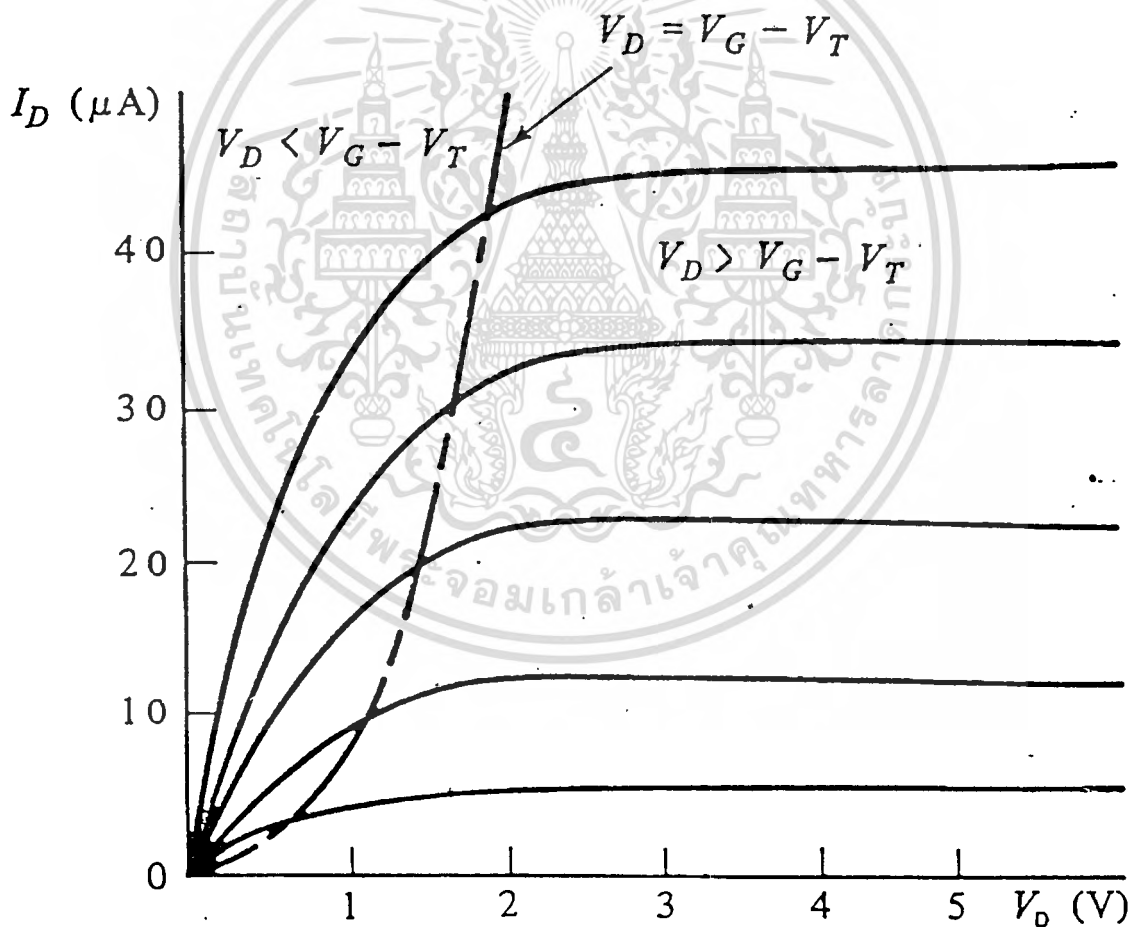
- ในกรณีที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation or Pentode region) โดยพิจารณาว่าแรงดัน  $V_D > (V_G - V_T)$  เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดบริเวณปลอดประจุพาหะที่ช่องทางเดินกระแสตรงส่วนที่อยู่ติดกับส่วนเดรน ดังนั้นกระแส  $I_{DS}$  จะมีปริมาณคงที่ตลอด แม้ว่าแรงดัน  $V_D$  จะเพิ่มขึ้นอีกก็ตาม ซึ่งกระแส  $I_{DS}$  ที่คงที่นี้จะเริ่มคงที่ตั้งแต่  $V_D = (V_G - V_T)$  ดังนั้นกระแส  $I_{DS}$  ที่คงที่ในช่วงอิ่มตัวนี้ จึงมีค่าเป็น

$$I_{DS(sat)} = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) \mu_e (w/L) [(V_G - V_T)(V_G - V_T) - ((V_G - V_T)^2 / 2)]$$

$$I_{DS(sat)} = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox}) \mu_e (w/L) [(V_G - V_T)^2 / 2] \quad (1.13)$$

จากสมการที่ (1.13) นี้จะเห็นว่ากระแส  $I_{DS(sat)}$  จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่าแรงดัน  $V_D$  โดยจะมีค่าคงที่ที่  $V_G$  ค่าหนึ่ง ๆ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_D$  ในขณะที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในแต่ละช่วง แสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_D$  [81]  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นที่น่าสังเกตจากสมการที่ (1.10) ว่า กระแส  $I_{DS}$  สามารถถูกควบคุมได้โดยโครงสร้างทางเรขาคณิต อันได้แก่ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $W$ ) , ความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) และความหนาของเกตออกไซด์ ( $t_{ox}$ ) นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมได้ในขณะทำการสร้างอีกด้วย โดยการควบคุมค่าของแรงดันขีดเริ่ม  $V_T$  ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

#### 1.4 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage; $V_T$ ) ในมอสทรานซิสเตอร์

จากนิยามของแรงดันขีดเริ่มในมอสทรานซิสเตอร์ หมายถึงแรงดันที่ให้เกิดแล้วพอที่จะทำให้ความหนาแน่นของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแสมีค่าเป็นศูนย์พอดี ดังนั้นในกรณีของ เอ็นฮานซ์เม้นท์ โหมด มอสทรานซิสเตอร์จึงหมายถึง แรงดัน  $V_G$  ที่ให้เกิดในขณะที่ทำให้ไบอัสแก่ส่วนเดรนและซอสอย่างเหมาะสม แล้วเกิดกระแส  $I_{DS}$  ไหลได้พอดี แต่ในกรณีของดีพลีชันโหมด มอสทรานซิสเตอร์ จะหมายถึงแรงดัน  $V_G$  ที่เกิดในขณะที่ทำให้ไบอัสอย่างเหมาะสมกับส่วนเดรนและซอส แล้วทำให้กระแส  $I_{DS}$  หยุดไหลพอดี

สำหรับการคำนวณหาค่า  $V_T$  ทำได้โดยใช้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_T = \pm V_{s1} \pm V_{ox} - V_{SS} + V_{WF} \quad (1.14)$$

โดยที่

$$V_{s1} = 2V_f = (2KT/q) \ln(N_{sub}/n_1) \quad (1.15)$$

$$n_1 = 3.9 \cdot 10^{16} T^{3/2} \exp(-1.21/2KT) \quad (1.16)$$

$$V_{ox} = Q_B/C_{ox} = (2\epsilon_0\epsilon_{s1}qN|2V_f|)^{1/2} / (\epsilon_0\epsilon_{ox}/t_{ox}) \quad (1.17)$$

$$V_{SS} = Q_{SS}/C_{ox} \quad (1.18)$$

หมายเหตุ

สำหรับ p-type Silicon Substrate ค่าของ  $V_{s1}$  และ  $V_{ox}$  จะมีเครื่องหมายเป็นบวก (+) ส่วน N-type Silicon Substrate ค่าของ  $V_{s1}$  และ  $V_{ox}$  จะมีเครื่องหมายเป็นลบ (-) สำหรับ  $V_{SS}$  จะมีเครื่องหมายเป็นลบ (-) เสมอ เพราะเกิดจากไอออนบวก เช่น  $Na^+$ ,  $H^+$  เป็นต้น ส่วนค่าของ  $Q_{SS}$  มักจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับระนาบของผลึกที่ใช้ ซึ่งค่าคงที่ที่นิยมใช้กันทั่วไปไม่มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในระนาบ <111>;  $Q_{SS} = 8.0 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$

ส่วน  $V_{WF}$  คือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (work function) ดังนั้นถ้าให้  $\phi_G$  เป็นฟังก์ชันงานของวัสดุส่วนที่เป็นเกต

และ  $\phi_{Si}$  เป็นฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำฐานรอง

จะได้ว่า

$$V_{WF} = (\phi_G - \phi_{Si})/q \quad (1.19)$$

โดยที่

$$\phi_{Si} = 3.25 + (E_g/2) \pm qV_f \text{ eV}$$

$$\phi_{\text{Aluminum}} = 3.2 \text{ eV}$$

$V_f$  จะมีเครื่องหมายเป็นบวก (+) เมื่อพิจารณาใน P-type Si Sub.

$V_f$  จะมีเครื่องหมายเป็นลบ (-) เมื่อพิจารณาใน N-type Si sub.

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ที่เหมาะสมลงในสมการที่ (1.14) ก็จะสามารถหาค่า  $V_T$  ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

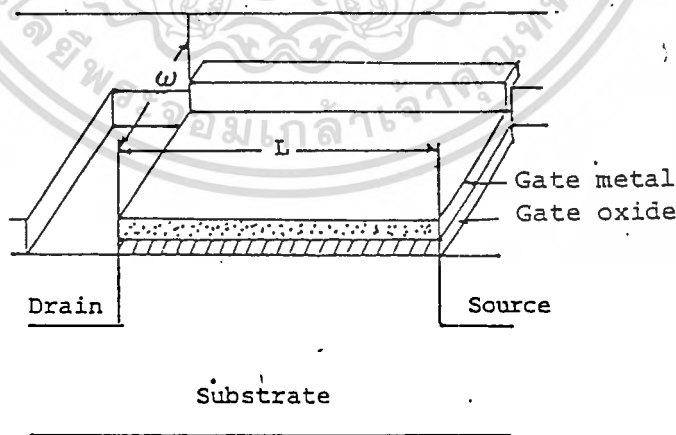
การพัฒนาโครงสร้าง MOS FET มาเป็น MOIS FET

2.1 บทนำ

จากบทที่ 1 ทำให้ทราบถึงโครงสร้าง ลักษณะการทำงาน และคุณสมบัติของมอสเฟตแล้ว จากโครงสร้างของมอสเฟตถ้าเราต้องการสร้างเพิ่มมอสเฟต เราจะต้องเลือกฐานรองซิลิกอนเป็นชนิดเอ็น ถ้าต้องการสร้างเอ็นมอสเฟตก็ต้องเลือกฐานรองซิลิกอนชนิดพี ซึ่งจะ เป็นข้อจำกัดในการสร้างมอสเฟต เพราะในการสร้างจะขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรองซิลิกอน ดังนั้นจากการศึกษาและทดลองสร้างทรานซิสเตอร์แบบมอสในลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะเปลี่ยนโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ไปสู่โครงสร้างแบบใหม่ที่มีการทำงานเหมือนกับมอสทรานซิสเตอร์ แต่มีข้อดีในเรื่องของการเลือกใช้ชนิดของฐานรองซิลิกอน ซึ่งทรานซิสเตอร์โครงสร้างใหม่นี้จะเรียกว่า มอยซ์ ทรานซิสเตอร์ (MOIS Transistor) หรือ มอยซ์เฟต (MOIS FET)

2.2 โครงสร้างของมอยซ์เฟต (MOIS FET Structure)

ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วนคือ ส่วนเดรน ส่วนซอส ส่วนเกต และฐานรองซิลิกอน ดังรูป 2.1

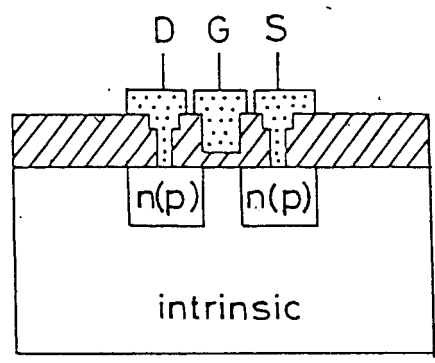


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์

โดยที่ส่วนเดรนและส่วนซอสจะต้องเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันคือชนิดเอ็นหรือชนิดพี และจะต้องต่างชนิดกันกับฐานรองซิลิกอน โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะใช้คุณสมบัติของรอยต่อ (junction) ที่เกิดขึ้นระหว่างสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันนั้น เป็นสัณฐานป้องกันการเคลื่อนที่ของประจุพาหะจากส่วนซอสไปยังส่วนเดรนโดยผ่านทางฐานรองซิลิกอนขณะใช้งาน

ในการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ เราจึงต้องคำนึงถึงชนิดของฐานรองซิลิกอนคือ ถ้าต้องการสร้างมอสทรานซิสเตอร์แบบ พี-แชนแนล ส่วนเดรนและซอสจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เราจะต้องเลือกใช้ฐานรองชนิดเอ็น หรือ ถ้าต้องการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นซึ่งส่วนเดรนและซอสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะต้องใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดพี ดังนั้นจะเห็นว่าในการสร้างมอสทรานซิสเตอร์นั้นจะถูกจำกัดด้วยชนิดของฐานรองซิลิกอน ในกรณีที่เรามีฐานรองซิลิกอนชนิดหนึ่งชนิดใดเราก็จะสามารถสร้างมอสทรานซิสเตอร์ได้เพียงชนิดเดียว แต่ถ้าเราต้องการสร้างทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ชนิดบนฐานรองซิลิกอนชนิดเดียว เราจะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ใหม่ จากลักษณะโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่ว่าส่วนเดรนและซอสจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน แต่จะต้องต่างชนิดกันกับฐานรองซิลิกอนนั้น ถ้าเราเลือกฐานรองซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นคือไม่เป็นทั้งชนิดพีหรือชนิดเอ็น เราก็สามารถสร้างมอสทรานซิสเตอร์ได้ทั้งชนิดพีแชนแนล และเอ็นแชนแนล โดยไม่ต้องคำนึงถึงชนิดของฐานรองซิลิกอนเลย

ฐานรองซิลิกอนที่เลือกนี้จะเลือกเป็นฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิก (i-type) และจากการศึกษาเรื่องการแพร่สารเจือระดับลึก (Deep Impurity) พบว่าเราสามารถเตรียมฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิกได้ โดยการเติมอะตอมของทองคำเข้าไปในฐานรองซิลิกอนซิลิกอนชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้ ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนนั้นมีสภาพความนำไฟฟ้าเสมือนสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกได้<sup>[1, 2]</sup>



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของมอสเฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิกด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ผลของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในฐานรองซิลิกอน

### 2.3.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมทองคำ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ (D) ในซิลิกอนกับอุณหภูมิ (T) แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งพบว่าเมื่อพิจารณาว่าอะตอมทองคำเป็นสารเจือระดับลึก จะมีสัมประสิทธิ์ การแพร่เป็นไปตามเส้นกราฟ Au (I) เช่นที่อุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  จะมี  $D = 9 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec.}$  เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณของอะตอมทองคำในซิลิกอนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิ การแพร่ของอะตอมทองคำ

การแพร่ของอะตอมทองคำจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial) ของซิลิกอนโดยไม่มีบอนด์ใด ๆ ยึดกับอะตอมของซิลิกอน ดังรูป 2.4 อัตราการแพร่ชนิดนี้จะเร็วกว่าอัตราการแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (Substitutional diffusion)

เมื่ออะตอมทองคำแพร่เข้าไปในซิลิกอนจะไปควบคุมช่วงอายุ และ พิกัดความต้านทาน (resistivity) ทั้งชนิด n และ p กล่าวคือจะทำให้อายุพาหะ (carrier lifetime) ของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p มีค่าลดลงเราจึงเรียกทองคำว่าเป็น Carrier life time killer ค่าโซลิดโซลูบิลิตี (solid solubility) ของทองคำในซิลิกอนจะมีค่าสูงสุดประมาณ  $10^{17}$  อะตอม/ลบ.ซม. แสดงดังรูป 2.5

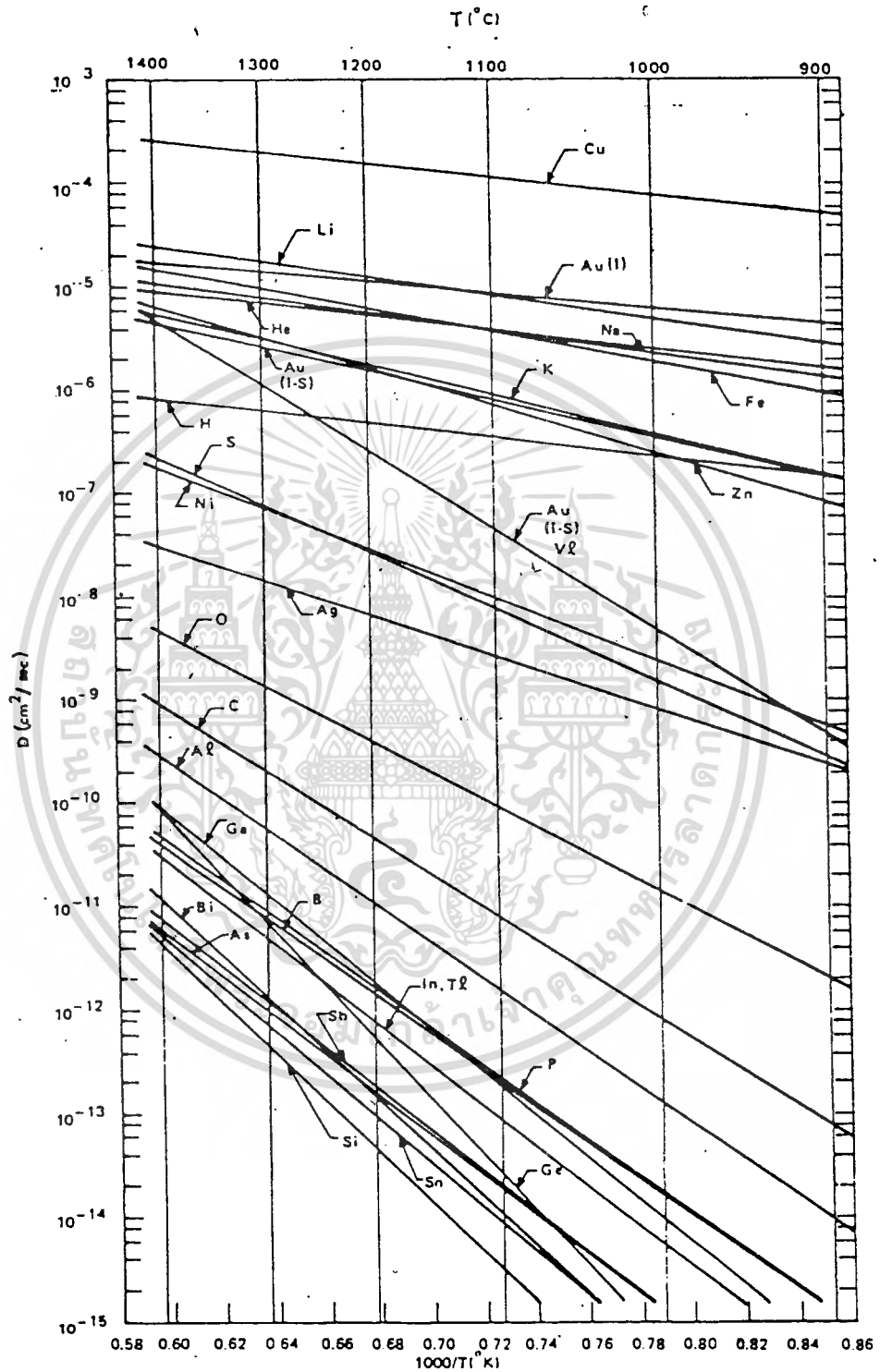
### 2.3.2 ลักษณะระดับพลังงานของทองคำในซิลิกอน

เมื่อเติมอะตอมทองคำลงในซิลิกอนจะเกิดระดับพลังงาน deep donor level โดยจะอยู่เหนือจากแถบวาเลนซ์ (valance band)  $0.35 \text{ eV.}$  และ เกิด acceptor level ใต้แถบความนำ (conduction band) ลงมา  $0.54 \text{ eV.}$  แสดงดังรูป 2.6

รูปที่ 2.7 แสดงระดับพลังงานของทองคำในซิลิกอนที่สภาวะต่าง ๆ กันคือ

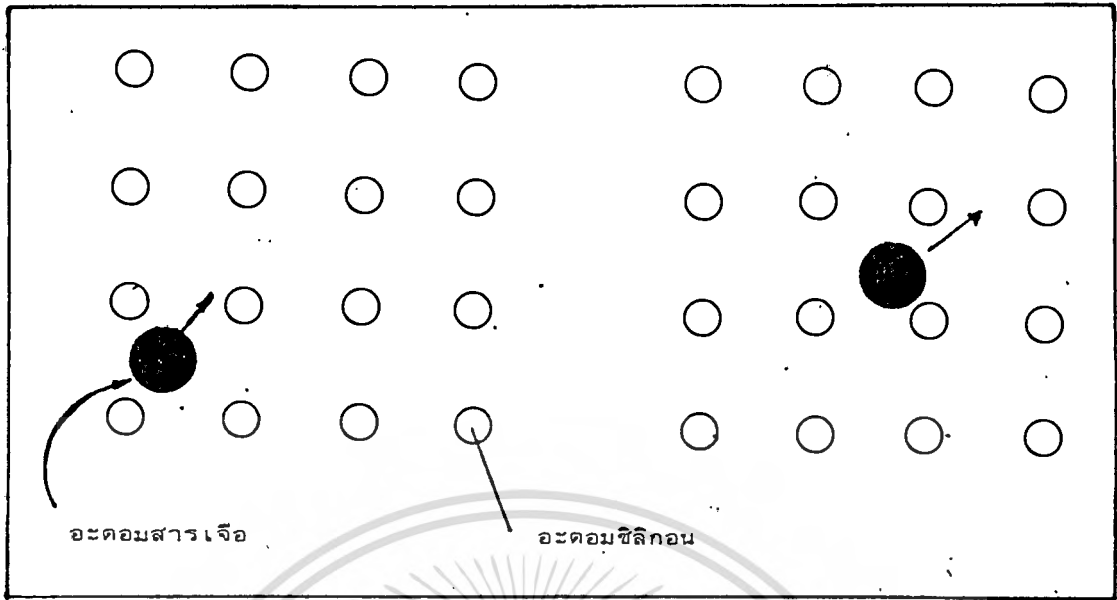
- เมื่อ ไม่เติมระดับพลังงานของสารเจือแบบตื้น (Shallow Impurity)
- เมื่อเติมระดับพลังงานของสารเจือแบบตื้นชนิดอื่น
- เมื่อเติมระดับพลังงานของสารเจือแบบตื้นชนิดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

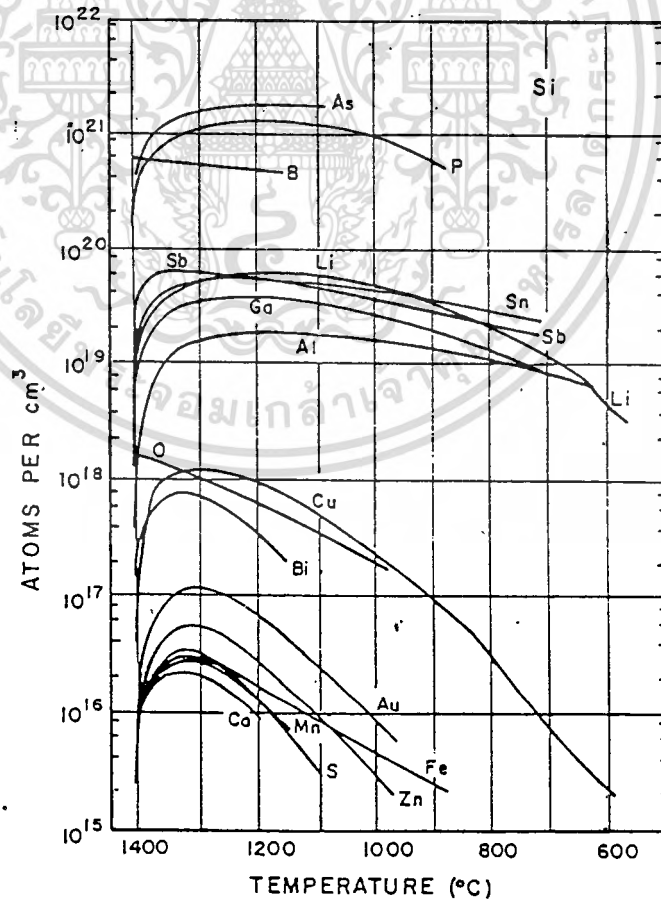


รูปที่ 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำในซิลิกอน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

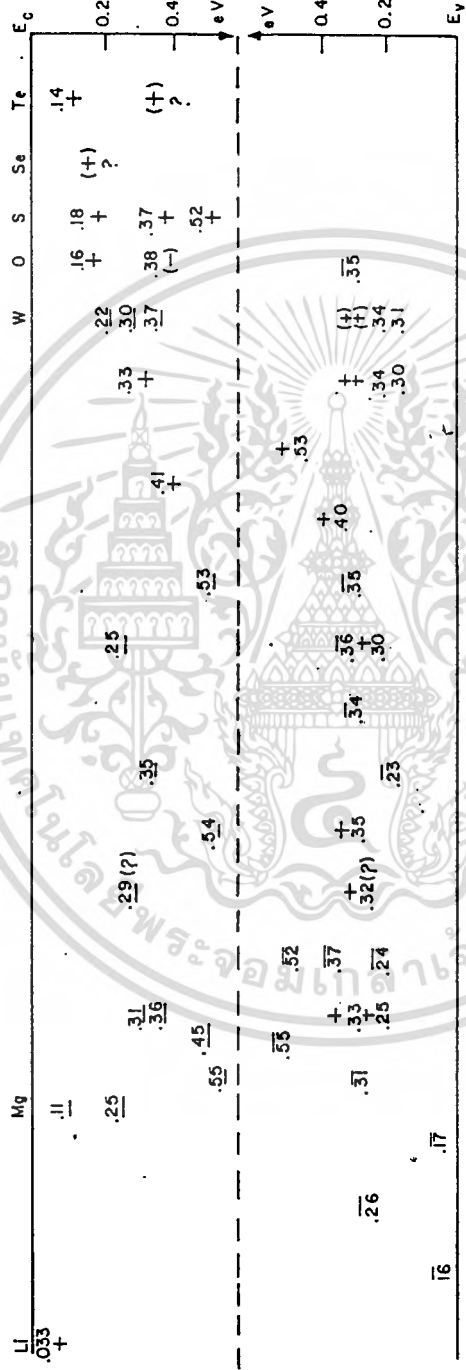


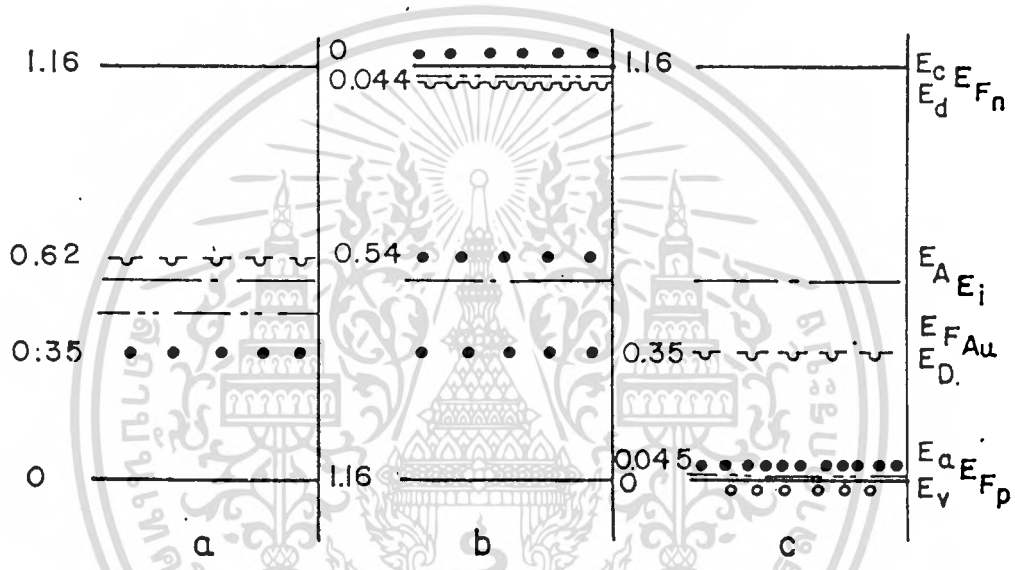
รูปที่ 2.4 แสดงการแพร่ของอะตอมทองคำเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิกอน



รูปที่ 2.5 แสดงค่า Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.7 แสดงไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ<sup>[10]</sup> เมื่อ

- ไม่เติมอะตอมสารเจือ
- เติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นซึ่งสมมติให้มีค่ามากกว่าอะตอมทองคำ
- เติมอะตอมสารเจือชนิดพีซึ่งสมมติให้มีค่ามากกว่าอะตอมทองคำ

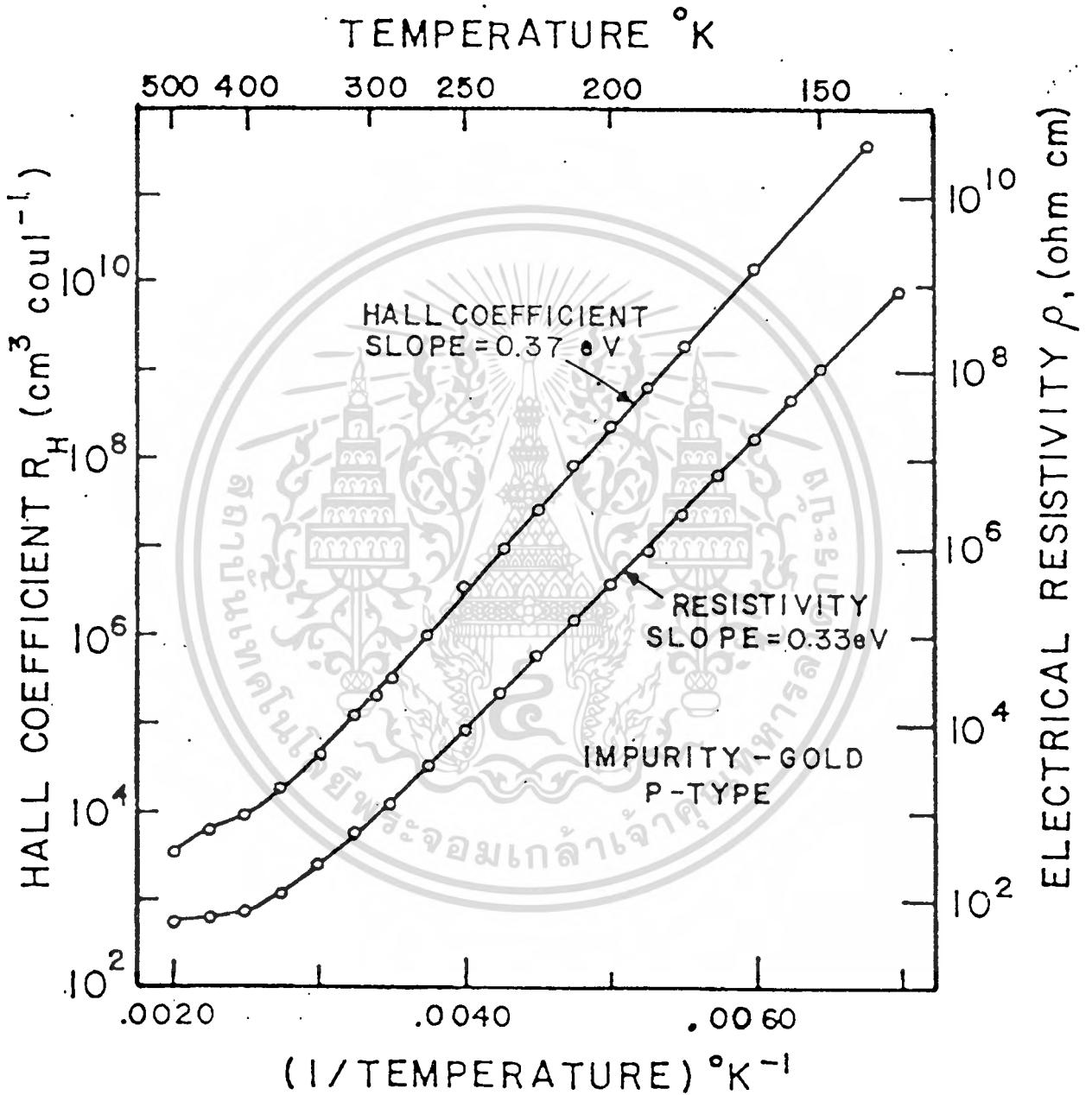
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ

สัมประสิทธิ์ของฮอลล์และค่าพิกัดความต้านทานของซิลิกอนชนิด p ซึ่งถูกแพร่ด้วยทองคำจะเป็นสัดส่วนกลับของอุณหภูมิดังแสดงในรูป 2.8

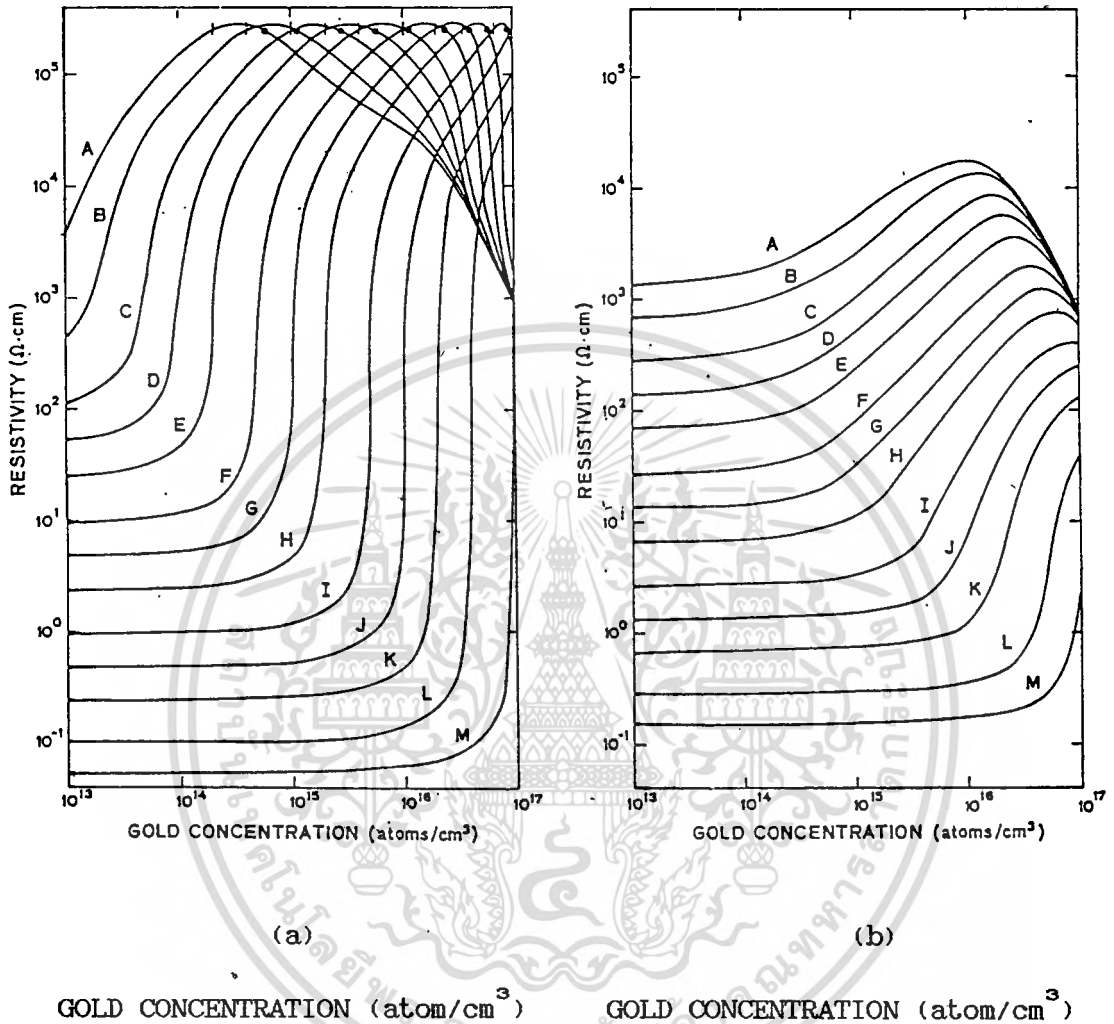
ในซิลิกอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยทองคำจะทำให้โอเลคตรอนที่อยู่ในแถบความนำตกลงมาในระดับพลังงานลึก (deep acceptor level) ซึ่งอยู่ห่างจากใต้แถบความนำประมาณ  $0.54 \pm 0.02$  eV. หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือโอเลคตรอนในแถบความนำจะถูกจับ (trap) ด้วย acceptor level คือเกิดปรากฏการณ์ชดเชย (Compensation) ทำให้จำนวนโอเลคตรอนดังกล่าวลดลงค่าพิกัดความต้านทานจึงเพิ่มขึ้นและช่วยอายุ (lifetime) ของพาหะจะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมของทองคำให้มากขึ้นจะทำให้ deep acceptor level มีจำนวนมากพอที่จะจับโอเลคตรอนอิสระในแถบความนำได้เกือบหมดค่าพิกัดความต้านทานจะมีค่าสูงขึ้นจนกลายเป็นอินทรินซิก (intrinsic type) และเมื่อเพิ่มปริมาณของทองคำขึ้นอีกจะทำให้ค่าพิกัดความต้านทานลดลงซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็น p-type โดยมีพาหะอิสระส่วนใหญ่เป็น โฮล

สำหรับซิลิกอนชนิดพี เมื่อเติมอะตอมของทองคำลงไปจะเกิดระดับพลังงานที่เรียกว่า deep donor level ห่างจากแถบวาเลนซ์ประมาณ  $0.35 \pm 0.02$  eV. ซึ่งอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ (fermi level) ดังนั้นโอเลคตรอนจาก deep donor level จะตกลงมายังระดับพลังงานที่ต่ำกว่าในแถบวาเลนซ์ซึ่งจะรวมตัวกับ โฮล ทำให้จำนวน โฮลลดลง ค่าพิกัดความต้านทานจึงมีค่าสูงขึ้น ถ้าเพิ่มปริมาณอะตอมของทองคำจนกระทั่ง โฮล ในแถบวาเลนซ์รวมตัวกับโอเลคตรอนเกือบหมด จะทำให้ค่าพิกัดความต้านทานสูงจนกลายเป็นอินทรินซิก และถ้ายังเพิ่มอะตอมทองคำขึ้นอีกค่าพิกัดความต้านทานจะลดลงซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็น n-type ดังนั้นจะเห็นว่าระดับพลังงาน deep donor level นี้ทำหน้าที่คล้ายกับการจับ โฮล (hole trapping) ในแถบวาเลนซ์ได้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสกับความหนาแน่นของอะตอมทองคำในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และพี แสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และนิกัดความต้านทาน  
ของซิลิกอนชนิดพี เมื่ออุณหภูมิของการแพร่ทองคำเปลี่ยนแปลงไป<sup>[10]</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานและความหนาแน่นของอะตอมทองคำ

ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลวิน ในสารกึ่งตัวนำ (a) ชนิดเอ็น (b) ชนิดพี [10]

เมื่อความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี (หน่วย cm<sup>-3</sup>) มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

A = 1*10 <sup>13</sup>	B = 2*10 <sup>13</sup>	C = 5*10 <sup>13</sup>	D = 1*10 <sup>14</sup>	E = 2*10 <sup>14</sup>
F = 5*10 <sup>14</sup>	G = 1*10 <sup>15</sup>	H = 2*10 <sup>15</sup>	I = 5*10 <sup>15</sup>	J = 1*10 <sup>16</sup>
K = 2*10 <sup>16</sup>	L = 5*10 <sup>16</sup>	M = 1*10 <sup>17</sup>		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 ทองคำเป็นตัวควบคุม life time

ทองคำจะแสดงคุณสมบัติเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ของพาหะส่วนน้อยในซิลิกอนชนิดเอ็น และ พี ดังรูป 2.7 ในซิลิกอนชนิดเอ็นที่มี  $N_D \gg N_{Au}$  จะทำให้ระดับพลังงานของทองคำมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มกลายเป็น acceptor ชนิดพีที่มีประจุลบ ( $N_{Au}^-$ ) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น hole trapping คือจับกับโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยทำให้  $\tau_p$  ลดลง ขณะที่มีการจับโฮลอาจมีอิเล็กตรอนจากแถบความนำเคลื่อนลงมายัง recombination center

สำหรับซิลิกอนชนิด p ที่มี  $N_A \gg N_{Au}$  deep donor level จะจับโฮลกลายเป็น donor ชนิดเอ็นที่มีประจุบวก ( $N_{Au}^+$ ) และจะสามารถจับ หรือแทรกกับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยทำให้  $\tau_n$  มีค่าลดลง

ค่า lifetime ของพาหะส่วนน้อยแสดงได้โดย

$$\tau_{\infty} = 1/\sigma_{j0} V_j N \quad (2.1)$$

โดยที่  $\tau_{\infty}$  = ช่วงอายุ (lifetime) (sec.)

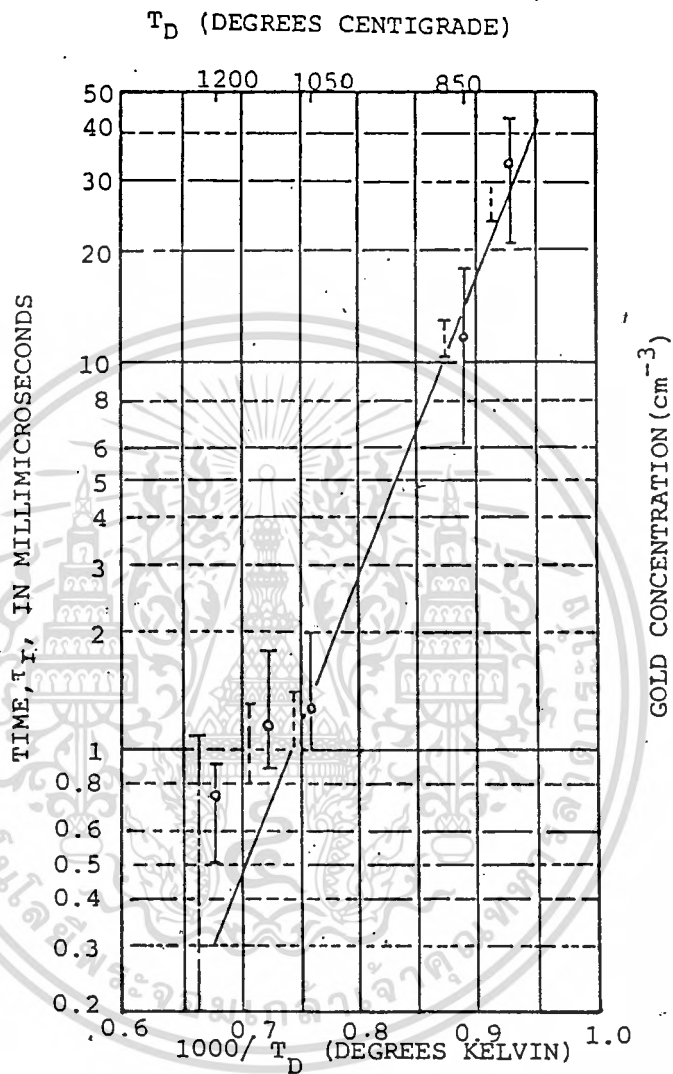
$\sigma_{j0}$  = capture cross-section ( $\text{cm}^2$ )

$V_j$  = ความเร็วเนื่องจากอุณหภูมิของพาหะ (thermal velocity) ( $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

$N$  = ความหนาแน่นของ trapping center ( $\text{cm}^{-3}$ )

ค่า capture cross section และ thermal velocity ของพาหะที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลวิน จะอยู่ในช่วง  $10^{-14}$  -  $10^{-16}$   $\text{cm}^2$  และ  $10^7$   $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$  ตามลำดับ

ค่า lifetime หลังจากการแพร่อะตอมทองคำจะเป็นส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ ดังรูป 2.10 นั่นคือค่า lifetime จะลดลงเมื่อปริมาณของอะตอมทองคำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ lifetime เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำเปลี่ยนแปลงไป [10]

### 2.3.5 มอซึททรานซิสเตอร์ (MOIS Transistor)

หลังจากที่เราได้ฐานรองซิลิกอนที่เป็นชนิดอินทรินซิก (i-type) แล้วเราก็สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบมอสได้ ทั้งชนิดพี-แชนแนล และเอ็นแชนแนล บนฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรินซิก ซึ่งเราจะเรียกทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างใหม่นี้ตามลักษณะของโครงสร้างว่า Metal Oxide Intrinsic Semiconductor Transistor หรือเรียกย่อ ๆ ว่า MOIS Transistor หรือ มอซึททรานซิสเตอร์<sup>[3]</sup> ซึ่งมอซึททรานซิสเตอร์นี้ ก็จะมีการทำงานและคุณสมบัติเหมือนกับมอสทรานซิสเตอร์ ดังนั้นการพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของมอซึททรานซิสเตอร์ จึงอ้างอิงจากสมการทั่ว ๆ ไปของทรานซิสเตอร์แบบ MOS โดยจะมีพารามิเตอร์บางตัวที่เปลี่ยนไป

#### 2.3.5.1 ทรานซิสเตอร์แบบมอซึท (MOIS) ชนิดพี-แชนแนล

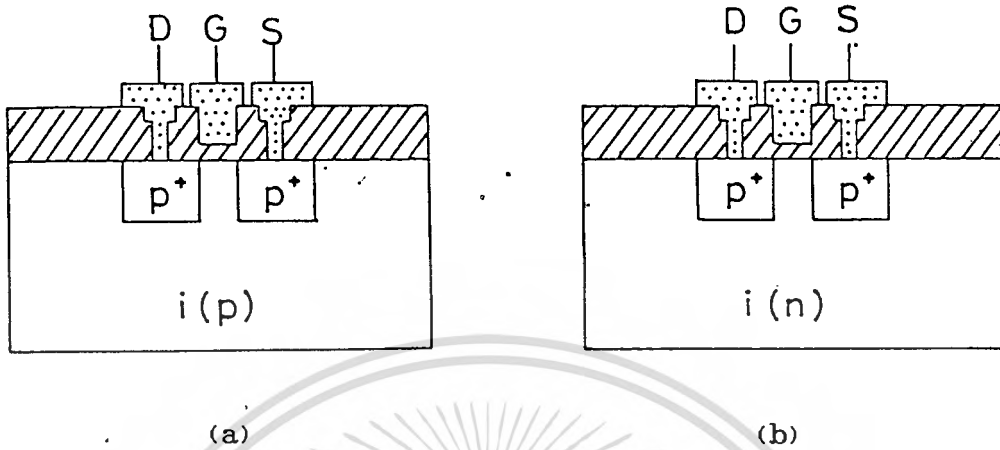
ทรานซิสเตอร์แบบมอซึท ชนิดพี-แชนแนล จะมีลักษณะโครงสร้างทั่ว ๆ ไป ประกอบด้วยส่วนเดรนและซอสซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ส่วนเกต และส่วนฐานรองซิลิกอนที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก เนื่องจากฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรินซิกนั้น สามารถสร้างมาจากฐานรองซิลิกอนเดิมที่เป็นชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ โดยการแพร่ระดมของทองคำเข้าไปในฐานรองซิลิกอน ดังนั้น ทรานซิสเตอร์แบบมอซึท ชนิดพี-แชนแนล จึงมีลักษณะโครงสร้างได้ 2 แบบ คือ

1. ฝังมอซึททรานซิสเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพี ที่ถูกแพร่ระดมของทองคำเข้าไปในฐานรองซิลิกอนนั้น
2. ฝังมอซึททรานซิสเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น ที่ถูกแพร่ระดมของทองคำเข้าไปในฐานรองซิลิกอนนั้น

โครงสร้างของฝังมอซึททรานซิสเตอร์ทั้ง 2 แบบ แสดงดังรูป 2.11

ลักษณะการให้ไบอัสกับส่วนต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ทำได้โดยการไบอัสแรงดันที่เกตเป็นลบ เพื่อเหนี่ยวนำประจุบวกหรือโฮลให้สะสมที่บริเวณช่องทางเดินกระแส และให้แรงดันไบอัสเดรนเมื่อเทียบกับซอสเป็นลบ โดยที่ซอสเป็นกราวด์ ทรานซิสเตอร์แบบฝังมอซึทที่สร้างได้นี้จะมีลักษณะการทำงานแบบเอ็นฮานซ์ เมนทึโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของเฟรมออยซ์ทรานซิสเตอร์

- (a) ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพีที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำ  
 (b) ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำ

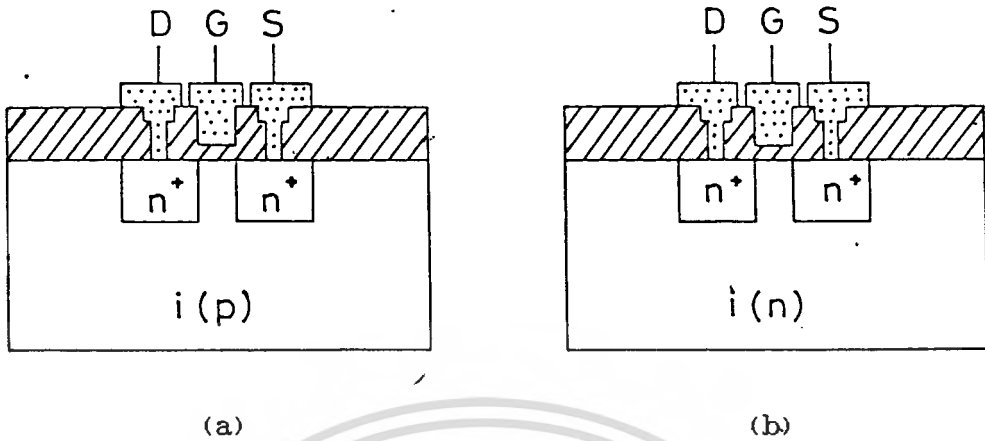
#### 2.3.5.2 ทรานซิสเตอร์แบบมอยซ์ (MOIS) ชนิดเอ็น-แท่นแนล

ทรานซิสเตอร์แบบมอยซ์ ชนิดเอ็น-แท่นแนล จะมีลักษณะโครงสร้างทั่ว ๆ ไปประกอบ ด้วยส่วนต่าง ๆ 4 ส่วน คือ เดรน ซ่อส เกท และฐานรองซิลิกอน ซึ่งฐานรองซิลิกอนจะเป็นสารกึ่งตัว นำชนิดอินทรีนซิค เนื่องจากเราสามารถสร้างมอยซ์ทรานซิสเตอร์บนฐานรองซิลิกอนอินทรีนซิค ที่สร้างมา จากฐานรองซิลิกอนเดิมที่เป็นชนิดเอ็น หรือชนิดพี ได้เช่นกัน ดังนั้น ทรานซิสเตอร์แบบมอยซ์ ชนิดเอ็น- แท่นแนล จึงมีลักษณะโครงสร้างได้ 2 แบบ คือ

1. เอ็นมอยซ์ทรานซิสเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพี ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำเข้าไปใน ฐานรองซิลิกอนนั้น
2. เอ็นมอยซ์ทรานซิสเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำเข้าไป ในฐานรองซิลิกอนนั้น

โครงสร้างของเอ็นมอยซ์ทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 แบบ แสดงดังรูป 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของเอ็นเมอซท์ทรานซิสเตอร์

- (a) ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพีที่ถูกแพรวด้วยอะตอมของทองคำ  
 (b) ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นที่ถูกแพรวด้วยอะตอมของทองคำ

ลักษณะการให้ไบอัสกับส่วนต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ ทำได้โดยการไบอัสแรงดันที่เกตเป็นบวก เพื่อเหนี่ยวนำประจุลบหรืออิเล็กตรอนให้สะสมที่บริเวณช่องทางเดินกระแส และให้แรงดันไบอัสเดรนเมื่อเทียบกับซอสเป็นบวก โดยที่ซอสเป็นกราวด์

#### 2.4 การเลือกชนิดของฐานรองซิลิกอน

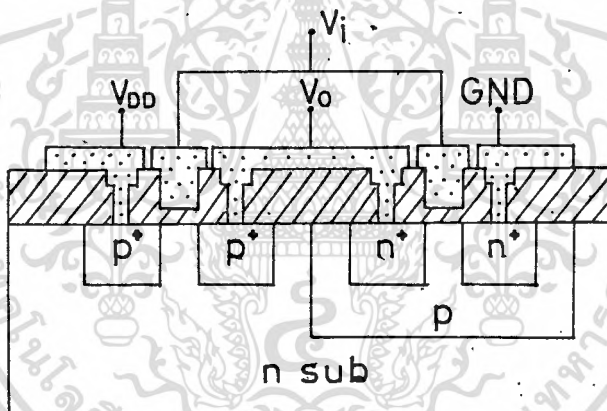
จากโครงสร้างของมอซท์เฟต นั้น ทั้งพีมอซท์และเอ็นเมอซท์สามารถสร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิคที่มีฐานรองซิลิกอนเดิมเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้ ดังนั้นในการสร้างมอซท์เฟตเราสามารถเริ่มสร้างจากฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นหรือชนิดพีก็ได้ ซึ่งเราจะไม่ต้องคำนึงถึงชนิดของฐานรองซิลิกอนเลยถ้าเราหาขบวนการสร้างที่เหมาะสมสำหรับฐานรองซิลิกอนแต่ละชนิดได้

จากทฤษฎีการรวมตัวชดเชยของทองคำกับประจุพาหะอื่นเนื่องมาจากอะตอมของสารเจือที่มีอยู่ก่อนทำให้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนนั้นมีสภาพความนำทางไฟฟ้า เสมือนสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิคนั้น พบว่าการรวมตัวชดเชยของทองคำกับบิเลคตรอนจะดีกว่าการรวมตัวชดเชยของทองคำกับโฮล อันเนื่องมาจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมของทองคำจะแพร่ไป เล็ดรอนได้ดีกว่า ไฮลิจจึงทำให้ฐานรองซิลิกอนเกิดเป็นอินทรินซิกที่ดี ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปสร้างมอซาร์ทานซิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่า

## 2.5 การพัฒนาโครงสร้าง MOIS FET ไปเป็น CMOIS

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทผลของสนามไฟฟ้าชนิด MOS นั้นเราสามารถให้โครงสร้างที่มีการทำงานร่วมกันของเอ็นเมอสเฟตและพีเมอสเฟต ซึ่งเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า CMOS มาสร้างเป็นวงจรรวมโดยที่ส่วนของเอ็นเมอสและพีเมอสจะแยกจากกันโดยส่วนแยกที่เรียกว่าบ่อแยก (well) ดังรูป 2.13 วงจรรวมที่สร้างโดยใช้โครงสร้าง CMOS นี้จะมีประสิทธิภาพในการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีกว่าวงจรรวมแบบพีเมอส และวงจรรวมแบบเอ็นเมอส



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของ CMOS

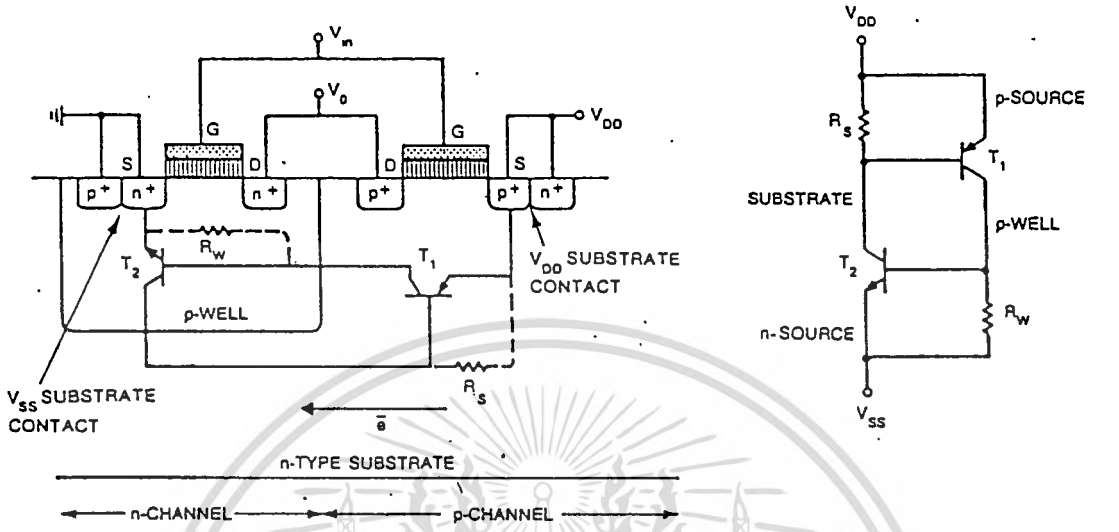
ในการสร้าง CMOS ด้วยขบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนเพื่อสร้าง double diffusion layer นั้นมักจะพบปัญหายุ่งยากในการควบคุมการแพร่อะตอมสารเจือ เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอสไม่ให้ทะลุผ่านบ่อแยกไปยังฐานรองซิลิกอน นอกจากนี้โครงสร้างของ CMOS ยังพบกับการเกิดปัญหา Latch up ระหว่างเอ็นเมอสและพีเมอสอีกด้วย ดังรูป 2.14

ในโครงสร้างแบบอื่น ๆ ที่นำมาสร้างวงจรรวมเช่น Silicon On Sapphire (SOS) นั้นจะแก้ปัญหาเรื่อง Latch up ได้แต่จะมีขั้นตอนในการสร้างยุ่งยากและมีราคาแพง โครงสร้างแบบ MIS นั้นก็จะเกิดปัญหาของการสร้างชั้นออกไซด์บางได้ชั้น โพลีซิลิกอนเพื่อเป็นส่วนเดรนและส่วนซอสของ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

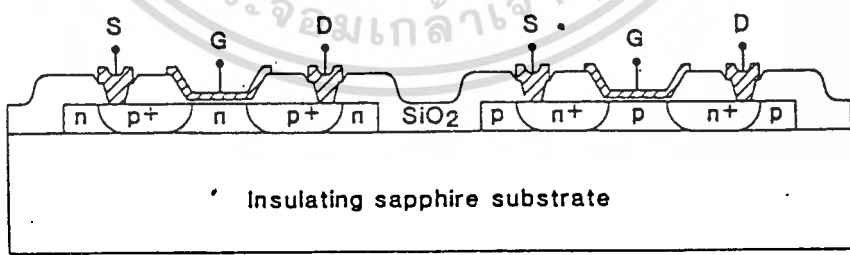
เอ็มเอสและพีเอส ซึ่งทำให้กระบวนการสร้างต้องมีขั้นตอนเพิ่มขึ้นและต้องมีความพิถีพิถันในการสร้างมาก

เช่นด้วย



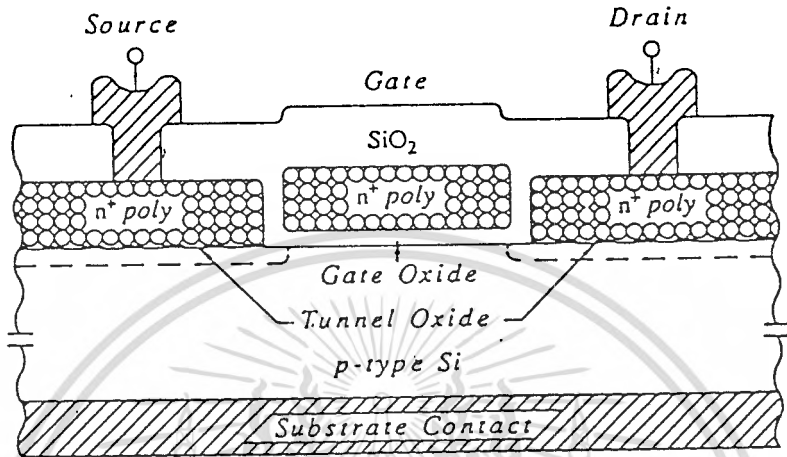
(a) Cross Section (b) Equivalent Circuit For Parasitic Tr.

รูปที่ 2.14 แสดงการเกิด latch-up ใน CMOS [11]



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของ SOS MOS

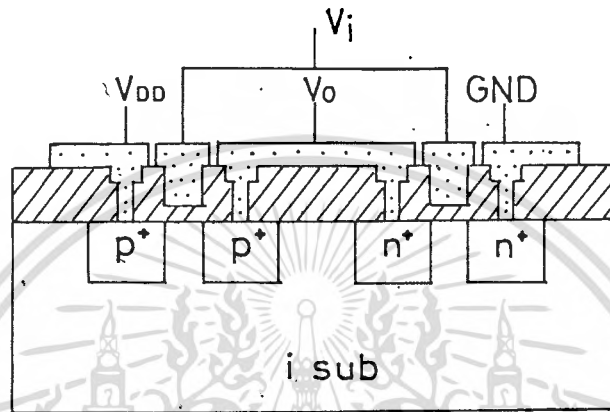
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของ MIS

จากการศึกษาและทดลองสร้างมอยซ์เฟต ตัวเดียว ๆ ทำให้เราสามารถสร้างมอยซ์เฟต ทั้งชนิดพี-แชนแนล และเอ็นแชนแนล บนฐานรองซิลิกอนชนิดเดียวกันได้ ฐานรองซิลิกอนที่ใช้เป็นฐานรอง ซิลิกอนชนิดอินทรินซิก ที่สามารถเตรียมมาจากฐานรองซิลิกอนซิลิกอน เริ่มต้นได้ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี โดยการเติมอะตอมของทองคำเข้าไป และจากการศึกษาเรื่องการแพร่อะตอมสารเจือระดับลึก เช่น ทองคำ จะพบว่าการเกิดการรวมตัวซัดเซย์กับประจุพาหะอื่นเนื่องจากอะตอมสารเจือที่มีอยู่เดิมนั้นอะตอมของทองคำจะแพร่โอเลคตรอนได้ดีกว่าไฮโดรเจนทำให้เกิดเป็นอินทรินซิกที่ดีกว่า ดังนั้นการใช้ฐานรองซิลิกอนเดิม ชนิดเอ็นมาทำเป็นฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรินซิก เมื่อนำไปสร้างเอ็นมอยซ์ และพีมอยซ์จะให้คุณสมบัติทาง ไฟฟ้าที่ดีกว่า ส่วนฐานรองซิลิกอนเดิมที่เป็นชนิดพีนั้น ถ้าเราหาขบวนการสร้างที่เหมาะสมควบคุมการแพร่ อะตอมของทองคำให้พอเหมาะ ก็จะสามารถนำมาใช้สร้างเอ็นมอยซ์ และพีมอยซ์ให้มีคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าที่ดีได้เช่นกัน การสร้างวงจรรวมที่มีการทำงานของมอยซ์เฟตทั้งชนิดเอ็นมอยซ์และพีมอยซ์ร่วมกัน เรียกว่าวงจรรวมแบบคอมพลีเม้นทารีมอยซ์ หรือ CMOIS<sup>[4]</sup> ซึ่งวงจรรวมแบบนี้จะมีข้อดีคือสร้างได้ง่ายกว่า แบบ CMOS คือไม่ต้องสร้างบ่อแยกและยังไม่มีปัญหา Latch up ในระหว่างที่วงจรทำงานด้วย นอก นอกจากนั้นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนี้ระยะห่างระหว่างพีมอยซ์และเอ็นมอยซ์ ยังสามารถที่จะเลื่อนเข้ามาใกล้กันได้มากขึ้น เนื่องจากไม่ต้องมีส่วนของบ่อแยก ซึ่งจะทำให้ในการสร้างวงจรรวมจะมีจำนวนคว่ำมหนาแน่นของอุปกรณ์มากกว่า  
 โครงสร้างแบบ CMOS<sup>[5]</sup>



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของ CMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบ การสร้าง และการเก็บบรรจุ

3.1 การออกแบบมอยซ์เฟดและการทำมาสก์ต้นแบบ

ในการศึกษาโครงสร้างมอยซ์เฟด ทั้งชนิดเอ็นมอยซ์เฟด และพีมอยซ์เฟดนั้น การออกแบบใช้หลักการเกี่ยวกับการออกแบบมอสเฟดทั่ว ๆ ไป โดยการกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นหลัก ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดความกว้าง ( $w$ ) และ หรือ ความยาว ( $L$ ) ของช่องทางเดินกระแส เพื่อให้ได้ค่า  $\beta$  ตามต้องการ และเพื่อความสะดวกในการกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาวของช่องทางเดินกระแสจึงกำหนดให้สัญลักษณ์  $\sigma$  แทนค่าอัตราส่วนดังกล่าว ดังนั้นในการออกแบบเพื่อการศึกษาและทดลองในครั้งนี้นี้จึงศึกษาผลของค่า  $\sigma$  โดยการออกแบบให้  $\sigma$  มีค่าต่าง ๆ กัน

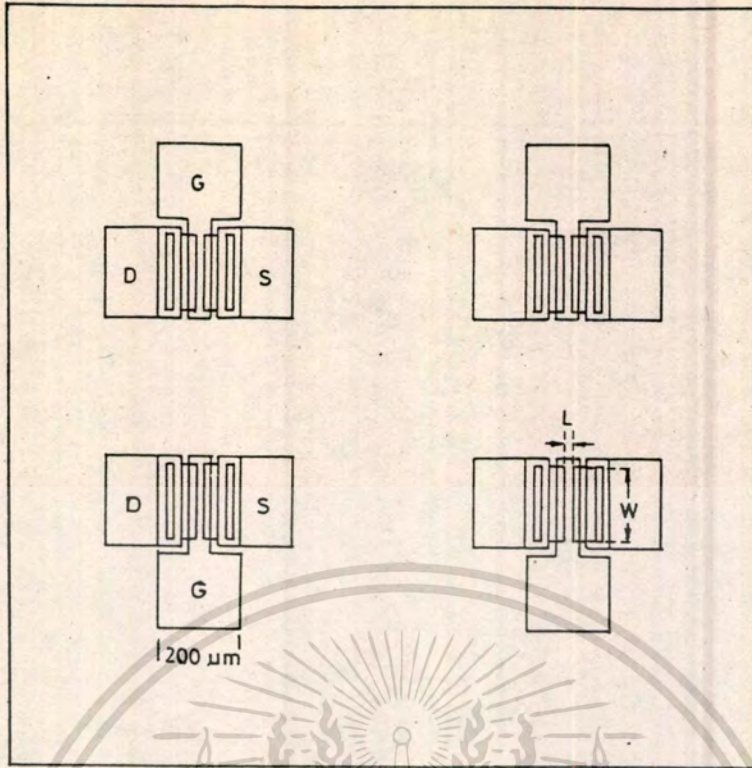
ในการออกแบบมอยซ์เฟดครั้งนี้จะออกแบบมอยซ์เฟดชุดเดียว แต่สามารถนำไปสร้างได้ทั้งพีมอยซ์เฟด และเอ็นมอยซ์เฟด ซึ่งมอยซ์เฟดที่ออกแบบจะมีขนาดความกว้าง และความยาวของช่องทางเดินกระแสต่าง ๆ กัน

เมื่อออกแบบมอยซ์เฟดขนาดต่าง ๆ แล้วจึงนำต้นแบบไปเขียนลงบนแผ่นกระดาษกราฟเท่าขนาดต้นแบบ จากนั้นนำไปเป็นต้นแบบสำหรับตัดแผ่นมาสก์ต้นแบบแยกออกเป็นชั้น ๆ สำหรับใช้ในแต่ละขั้นตอนการสร้าง ซึ่งจะมีทั้งหมด 4 มาสก์คือ

- มาสก์ 1 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอส
- มาสก์ 2 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างเกตออกไซด์
- มาสก์ 3 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วสัมผัสโลหะ
- มาสก์ 4 สำหรับพิมพ์ลวดลายอลูมิเนียม

หลังจากตัดแผ่นมาสก์ต้นแบบเสร็จทั้ง 4 มาสก์แล้วจึงนำมาถ่ายย่อส่วน โดยใช้กล้องถ่ายภาพย่อส่วน ย่อจากต้นแบบจริงลง 50 เท่า ดังนั้นขนาดที่ออกแบบไว้บนแผ่นกราฟ 1 mm. จะเท่ากับ 20  $\mu\text{m}$  หลังจากถ่ายย่อแล้ว ฟิล์มที่ใช้จะใช้เป็นฟิล์มกระจกเพื่อใช้เป็นมาสก์ต้นแบบสำหรับถ่ายแบบลงบนแผ่นขึ้นงาน ภาพการออกแบบ และการทำกระจกมาสก์ต้นแบบ แสดงดังในรูปที่ 3.1 - 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างขนาดของต้นแบบมอยซ์เฟตทอกรูแบบ

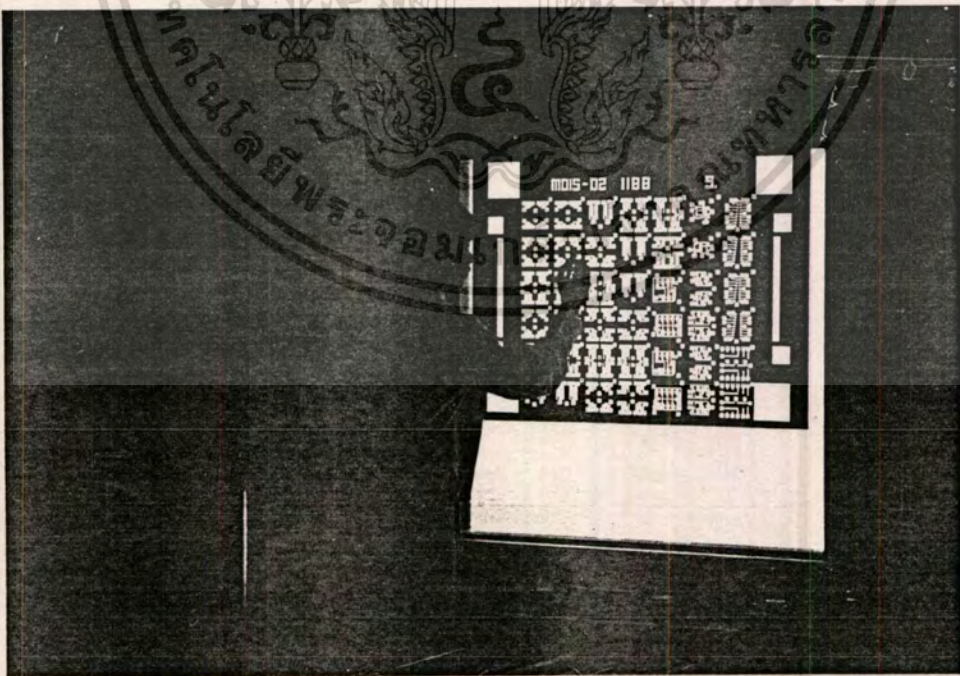


รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบและเขียนต้นแบบมอยซ์เฟต

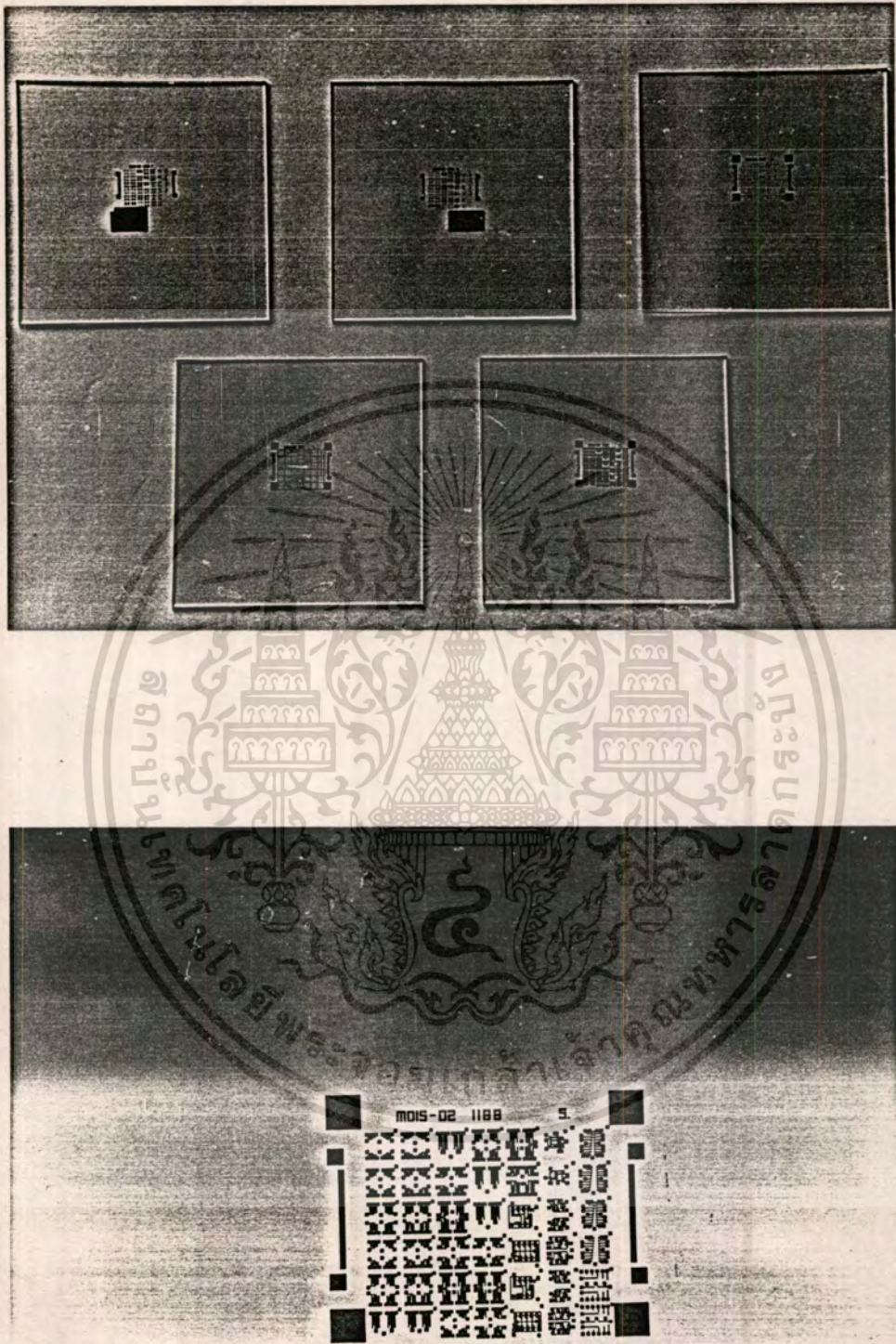
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงการตัดแบบบนแผ่น Peel coat เพื่อใช้เป็นมาสก์ต้นแบบ



รูปที่ 3.4 แสดงการถ่ายย่อต้นแบบลงบนฟิล์มกระจกด้วยกล้องถ่ายภาพย่อส่วน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม. อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงกระจกมาสก์ต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 กระบวนการสร้างมอซซีเฟด

#### 3.2.1 การเลือกแผ่นผลึก (wafer)

การเลือกแผ่นผลึกเป็นการเลือกชนิดของฐานรองซิลิกอนเริ่มต้น ซึ่งมี 2 ชนิดคือ

- ชนิดพี ระบาย (100) ความหนา 400  $\mu\text{m}$  พิกัดความต้านทาน 5-8  $\Omega\text{-cm}$ .
- ชนิดเอ็น ระบาย (100) ความหนา 400  $\mu\text{m}$  พิกัดความต้านทาน 20-50  $\Omega\text{-cm}$ .

#### 3.2.2 การทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นผลึก (Surface Cleaning)

การทำความสะอาดผิวหน้าเป็นการล้างสิ่งเจือปนอื่น ๆ ที่ติดอยู่ที่ผิวของแผ่นผลึกรวมทั้ง  $\text{SiO}_2$  ที่เกิดบนผิวของแผ่นผลึกออก เพื่อให้ผิวของแผ่นผลึกสะอาด ซึ่งขั้นตอนการทำความสะอาดผิวหน้าแสดงดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	Time	Note
Surface cleaning					
Slice etching	HF 5%	-	-	10 sec.	
	Trichlo.	-	hot	5 min.	Boil
	Acetone	-	hot	5 min.	Boil
	DI water	-	-	-	Rinse
	Dry	$\text{N}_2$	-	-	Blow
	$\text{HNO}_3$	-	hot	10 min.	Boil
	DI water	-	-	-	Rinse
	DI water	-	95	5 min.	Boil
	DI water	-	-	-	Rinse
	Dry	$\text{N}_2$	-	-	Blow

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°C)	Time	Note
Super Sonic in Solution (SSS)	Trichlo.	-	-	1 min.	
	Acetone	-	-	1 min.	
Slice etching	DI water	-	-	1 min.	
	HF 5%	-	-	10 sec.	
	DI water	-	-	-	Rinse
	Dry	N <sub>2</sub>	-	-	Blow

### 3.2.3 การออกซิเดชันสร้างชั้น SiO<sub>2</sub> (Oxidation)

การทำกระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้น SiO<sub>2</sub> ขึ้นบนผิวของซิลิกอน เพื่อเป็นส่วนป้องกันในการแพร่สารเจือ การออกซิเดชันมี 2 ชนิดคือ แบบแห้งและแบบชื้น การออกซิเดชันแบบแห้งจะทำในบรรยากาศของก๊าซ O<sub>2</sub> แห้ง ซึ่งจะให้เนื้อ SiO<sub>2</sub> ที่สะอาดแต่อัตราการเกิดช้า ส่วนการออกซิเดชันแบบชื้นจะให้เนื้อ SiO<sub>2</sub> หยิบ แต่อัตราการเกิดเร็ว ในกระบวนการออกซิเดชันครั้งนี้จะใช้ทั้ง 2 แบบสลับกันคือ ทำออกซิเดชันแบบแห้ง แบบชื้น และแบบแห้ง ซึ่งขั้นตอนการทำกระบวนการออกซิเดชันแสดงดังตาราง 3.2

ตาราง 3.2 ขั้นตอนการทำกระบวนการออกซิเดชัน

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°C)	Time	Note
Oxidation	Dry	O <sub>2</sub> 1000	1100	60 min.	
	Wet	O <sub>2</sub> 800	1100	120 min.	H <sub>2</sub> O 90-95 °C
	Dry	O <sub>2</sub> 1000	1100	60 min.	

### 3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาสก์ 1 (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นกระบวนการสำหรับถ่ายภาพแบบแผนจากโฟโตมาสก์ลงบนผิวของแผ่นผลึก โดยการใช้หน้ายาไวแสง (photoresist) ซึ่งมี 2 ชนิด คือน้ำยาไวแสงชนิดลบ ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ waycoat และน้ำยาไวแสงชนิดบวกที่นิยมใช้กันมากได้แก่ AZ-1350 ในขั้นนี้ใช้ waycoat เพื่อเปิดมาสก์ 1 เตรียมแพร์สารเจือส่วนเดรน-ซอส ซึ่งขั้นตอนการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี แสดงดังตาราง 3.3

ตาราง 3.3 ขั้นตอนการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°c)	Time	Note
Photolithography	Spin (5000 rpm.)	-	25	30 sec.	Waycoat
	Pre-bake	-	95	30 min.	
Develope	Expose	-	-	10 sec.	Mask 1
	Xylene	-	-	60 sec.	three times
	Isopropyl Alcho.	-	-	90 sec.	three times
	DI water	-	-	10 sec.	Rinse
	Dry	N <sub>2</sub>	-	-	Blow
Back coating	Back coating	-	-	-	Watercoat
	Post-bake	-	95	30 min.	

### 3.2.5 การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

การสกัดชั้นออกไซด์เป็นการสกัดเนื้อ SiO<sub>2</sub> ในบริเวณที่ไม่มีหน้ายาไวแสงปกคลุมอยู่ โดยใช้น้ำยา Buffer ซึ่งมีส่วนผสมของ HF : NH<sub>4</sub>F = 1 : 6 โดยมีอัตราการสกัดประมาณ 1000 Å<sup>๐</sup> เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ ซึ่งขั้นตอนการสกัดชั้นออกไซด์ แสดงดังตาราง 3.4

ตาราง 3.4 ขั้นตอนการสกัดชั้นออกไซด์

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°c)	Time	Note
Etching	Buffer	-	-	≈10 min.	1000 Å/min.

### 3.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Photoresist Cleaning)

การล้างน้ำยาไวแสงเป็นการล้างเพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เคลือบผิวของแผ่นผลึกทั้ง 2 ด้าน ออกเพื่อให้ผิวสะอาดพร้อมที่จะทำการแพร่สารต่อไป ซึ่งขั้นตอนการล้างน้ำยาไวแสงแสดงดังตาราง 3.5

ตาราง 3.5 ขั้นตอนการล้างน้ำยาไวแสง

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°c)	Time	Note
Photoresist cleaning	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	hot	5 min.	two times.
	DI water	-	-	-	Rinse
	DI water	-	95	5 min.	Boil
	DI water	-	-	-	Rinse
	Dry	N <sub>2</sub>	-	-	Blow
SSS	Trichlo.	-	hot	5 min.	Boil
SSS	Acetone	-	-	1 min.	
SSS	DI water	-	-	1 min.	
Slice etching	HF 5%	-	-	10 sec.	
	DI water	-	-	-	Rinse
	Dry	N <sub>2</sub>	-	-	Blow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.7 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion)

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นกระบวนการสำหรับการเติมสารเจือเข้าไปในเนื้อซิลิกอนในบริเวณ ที่กำหนดไว้ เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอส ในกรณีของพีเอมอซจะใช้สารเจือชนิดพีคือ โบรอน และ เอ็นมอซจะใช้สารเจือชนิดเอ็นคือ ฟอสฟอรัส กระบวนการแพร่สารเจือถูกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. Predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้น เพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่จะให้เข้าไปในเนื้อซิลิกอน

2. Drive in เป็นการควบคุม และกำหนดลักษณะการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในเนื้อซิลิกอน หรือเรียกว่าการขับลึกสารเจือ

ซึ่งขั้นตอนการแพร่สารเจือชนิดพี แสดงดังตาราง 3.6 และขั้นตอนการแพร่สารเจือชนิดเอ็น แสดงดังตาราง 3.7

ตาราง 3.6 ขั้นตอนการแพร่สารเจือชนิดพี

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°c)	Time	Note
Boron Diffusion	Activate	O <sub>2</sub> 800	970	30 min.	
	Stabilize	N <sub>2</sub> 800	970	10 min.	
Boron Deposition	Deposition	N <sub>2</sub> 800	970	20 min.	
Slice etching	HF 5%	-	-	10 sec.	
	DI water	-	-	-	
Boron Drive in	Drive in	O <sub>2</sub> 1000	1100	40 min.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.7 ขั้นตอนการแพร่สารเจือชนิดอื่น

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°c)	Time	Note
Phosphorus - Diffusion					
Phosphorus - Deposition	Deposition	N <sub>2</sub> 800	970	40 min.	
Slice etching	HF 5%	-	-	10 sec.	
	DI water	-	-	-	Rinse
Phosphorus - Drive in	Drive in	O <sub>2</sub> 1000	1100	60 min.	

### 3.2.8 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาส์ก 2 (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาส์ก 2 นี้เป็นการถ่ายแบบแผนเพื่อกำหนดบริเวณที่จะเปิดช่องออกไซด์ในส่วนเกต เพื่อเตรียมสำหรับการสร้างเกตออกไซด์ต่อไป ขั้นตอนการทำเหมือนขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.2.4 แต่ไม่ต้องเคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหลังของแผ่นผลึก และใช้มาส์กที่ 2 เป็นต้นแบบ

### 3.2.9 การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

การสกัดชั้นออกไซด์นี้จะใช้ขั้นตอนเหมือนกับกระบวนการสกัดชั้นออกไซด์ในหัวข้อที่ 3.2.5 ซึ่งในขั้นตอนนี้จะสกัดออกไซด์บริเวณเกต และที่ด้านหลังของแผ่นผลึกออก

### 3.2.10 การล้างน้ำยาไวแสง (Photoresist Cleaning)

การล้างน้ำยาไวแสงจะใช้ขั้นตอนการล้างเหมือนในหัวข้อที่ 3.2.6 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ /

### 3.2.11 กระบวนการสร้างเกตออกไซด์ (Oxidation)

การสร้างเกตออกไซด์ เป็นการสร้างออกไซด์บางๆคลุมบริเวณช่องทางเดินกระแส เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของมอสส์เฟต ซึ่งความหนาของเกตออกไซด์จะมีผลต่อแรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) ด้วย ดังนั้นในกระบวนการสร้างเกตออกไซด์จะต้องเป็นกระบวนการที่สะอาด จึงใช้การสร้างชั้นออกไซด์แบบแห้ง (Dry Oxidation) อย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งขั้นตอนการสร้างเกตออกไซด์แสดงดังตาราง 3.8 ตาราง 3.8 ขั้นตอนการสร้างเกตออกไซด์

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp ( $^{\circ}$ C)	Time	Note
Oxidation	Dry oxidation	O <sub>2</sub> 1000	1100	20 min.	SiO <sub>2</sub> thickness about 700 $^{\circ}$ A

จากนั้นจึงนำไปสกัดชั้นออกไซด์ด้านหลังออกด้วย Buffer โดยใช้ยาไฮแสงเคลือบด้านหน้าไว้

### 3.2.12 กระบวนการแพร่อะตอมทองคำ (Au Diffusion)

การแพร่อะตอมทองคำเป็นกระบวนการที่ทำเพื่อเปลี่ยนชนิดฐานร่องซิลิกอนให้เป็นชนิดอินทรินซิก ซึ่งขั้นตอนการแพร่อะตอมทองคำนี้แยกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นตอนการเคลือบทองคำ ทำโดยการใช้กระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ ทำการเคลือบทองคำที่บริเวณด้านหลังของแผ่นผลึก
  2. ขั้นตอนการแพร่ทองคำ ทำโดยการนำแผ่นผลึกที่เคลือบทองคำด้านหลังแล้วเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง แล้วทำการ Quenching เพื่อให้อะตอมทองคำค้างอยู่ในแผ่นผลึก
- ซึ่งขั้นตอนการแพร่อะตอมทองคำ แสดงดังตาราง 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตาราง 3.9 ขั้นตอนการแพร่อะตอมทองคำ

Process	Detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°C)	Time	Note
Au Diffusion	Au Evaporation	-	-	-	$1.6 \times 10^{-6}$ Torr
	Deposition	N <sub>2</sub> 800	1100	90 min.	
	Quenching	N <sub>2</sub>	cool	-	short time

## 3.2.13 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาส์ก 3 (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์ก 3 นี้เป็นการเตรียมพื้นที่เพื่อเปิดช่องออกไซด์เตรียมทำชั้นสัมผัสโลหะ ขั้นตอนการทำงานจะเหมือนขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.2.4 แต่ไม่ต้องเคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหลัง

## 3.2.14 การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

การสกัดชั้นออกไซด์นี้จะเหมือนกับในกระบวนการสกัดชั้นออกไซด์ในหัวข้อที่ 3.2.5 ซึ่งในขั้นนี้จะเป็นการสกัดออกไซด์บริเวณที่จะทำชั้นสัมผัสโลหะออก

## 3.2.15 การล้างน้ำยาไวแสง (Photoresist Cleaning)

การล้างน้ำยาไวแสงจะใช้ขั้นตอนเหมือนในหัวข้อที่ 3.2.6

## 3.2.16 การเคลือบอลูมิเนียม (Al Evaporation)

การเคลือบอลูมิเนียม ใช้วิธีเคลือบโลหะในสุญญากาศ ซึ่งจะทำการดูดอากาศในหม้อเคลือบออกจนมีความดันประมาณ  $1.6 \times 10^{-6}$  Torr. แล้วจึงทำการให้ความร้อนกับไส้ (filament) ทั้งสแตน ซึ่งมีลวดอลูมิเนียมใส่อยู่ โดยการให้กระแสไฟฟ้าผ่านไส้ทั้งสแตน จนเกิดความร้อนทำให้ลวดอลูมิเนียมหลอมแล้วระเหยกกลายเป็นไอไปเคลือบผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบอลูมิเนียมเป็นการทำเพื่อต่อจุดสัมผัสจากเนื้อซิลิกอนออกสู่ภายนอกเพื่อเชื่อมต่อกับสายไปใช้งาน

### 3.2.17 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาส์ก 4 (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์กที่ 4 นี้ จะเปลี่ยนชนิดของน้ำยาไวแสงเป็นชนิดบวก (AZ-1350) เพื่อให้เกิดลวดลายของตัวนำไฟฟ้าตามต้นแบบบนแผ่นผลึก กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์กที่ 4 แสดงดังตาราง 3.10

ตาราง 3.10 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับน้ำยาไวแสงชนิดบวก

Process	detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°c)	Time	Note
Photolithography	Spinner (5000 rpm.)	-	25	30 sec.	AZ-1350
	Pre-bake	-	95	30 min.	
	Expose	-	-	10 sec.	
AZ Develop	AZ Developer	-	-	60 sec.	two times
	DI water	-	-	-	Rinse
	Post-bake	-	95	30 min.	

### 3.2.18 การสกัดลวดลายอลูมิเนียม (Al Etching)

การสกัดลวดลายอลูมิเนียมเป็นกระบวนการที่ใช้สกัดเนื้ออลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการทิ้งไปเหลือไว้เฉพาะลวดลายวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งจะเป็นส่วนที่ถูกน้ำยาไวแสงปกคลุมอยู่ โดยใช้น้ำยาสกัดอลูมิเนียม ใช้เวลาสกัดนาน 1 - 2 นาที แล้วล้างด้วยน้ำ DI จนสะอาด  
หมายเหตุ น้ำยาสกัดอลูมิเนียมมีส่วนผสมดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.19 การล้างน้ำยาไวแสง (Photoresist Cleaning)

การล้างน้ำยาไวแสงในขั้นตอนนี้เป็นการล้างน้ำยา AZ โดยใช้ Acetone เป็นตัวทำละลาย โดยการนำ Acetone ไปอุ่นให้ร้อน แล้วจึงนำแผ่นผลึกที่มีน้ำยา AZ เคลือบอยู่มาล้าง เมื่อล้าง AZ หมดแล้วจึงนำแผ่นผลึกไปล้างด้วยน้ำ DI 2 จนสะอาด แล้วเป่าแห้ง

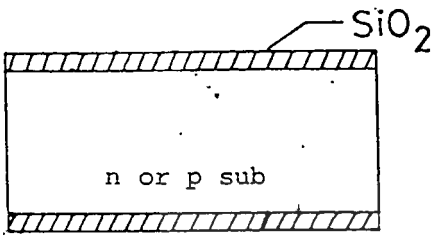
### 3.2.20 การซินเตอร์ริง (Al Sintering)

การซินเตอร์ริง เป็นการทำให้เนื้ออลูมิเนียมและซิลิกอนเกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) เพื่อให้มีการนำกระแสที่ดี ซึ่งขั้นตอนการทำซินเตอร์ริง แสดงดังตาราง 3.11 ตาราง 3.11 ขั้นตอนการทำซินเตอร์ริง

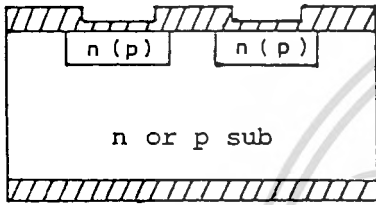
Process	detail	Gas rate (cc/min.)	Temp (°c)	Time	Note
Sintering		N <sub>2</sub> 600	500	10 min.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

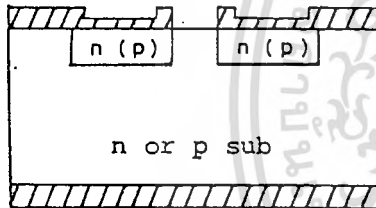
สรุปขั้นตอนการสร้างที่ 1 สำหรับสร้างมอซซีเฟด โดยแสดงเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังนี้



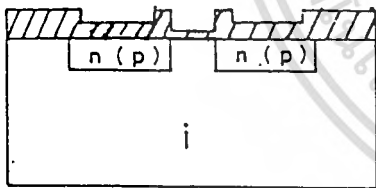
- 1) เลือกใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น หรือชนิดพี หนาขนาด (100) ทำความสะอาดผิวแล้วทำการสร้างชั้นออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน ให้ความหนาของชั้นออกไซด์ประมาณ  $10,000 \text{ \AA}$



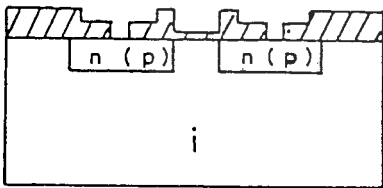
- 2) เปิดมาสก์ที่ 1 เพื่อแพร่สารเจือที่ส่วนของเดรนและซอส แล้วทำการขบลิทพร้อมกับสร้างชั้นออกไซด์ปิด



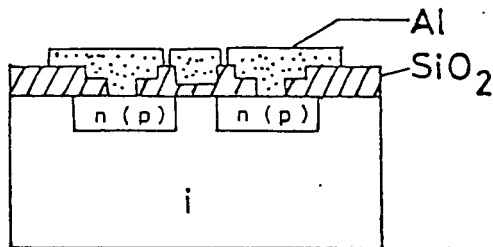
- 3) เปิดมาสก์ที่ 2 เพื่อสร้างเกตออกไซด์ของมอซซีเฟดให้มีความหนาของเกตออกไซด์ประมาณ  $700 \text{ \AA}$



- 4) เคลือบทองคำทางด้านหลังด้วยกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ แล้วทำการแพร่ทองคำเข้าไปในเนื้อของซิลิกอนฐานรอง



- 5) เปิดมาสก์ที่ 3 สำหรับทำขั้วสัมผัส



- 6) เคลือบอลูมิเนียมที่ผิวหน้าด้วยกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ เปิดมาสก์ที่ 4 เพื่อทำลวดลายวงจรตามต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ แล้วทำการ Sintering เพื่อทำรอยสัมผัสโอห์มิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดอื่น จะได้เอ็นมอยซ์เฟตที่มีการทำงานเป็นดินลิกชั้นใหม่ เนื่องจากฐานรองซิลิกอนส่วนที่เป็นบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นอินทรินซิกที่ยังมีส่วนของสารเจือชนิดอื่นอยู่ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับกระบวนการสร้างใหม่เพื่อให้ได้การทำงานเป็นเอ็นฮานซ์เมนต์ใหม่ วิธีที่ใช้คือการแพร่สารเจือชนิดเฉยลงไปในบริเวณช่องทางเดินกระแส

เนื่องจากฐานรองซิลิกอนเป็นชนิดอื่น ดังนั้นเพื่อให้การทำงานเป็นเอ็นฮานซ์เมนต์ใหม่จึงเลือกใช้สารเจือชนิดพี (โบรอน) โดยในกระบวนการสร้างเอ็นมอยซ์เฟต จะทำการเปิดมาสก์เกตก่อนเพื่อแพร่สารเจือชนิดเฉย ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่เพิ่มขึ้นสำหรับกรณีการสร้างเอ็นมอยซ์เฟตบนฐานรองซิลิกอนชนิดอื่น

ขั้นตอนการสร้างจะแสดงเป็นลำดับ ได้ดังนี้

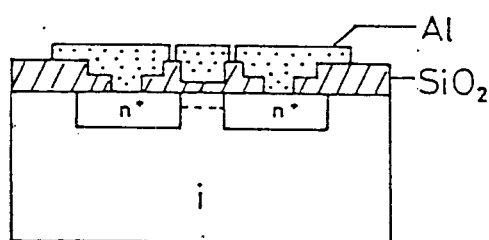
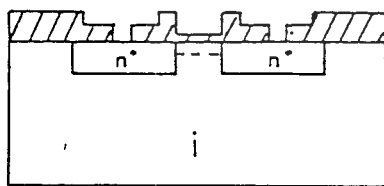
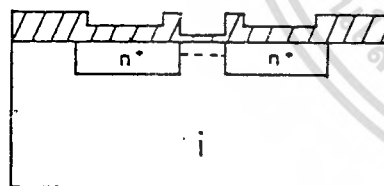
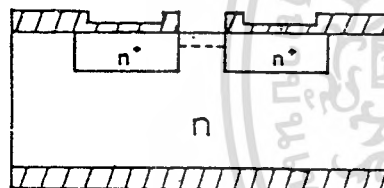
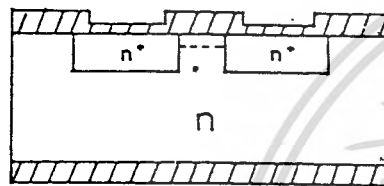
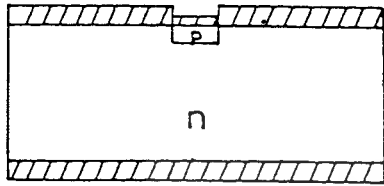
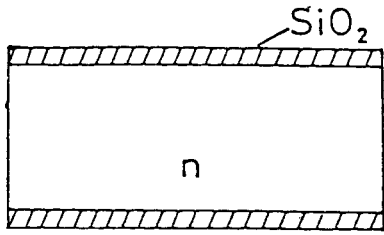
1. การเลือกแผ่นผลึก
2. การทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นผลึก
3. การออกซิเดชันสร้างชั้น  $\text{SiO}_2$
- \* 4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาสก์เกต
5. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดพี
6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาสก์ 1
7. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็น
8. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาสก์ 2
9. กระบวนการสร้างเกตออกไซด์
10. กระบวนการแพร่อะตอมของทองคำ
11. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาสก์ 3
12. กระบวนการเคลือบโลหะ (อลูมิเนียม) ในสุญญากาศ
13. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาสก์ 4
14. กระบวนการอินเตอร์ริง

รายละเอียดขั้นตอนการสร้างจะเหมือนกับในหัวข้อ 3.2

หมายเหตุ \* เป็นขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้โครงสร้างเป็นแบบเอ็นแซนแนลเอ็นฮานซ์เมนต์ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปขั้นตอนการสร้างที่ 2 สำหรับสร้างเอ็นเมอชพีเวตเอ็นฮานซ์เมทท์โหมดโดยแสดงเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังนี้



1) เลือกใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ฝึกความ  
ต้านทาน 5-8  $\Omega\text{-cm}$ . ทำความสะอาดผิวแล้วทำการสร้าง  
ชั้นออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันได้ความหนาของชั้น  
ออกไซด์ประมาณ  $10,000 \text{ \AA}$

2) เปิดมาสก์เกต เพื่อแพร่สารเจือชนิดพีชนิดเซย์ที่ส่วนช่องทาง  
เดินกระแส แล้วทำการซับลิทพร้อมกับการสร้างชั้นออกไซด์ปิด

3) เปิดมาสก์ที่ 1 เพื่อแพร่สารเจือที่ส่วนของเดรนและซอส  
แล้วทำการซับลิทพร้อมกับการสร้างชั้นออกไซด์ปิด

4) เปิดมาสก์ที่ 2 เพื่อสร้างเกตออกไซด์ของมอชพีเวตให้  
ความหนาของเกตออกไซด์ประมาณ  $700 \text{ \AA}$

5) เคลือบทองคำทางด้านหลังด้วยกระบวนการเคลือบโลหะใน  
สุญญากาศ แล้วทำการแพร่ทองคำเข้าไปในเนื้อของซิลิกอน  
ฐานรอง

6) เปิดมาสก์ที่ 3 สำหรับทำขั้วสัมผัส

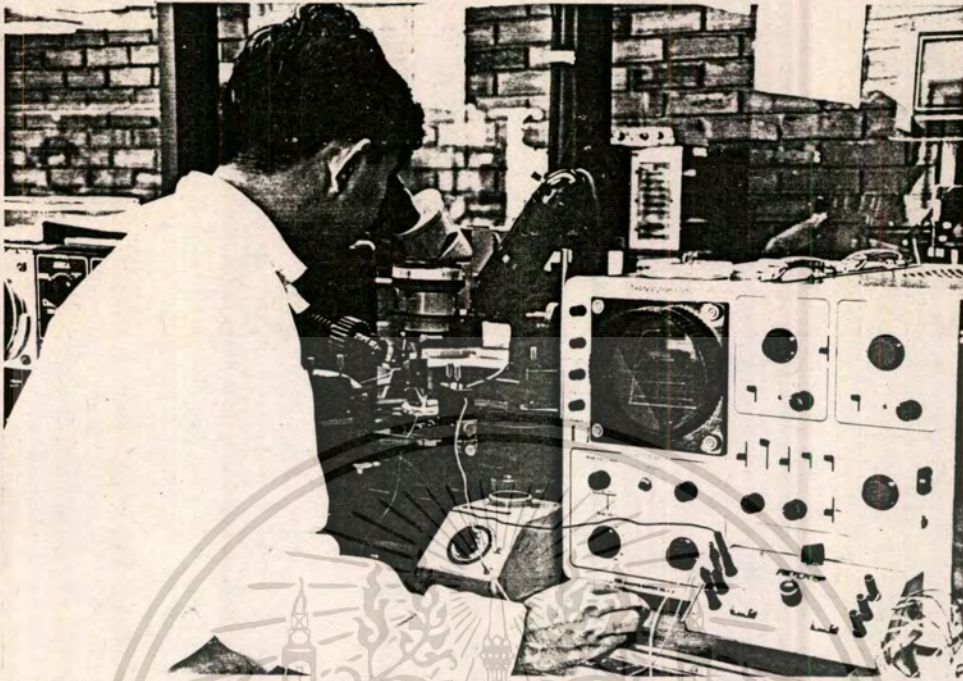
7) เคลือบอลูมิเนียมที่ผิวหน้าด้วยกระบวนการเคลือบโลหะใน  
สุญญากาศ เปิดมาสก์ที่ 4 เพื่อทำลวดลายวงจรตามต้นแบบ  
ที่ได้ออกแบบไว้ แล้วทำการ Sintering เพื่อทำรอย  
สัมผัสโหมก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

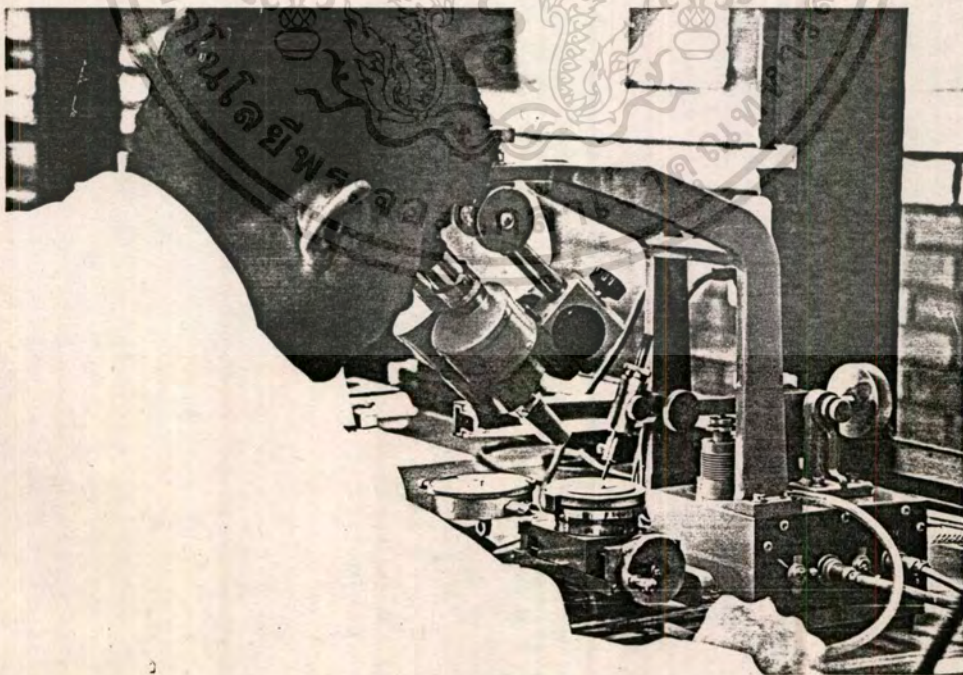
### 3.3 การเก็บบรรจุ

#### การเก็บบรรจุมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. นำแผ่นผลึกที่ทำการสร้างมอยซ์เฟดแล้วมาวัดคุณสมบัติ โดยใช้โพรม และเครื่อง Curve Tracer เพื่อตรวจสอบการทำงานของเฟดเบื้องต้น แสดงดังรูป 3.6
2. นำแผ่นผลึกที่ตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นแล้ว ไปตัดแยกชิ้นออกเป็นแต่ละวงจรถามที่ได้ออกแบบไว้ ด้วยเครื่องตัดแผ่นผลึก แล้วทำการ Brake แยกแผ่นผลึกออกเป็นชิพ แสดงดังรูป 3.7
3. เลือกชิพที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติการทำงานเบื้องต้นแล้ว มาติดบนตัวถังแบบกระป๋องสามขา หรือแปดขา โดยติดด้วยเครื่องติดชิพแบบใช้ความร้อน แสดงดังรูป 3.8
4. นำชิพที่ติดบนตัวถังแล้วมาทำการเชื่อมต่อสายด้วยเครื่อง Bonding โดยใช้ลวดอลูมิเนียมขนาด 25  $\mu\text{m}$  เป็นลวดเชื่อม แสดงดังรูป 3.9
5. นำตัวถังที่ทำการเชื่อมต่อสายแล้วมาปิดฝา เพื่อไว้ใช้งาน หรือนำไปวัดคุณสมบัติอื่น ๆ ต่อไป แสดงดังรูป 3.10



รูปที่ 3.6 แสดงการตรวจสอบคุณสมบัติของมอยซ์เฟตบนแผ่นชิ้นงานด้วยการใช้ไพโรบ



รูปที่ 3.7 แสดงการตัดแยกชิพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

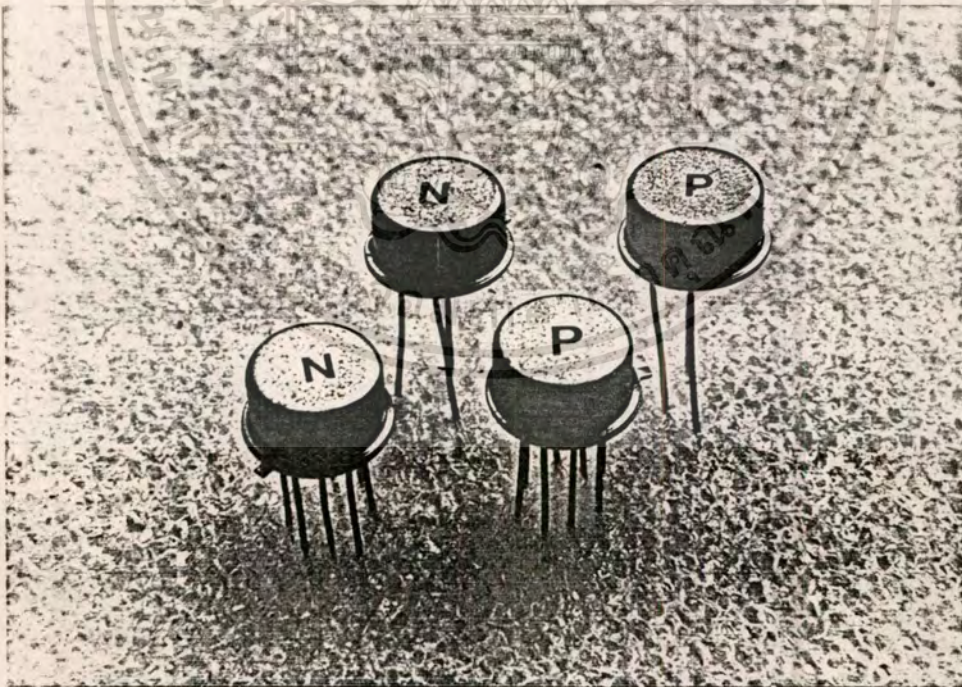
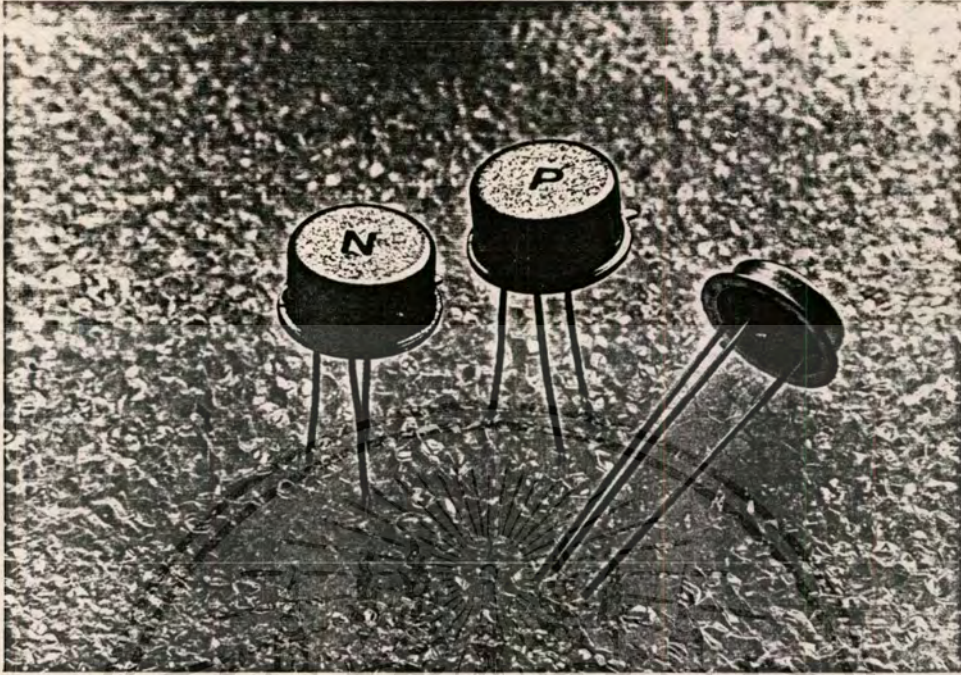


รูปที่ 3.8 แสดงการติดตั้งลงบนตัวถัง



รูปที่ 3.9 แสดงการต่อเชื่อมสาย (Wire Bonding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงตัวถังที่ทำการเก็บบรรจุแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบวงจรรวมที่มีโครงสร้างแบบคอมพลิเมนต์เมทัลรีโมยซ์

ในการศึกษาโครงสร้างวงจรรวมแบบมอยซ์ จะใช้โครงสร้างแบบคอมพลิเมนต์เมทัลรี ซึ่งประกอบด้วยมอยซ์เฟตเป็นมอยซ์ตัวไหล และเอ็นมอยซ์เฟตเป็นมอยซ์ตัวขั้ว การออกแบบใช้หลักการเดียวกับการออกแบบมอยซ์เฟต โดยการกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นหลัก ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดความกว้าง ( $w$ ) และ หรือ ความยาว ( $L$ ) ของช่องทางเดินกระแส โดยมีอัตราส่วนระหว่างความกว้าง ต่อความยาวเป็น  $\sigma$  ในการออกแบบจะกำหนดให้มีค่า  $\sigma$  ต่าง ๆ กันโดยที่กำหนดให้ค่า  $\sigma_L$  เป็นค่า  $\sigma$  ของมอยซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นไหล และ  $\sigma_D$  เป็นค่า  $\sigma$  ของเอ็นมอยซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขั้ว

นอกจากค่า  $\sigma$  ของมอยซ์เฟต และเอ็นมอยซ์เฟตแล้ว เรายังต้องพิจารณาถึงค่าอัตราส่วน  $\sigma$  ระหว่างมอยซ์เฟต และเอ็นมอยซ์ด้วย เพื่อให้การทำงานของมอยซ์ตัวไหล และมอยซ์ตัวขั้วสอดคล้องกันซึ่งค่าอัตราส่วนระหว่าง  $\sigma_L$  กับ  $\sigma_D$  เรียกว่า  $\sigma_r$  โดยกำหนดให้  $\sigma_r = \sigma_D / \sigma_L$  และในการออกแบบจะกำหนดให้ค่า  $\sigma_r$  มีค่าต่าง ๆ หลาย ๆ ค่า เพื่อศึกษาผลของขนาดโครงสร้างกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรวมด้วย

เนื่องจากโครงสร้างแบบคอมพลิเมนต์เมทัลรีมอยซ์ เป็นโครงสร้างที่สามารถสร้างได้ทั้งมอยซ์ และเอ็นมอยซ์บนฐานรองซิลิกอนเดียวกันได้ โดยไม่ต้องมีบ่อแยก (well) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของวงจรรวมแบบคอมพลิเมนต์เมทัลรีมอยซ์แล้ว จะเห็นว่าเราสามารถออกแบบให้ระยะห่างระหว่างมอยซ์และเอ็นมอยซ์ ( $d$ ) มีระยะใกล้เคียงกันได้ ดังนั้นจึงได้ออกแบบระยะห่างระหว่างมอยซ์และเอ็นมอยซ์ ให้มีขนาดต่าง ๆ กันเพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างมอยซ์และเอ็นมอยซ์กับการทำงานของวงจรรวม

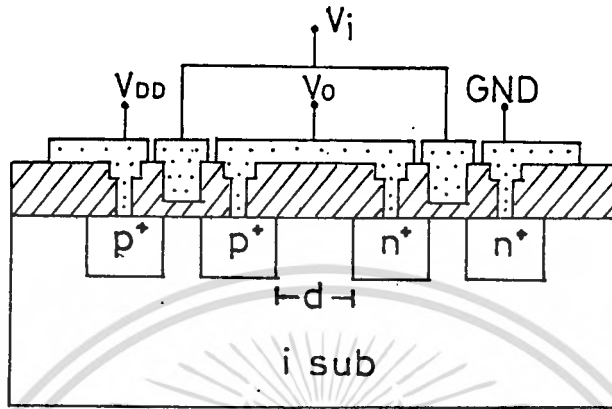
หลังจากออกแบบวงจรรวมที่มีพารามิเตอร์ขนาดต่าง ๆ แล้วจึงนำมาเขียนต้นแบบลงบนกระดาษกราฟ แสดงดังรูปที่ 3.12 แล้วจึงนำไปตัดต้นแบบแยกมาส่ง และนำไปถ่ายย่อโดยใช้กระบวนการเดียวกับหัวข้อ 3.1 มาส่งต้นแบบแบ่งออกได้ดังนี้

- มาตรา 1 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอสของมอยซ์
- มาตรา 2 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอสของเอ็นมอยซ์
- มาตรา 3 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างเกตออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

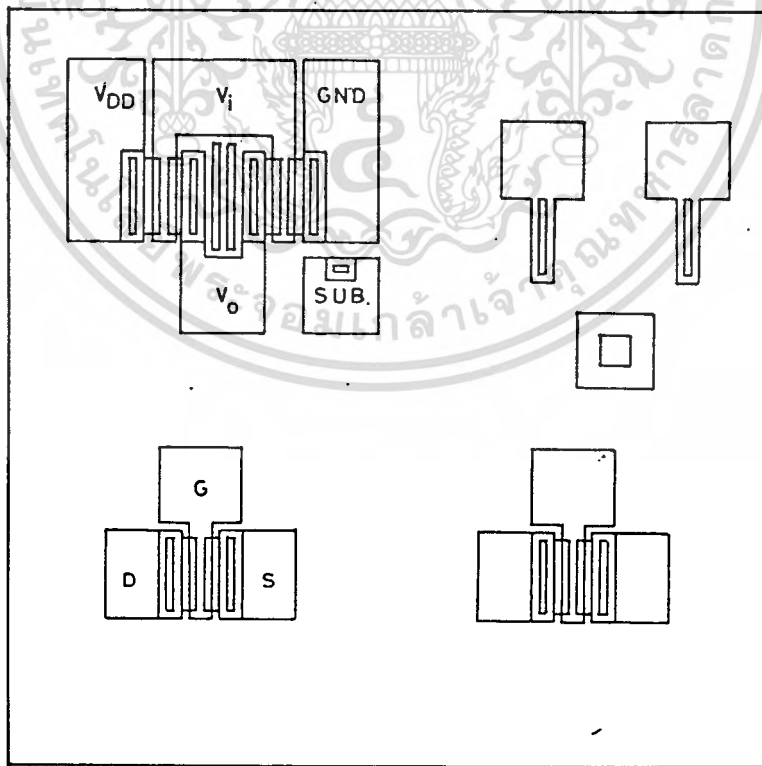
มาตรา 4 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วสัมผัสโลหะ

มาตรา 5 สำหรับฉีกริมลวดลายอลูมิเนียม



รูปที่ 3.11 ภาพตัดขวางแสดงขนาดและระยะห่างระหว่างเฟรมมอยซ์และเอ็นมอยซ์ (d)

ในโครงสร้างวงจรรวมแบบคอมพลีเมนท์ารี



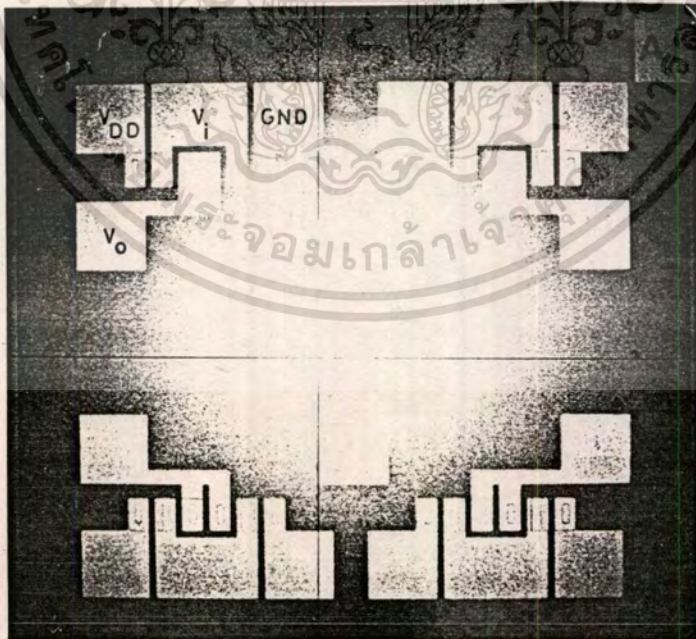
รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างขนาดของต้นแบบวงจรรวมแบบคอมพลีเมนท์ารีมอยซ์ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 กระบวนการสร้างวงจรรวมแบบคอมพลิเมนต์ทาร์มีมอยซ์ (CMOIS)

วงจรรวมอินเวอร์เตอร์แบบคอมพลิเมนต์ทาร์มีมอยซ์จะประกอบด้วยมอยซ์แบบพีเอ็นแชนแนล และเอ็นแชนแนลทำงานร่วมกัน ในกระบวนการสร้างวงจรรวมอินเวอร์เตอร์แบบคอมพลิเมนต์ทาร์มีมอยซ์จะทำการสร้างวงจรรวมบนฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรินซิก จากการศึกษาและทดลองใช้ฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็นและชนิดพีมาสร้างเป็นฐานรองชนิดอินทรินซิก โดยการแพร่ระดมของทองคำเข้าไปในแผ่นผลึกฐานรองซิลิกอน พบว่าฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น สามารถนำมาสร้างเป็นฐานรองชนิดอินทรินซิกได้ดีกว่าฐานรองเริ่มต้นชนิดพี ดังนั้นในกระบวนการสร้างวงจรรวมอินเวอร์เตอร์แบบคอมพลิเมนต์ทาร์มีมอยซ์ จะเลือกใช้ฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น ที่มีระนาบ (100) มีพิกัดความต้านทาน 5-8  $\Omega\text{-cm}$ .

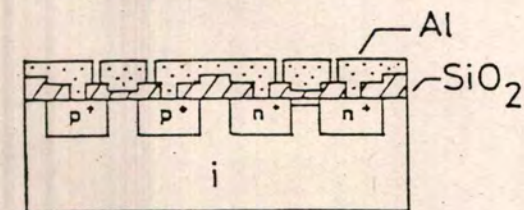
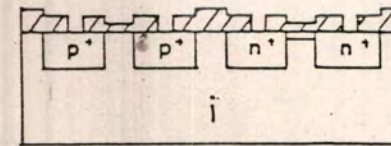
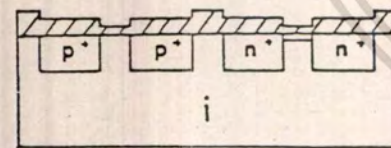
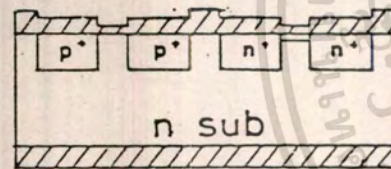
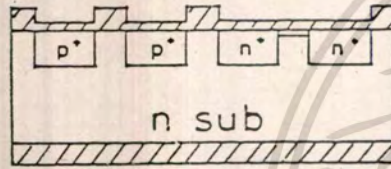
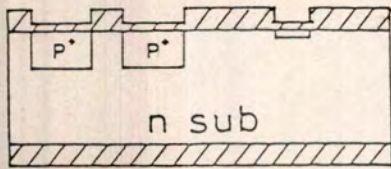
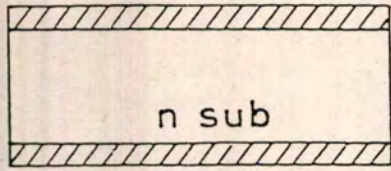
กระบวนการสร้างวงจรรวมแบบคอมพลิเมนต์ทาร์มีมอยซ์ จะใช้กระบวนการสร้างเช่นเดียวกับกระบวนการสร้างมอยซ์เฟตในหัวข้อ 3.2 เนื่องจาก โครงสร้างของวงจรรวมแบบคอมพลิเมนต์ทาร์มีมอยซ์ประกอบด้วยมอยซ์เฟตและเอ็นมอยซ์เฟต ดังนั้นในกระบวนการสร้างจึงต้องใช้ขั้นตอนการแพร่สารเจือทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น ตัวอย่างภาพลวดลายวงจรรวมที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงภาพลวดลายวงจรรวมอินเวอร์เตอร์แบบคอมพลิเมนต์ทาร์มีมอยซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปขั้นตอนการสร้างที่ 3 สำหรับสร้างวงจรรวมแบบ CMOIS ซึ่งแสดงเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังนี้



1) เลือกใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ (100) พิกัดความ  
ด้านทาน 5-8  $\Omega$ -cm. ทำความสะอาดผิวแล้วทำการสร้าง  
ชั้นออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันได้ความหนาของชั้น  
ออกไซด์ประมาณ 10,000  $\text{Å}$

2) เปิดมาสก์ที่ 1 เพื่อแพร่สารเจือชนิดพีที่ส่วนของเดรนและ  
ซอสของพินมอยซ์ และที่ส่วนเกตของเอ็นมอยซ์ แล้วทำการ  
ขัปลิกพร้อมกับสร้างชั้นออกไซด์ปิด

3) เปิดมาสก์ที่ 2 เพื่อแพร่สารเจือชนิดเอ็นที่ส่วนของเดรน  
และซอสของเอ็นมอยซ์ แล้วทำการขัปลิกพร้อมกับสร้างชั้น  
ออกไซด์ปิด

4) เปิดมาสก์ที่ 3 เพื่อสร้างเกตออกไซด์ของพินมอยซ์ และเอ็น  
มอยซ์ ให้มีความหนาของเกตออกไซด์ประมาณ 700  $\text{Å}$

5) เคลือบทองคำทางด้านหลังด้วยกระบวนการเคลือบโลหะใน  
สุญญากาศ แล้วทำการแพร่ทองคำเข้าไปในเนื้อของซิลิกอน  
ฐานรอง

6) เปิดมาสก์ที่ 4 สำหรับทำขั้วสัมผัส

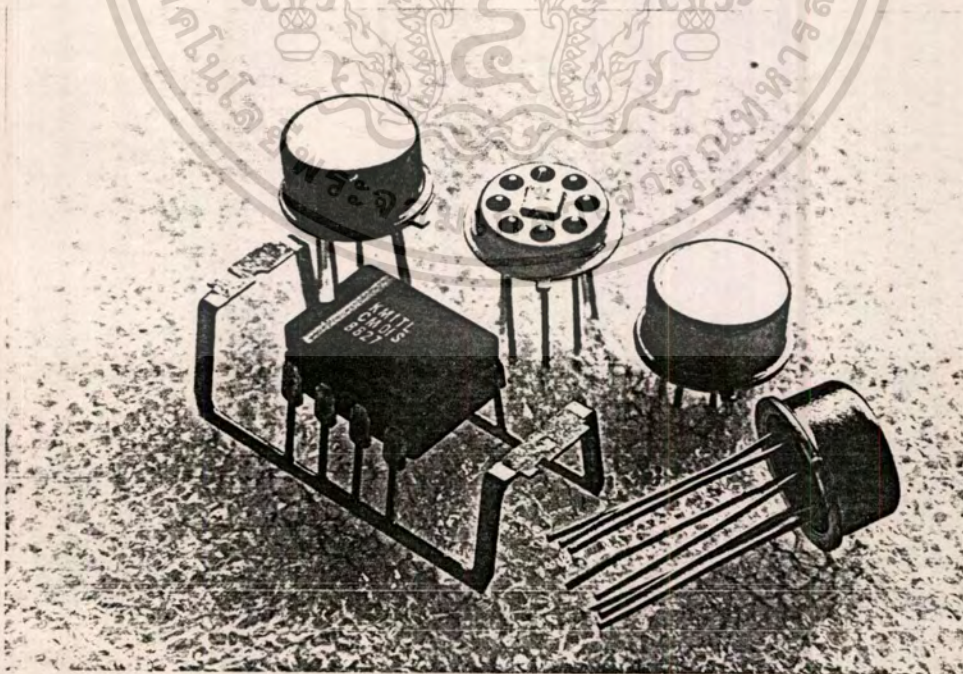
7) เคลือบอลูมิเนียมที่ผิวหน้าด้วยกระบวนการเคลือบโลหะใน  
สุญญากาศ เปิดมาสก์ที่ 5 เพื่อทำลวดลายวงจรตามต้นแบบ  
ที่ได้ออกแบบไว้ แล้วทำการ Sintering เพื่อทำรอย  
สัมผัสโอห์มิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การเก็บบรรจุ

การเก็บบรรจุมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. นำแผ่นผลึกที่ทำการสร้างวงจรรวมแบบมอยซ์แล้วมาตรวจสอบคุณสมบัติ โดยใช้โพรบ และเครื่อง Curve Tracer เพื่อทดสอบการทำงานของมอยซ์เฟตในวงจรรวม และทดสอบการทำงานของวงจรรวมต่าง ๆ
  2. นำแผ่นผลึกที่วัดคุณสมบัติเบื้องต้นแล้ว ไปตัดแยกชิพออกเป็นแต่ละวงจรถามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยเครื่องตัดแผ่นผลึก แล้วทำการ Brake แยกแผ่นผลึกออกเป็นชิพ
  3. เลือกชิพที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติการทำงานเบื้องต้นแล้ว มาติดบนตัวถังแบบกระป๋องแปดขา โดยติดด้วยเครื่องติดชิพแบบใช้ความร้อน หรือ ติดบน ceramic case
  4. นำชิพที่ติดบนตัวถังแล้วมาทำการเชื่อมต่อสายด้วยเครื่อง Wire Bonding โดยใช้ลวดอลูมิเนียมขนาด 25  $\mu\text{m}$  เป็นลวดเชื่อม ในกรณีของตัวถังแบบ ceramic จะใช้เครื่องเชื่อมต่อสายแบบที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม (Auto Bonder Model K.S. 1413)
  5. นำตัวถังที่ทำการเชื่อมต่อสายแล้วมาปิดฝา เพื่อไว้ใช้งาน หรือนำไปวัดคุณสมบัติอื่น ๆ ต่อไป
- ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรรวมที่เก็บบรรจุลงในตัวถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองและศึกษาเฟดที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกแพรวะตอมทองคำเข้าไป

การทดลองและศึกษาเฟดที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกแพรวะตอมทองคำเข้าไปไม่มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเฟด ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี และชนิดเอ็น ซึ่งถูกแพรวะตอมของทองคำเข้าไปเพื่อชดเชยให้เป็นฐานรองชนิดอินทรีชนิด ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างของ MOIS หรือมอยซ์เฟด ดังนั้นในการศึกษาดังนี้ จะทำการออกแบบ และทดลองสร้างมอยซ์เฟดบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นต่างชนิดกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอยซ์เฟดที่สร้างขึ้น

##### 4.1.1 การออกแบบและทดลองสร้างมอยซ์เฟดบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดพี ที่ถูกแพรวะด้วยอะตอม

ของทองคำ

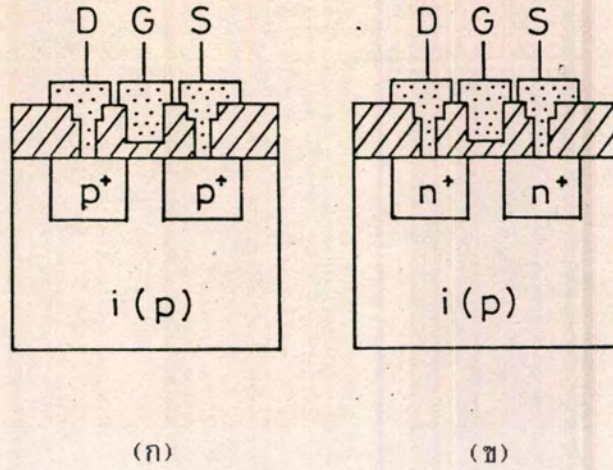
การออกแบบและการสร้าง

ในการศึกษาคุณสมบัติของเฟดที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี ที่ถูกแพรวะด้วยอะตอมของทองคำเข้าไป จึงได้ทำการออกแบบมอยซ์เฟด โดยให้มีโครงสร้างเหมือนกับมอสเฟดทั่วไป กำหนดให้มีขนาดความกว้าง (W) และความยาว (L) ของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 400  $\mu\text{m}$  และ 40  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ แล้วจึงนำมาทดลองสร้างมอยซ์เฟด โดยใช้กระบวนการสร้างที่ 1 ในบทที่ 3 ทำการสร้างทั้งพีมอยซ์เฟด และเอ็นมอยซ์เฟด บนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี

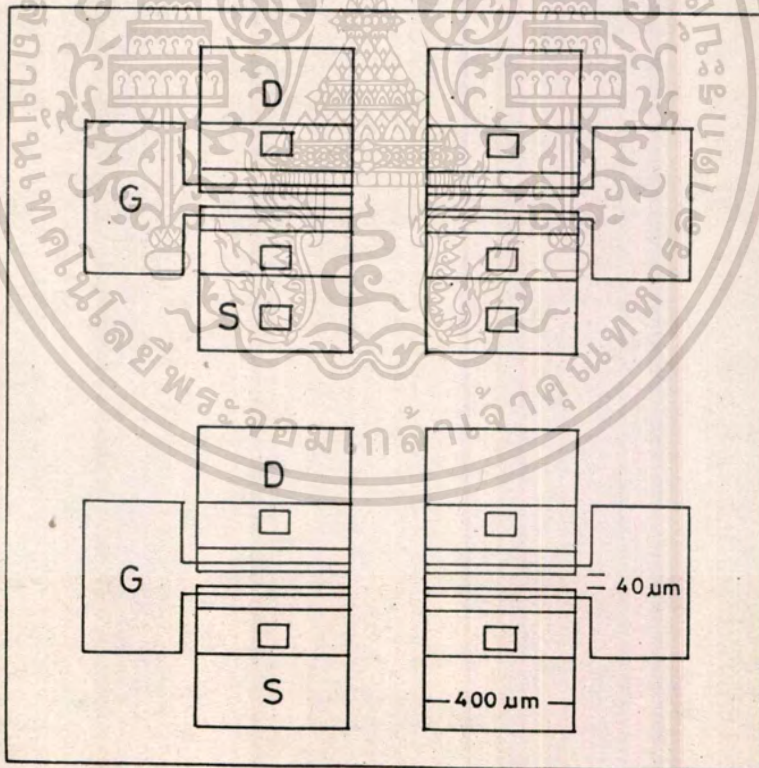
ในกระบวนการสร้างครั้งนี้ เลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระนาบ (100) มีพิสัยความต้านทาน 20 - 50  $\Omega\text{-cm}$ . นำมาทำการทดลองสร้างพีมอยซ์เฟดบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี ซึ่งถูกแพรวะด้วยอะตอมของทองคำจนมีสภาพเป็นฐานรองชนิดอินทรีชนิดซุดหนึ่ง และเอ็นมอยซ์เฟดที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี ซึ่งถูกแพรวะด้วยอะตอมของทองคำจนมีสภาพเป็นฐานรองชนิดอินทรีชนิดซุดอีกหนึ่ง ซึ่งภาพตัดขวางโครงสร้างของพีมอยซ์เฟด แสดงดังรูปที่ 4.1 ก. และเอ็นมอยซ์เฟด แสดงดังรูปที่ 4.1 ข. ตามลำดับ แผนภาพด้านบนของทั้งพีมอยซ์เฟด และเอ็นมอยซ์เฟด ที่ใช้เป็นต้นแบบในการสร้างแสดงดังรูปที่ 4.2 หลังจากผ่านกระบวนการสร้างเสร็จแล้ว ได้ภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานจริงแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรรค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

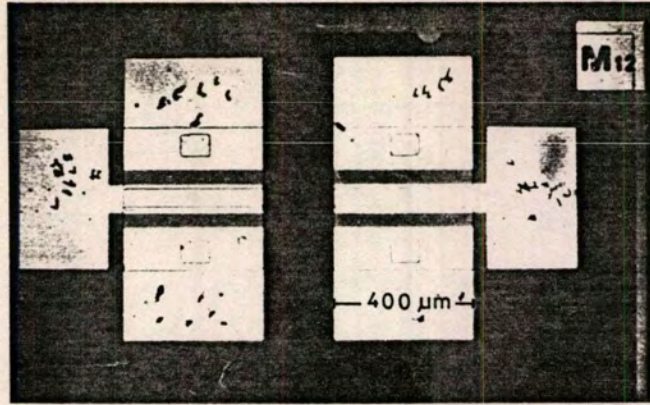


รูปที่ 4.1 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของ ก. ีเอ็มเอชพีเฟต และ ข. เอ็นเอ็มเอชพีเฟต ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดพีที่ถูกละแวกเพื่ออะตอมของทองคำเข้าไป



รูปที่ 4.2 แสดงลวดลายวงจรรวมของมอซซีเฟตที่ออกแบบ

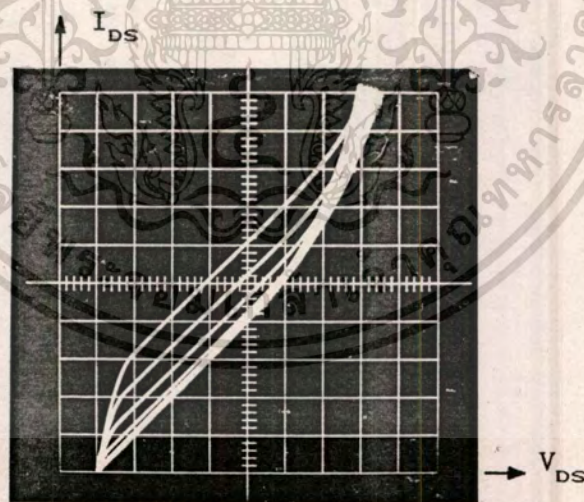
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายมอยซ์เฟตจากชิ้นงาน

การทดลองและผลการทดลอง

จากนี้ให้นำมอยซ์เฟตและอินเวมอยซ์เฟตที่สร้างขึ้นมาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V characteristic) โดยใช้ Curve Tracer ได้ผลการวัดแสดงดังรูป 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



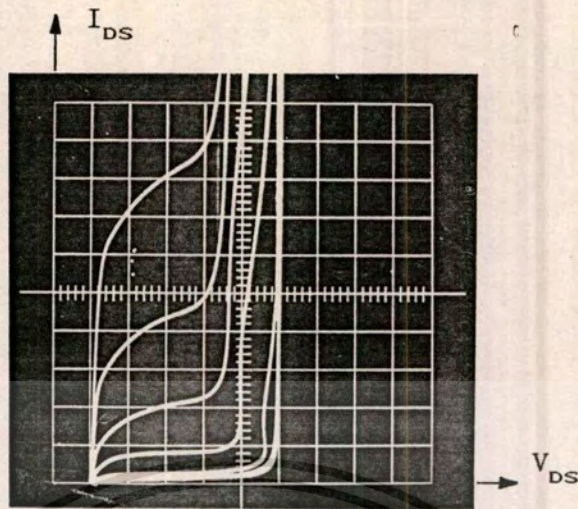
$$w = 400 \mu\text{m}, L = 40 \mu\text{m}$$

Ver. : 0.5 mA/div., Hor. : 5 V/div.,  $V_{gs}$  : 1 V/step, 7 steps

รูปที่ 4.4 แสดง I-V char. ของมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพี

ที่ถูกแพรวด้วยอะตอมของทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$w = 400 \mu\text{m}, L = 40 \mu\text{m}$$

Ver. : 0.02 mA/div., Hor. : 2 V/div.,  $V_{gs}$  : 2 V/step, 7 steps

รูปที่ 4.5 แสดง I-V char. ของเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพี  
ที่ถูกแพรวด้วยอะตอมของทองคำ

จากผลการทดลอง ดังในรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นว่าเฟตที่มีโครงสร้างแบบ MOIS ทั้งแบบพีแซนแนล หรือพีมอยซ์เฟต และแบบเอ็นแซนแนล หรือเอ็นมอยซ์เฟต ที่สร้างบนฐานรองเริ่มต้นชนิดพี ซึ่งถูกแพรวด้วยอะตอมของทองคำ ต่างก็ให้คุณสมบัติ เช่นเดียวกับเฟตที่มีโครงสร้างแบบมอสโดยทั่วไป แต่พีมอยซ์เฟตในรูปที่ 4.4 แสดงช่วงกระแสอิ่มตัว (saturation) ไม่ชัดเจนนัก กล่าวคือเมื่อแรงดัน  $V_{DS}$  มีค่าเพิ่มขึ้น กระแส  $I_{DS}$  จะเพิ่มขึ้น และเข้าสู่สภาวะ Breakdown ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้อาจเป็นผลเนื่องจากลักษณะและขนาดทางเรขาคณิต ( $w/L$ ) ของตัวเฟตเอง หรือเป็นผลของกระแสรั่วไหลที่ผิว เพราะความไม่สมบูรณ์ของชั้นออกไซด์ หรือชั้นฉนวนบริเวณแซนแนล ซึ่งจะต้องทำการศึกษาต่อไป

สำหรับเอ็นมอยซ์เฟตในรูปที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  และแรงดัน  $V_{DS}$  เหมือนกับเฟตแบบมอสโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามคุณสมบัติที่ได้มีลักษณะคล้ายกับการทำงานของมอสแบบดีพลีชันโหมด

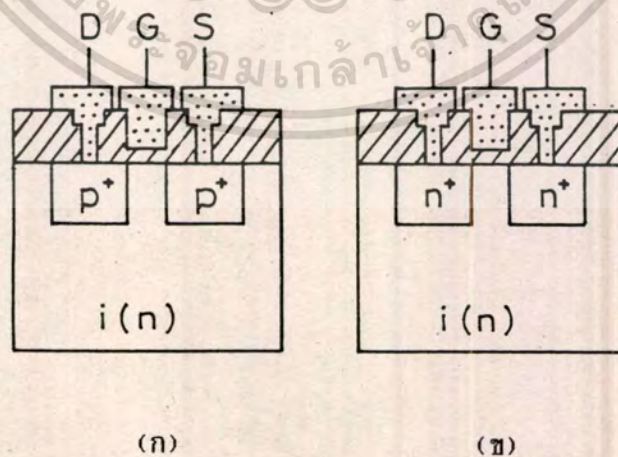
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การออกแบบและทดลองสร้างมอยซ์เฟตบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำ

##### การออกแบบและการสร้าง

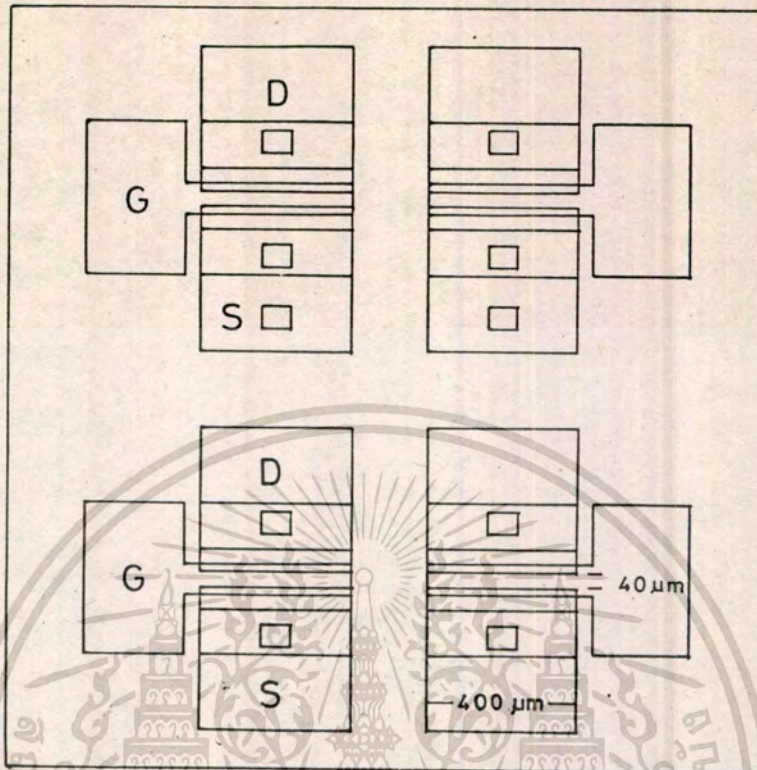
ในการศึกษาคุณสมบัติของเฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำเข้าไป เนื่องจากมอยซ์เฟตที่ทำการทดลองสร้างในครั้งนี้มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับมอยซ์เฟตที่ทำการทดลองในตอนที่ 4.1.1 ดังนั้นจึงใช้ต้นแบบของมอยซ์เฟตที่ได้ออกแบบไว้ในตอนที่ 4.1.1 โดยมีขนาดความกว้าง ( $w$ ) และความยาว ( $L$ ) ของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ  $400 \mu\text{m}$  และ  $40 \mu\text{m}$  ตามลำดับ แล้วจึงนำมาทดลองสร้างมอยซ์เฟต โดยใช้กระบวนการสร้างที่ 1 ในบทที่ 3 ทำการสร้างทั้งพีมอยซ์เฟต และเอ็นมอยซ์เฟต บนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น

ในกระบวนการสร้างครั้งนี้ เลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น หนา  $100 \mu\text{m}$  มีพิสัยความต้านทาน  $5 - 8 \Omega\text{-cm}$ . นำมาทำการทดลองสร้างพีมอยซ์เฟตบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น ซึ่งถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำจนมีสภาพเป็นฐานรองชนิดอินทรีชนิดซุดหนึ่ง และเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น ซึ่งถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำจนมีสภาพเป็นฐานรองชนิดอินทรีชนิดอีกซุดหนึ่งซึ่งขาดขวางโครงสร้างของพีมอยซ์เฟต แสดงดังรูปที่ 4.6 ก. และเอ็นมอยซ์เฟต แสดงดังรูปที่ 4.6 ข. ตามลำดับ แผนภาพด้านบนของทั้งพีมอยซ์เฟต และเอ็นมอยซ์เฟต ที่ใช้เป็นต้นแบบในการสร้าง แสดงดังรูปที่ 4.7 หลังจากผ่านกระบวนการสร้างเสร็จแล้ว ได้ภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานจริงแสดงในรูปที่ 4.8

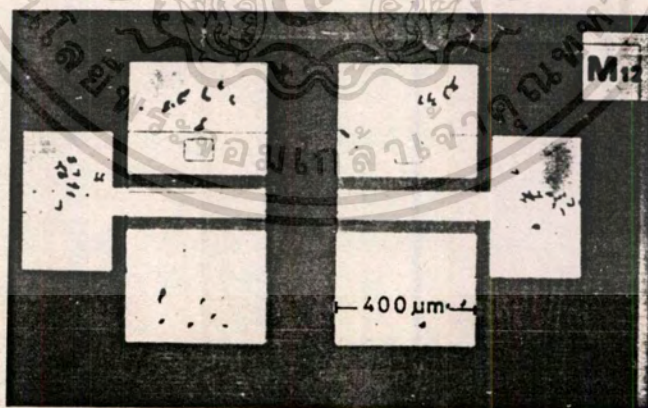


รูปที่ 4.6 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของ ก. พีมอยซ์เฟต และ ข. เอ็นมอยซ์เฟต ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำ เข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงลวดลายวงจรของมอยซ์เฟดที่ออกแบบ



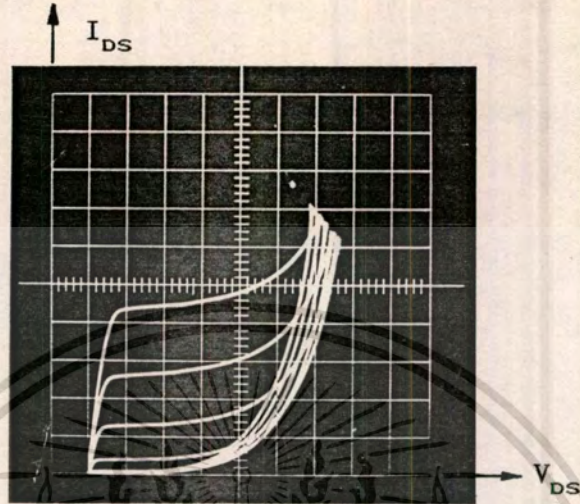
รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายมอยซ์เฟดจากชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองและผลการทดลอง

จากนี้ให้นำมอยซ์เฟตและเอ็นเมอซ์เฟตที่สร้างขึ้นมาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V characteristic) โดยใช้ Curve Tracer ได้ผลการวัดแสดงดังรูป 4.9 และ

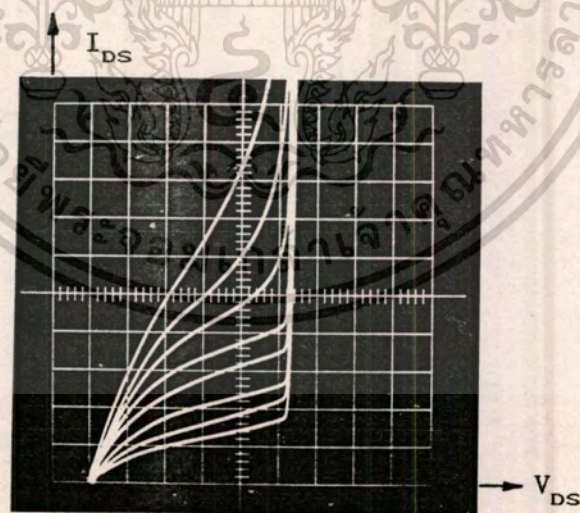
4.10 ตามลำดับ



$$w = 400 \mu\text{m}, L = 40 \mu\text{m}$$

Ver. : 0.2 mA/div., Hor. : 5 V/div.,  $V_{gs}$  : 2 V/step, 7 steps

รูปที่ 4.9 แสดง I-V char. ของมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น ที่ถูกแพรวด้วยอะตอมของทองคำ



$$w = 400 \mu\text{m}, L = 40 \mu\text{m}$$

Ver. : 0.02 mA/div., Hor. : 2 V/div.,  $V_{gs}$  : 1 V/step, 7 steps

รูปที่ 4.10 แสดง I-V char. ของเอ็นเมอซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น

ที่ถูกแพรวด้วยอะตอมของทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองตอนที่ 4.1.1 และ 4.1.2 จะเห็นได้ว่า ทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ MOIS FET ทั้งชนิดพีแชนแนล และเอ็นแชนแนล ที่สร้างบนฐานร่องชนิดพี หรือชนิดเอ็นซึ่งถูกแพร์ด้วย อะตอมของทองคำ ต่างก็ให้คุณสมบัติการทำงานได้เช่นเดียวกับ MOS FET ทั้ง ๆ ใด

#### 4.1.3 การศึกษาผลของขนาดโครงสร้างของช่องทางเดินกระแสต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและแรงดันของมอยซ์เฟด

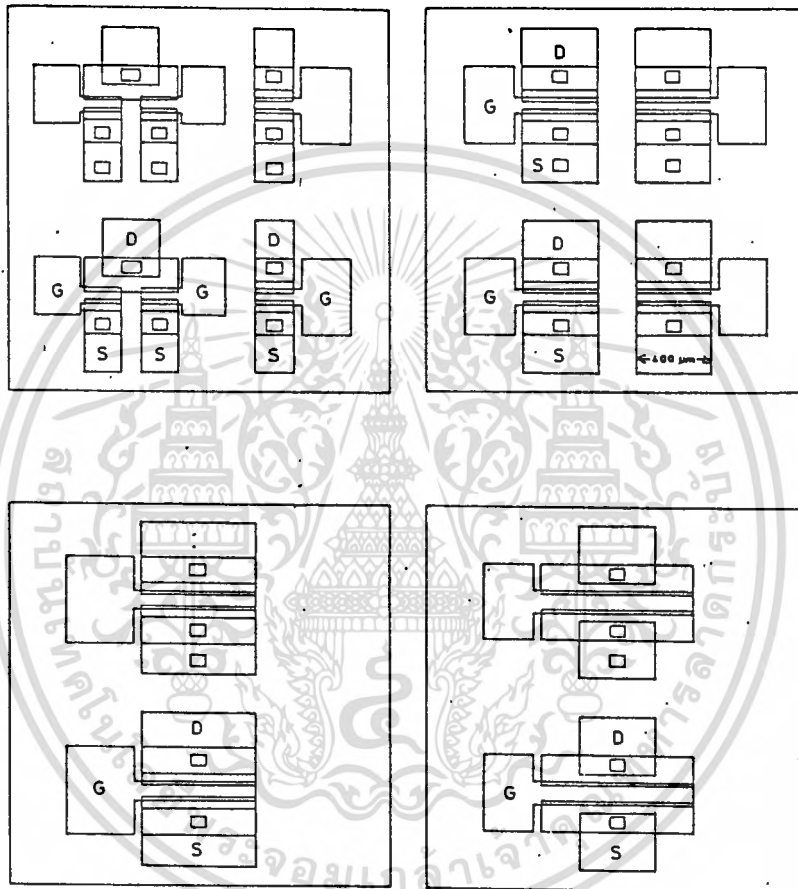
จากผลการทดลองตอนที่ 4.1.1 ซึ่งเป็นการสร้างมอยซ์เฟด ที่มีขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) เท่ากับ  $400 \mu\text{m}$  และความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) เท่ากับ  $40 \mu\text{m}$  บนฐานร่องเริ่มต้นชนิดพีพื้น ช่วงอิมิตัวของกระแส  $I_{DS}$  ในกราฟ  $I-V$  char. จะมีลักษณะเป็นความชันเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟจะคล้าย ๆ กับกรณีของ short channel effect ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาถึงผลอันนี้ จึงได้ทำการทดลองออกแบบมอยซ์เฟด ให้มีขนาดของความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) มีค่าเป็น  $60 \mu\text{m}$  และ  $80 \mu\text{m}$  และ เนื่องจากเราจะคงค่าอัตราส่วนของ  $w/L$  ไว้ให้เท่ากับ 10 เหมือนกับขนาดของมอยซ์เฟดในตอน 4.1.1 และ 4.1.2 ดังนั้นเราจึงต้องเพิ่มค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) ด้วย โดยให้มีค่า  $w = 600 \mu\text{m}$  และ  $800 \mu\text{m}$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำการลดขนาดของช่องทางเดินกระแสลงโดยสันนิษฐานว่าการที่กระแส  $I_{DS}$  ไหลเป็นลักษณะของความชันขึ้นไปนั้น อาจเกิดจากการกำหนดให้มีกระแส  $I_{DS}$  ไหลมากเกินไป ดังนั้นจึงทำการออกแบบให้มอยซ์เฟดมีขนาดของช่องทางเดินกระแสเล็กลง ซึ่งกำหนดให้  $w/L = 5$  โดยที่  $w = 200 \mu\text{m}$  และ  $L = 40 \mu\text{m}$  อีกค่าหนึ่งด้วย

##### 4.1.3.1 การศึกษาผลของขนาดโครงสร้างของช่องทางเดินกระแสต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและแรงดันของมอยซ์เฟด

###### การออกแบบและการสร้าง

จากการออกแบบและทดลองสร้าง ให้มอยซ์เฟดมีอัตราส่วนของขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส  $L$  ต่อความกว้างของช่องทางเดินกระแส  $w$  เป็น  $40/200$ ,  $40/400$ ,  $60/600$  และ  $80/800 \mu\text{m}$  กระบวนการสร้างใช้กระบวนการสร้างที่ 1 ในบทที่ 3 โดยจะทดลองสร้างมอยซ์เฟด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนฐานรองเริ่มต้นชนิดพีซุดหนึ่ง และสร้างบนฐานรองเริ่มต้นชนิดเอ็นอีกซุดหนึ่ง เพื่อเปรียบเทียบผลของขนาดของช่องทางเดินกระแสต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของพีมอยซ์เฟด ที่สร้างบนฐานรองต่างชนิดกัน แผนภาพลวดลายด้านบนแสดงขนาดต่าง ๆ ของพีมอยซ์เฟดที่ได้ออกแบบเพื่อการทดลองในครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 4.11

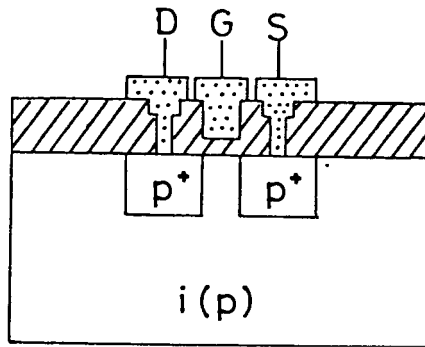


รูปที่ 4.11 แสดงขนาดและลวดลายของพีมอยซ์เฟดที่ออกแบบ

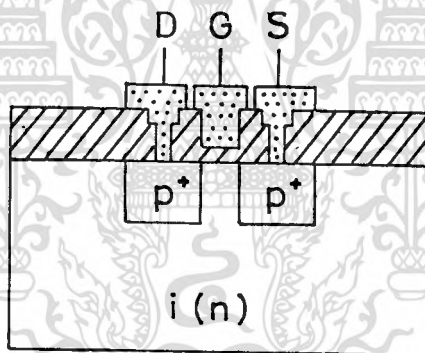
ในการทดลองสร้างพีมอยซ์เฟดตามกระบวนการสร้างที่ 1 ในบทที่ 3 เพื่อการทดลองในครั้งนี้ทำโดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี หนา  $(100)$  มีกััดความต้านทาน  $20 - 50 \Omega\text{-cm}$ . ซุดหนึ่ง และแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น หนา  $(100)$  มีกััดความต้านทาน  $5 - 8 \Omega\text{-cm}$ . อีกซุดหนึ่ง ซึ่งหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างดังกล่าวจะได้พีมอยซ์เฟดที่มีโครงสร้างแสดงดังภาพตัดขวางในรูปที่

4.12 ก. และ 4.12 ข. ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ก. แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของโมยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดนี้ ซึ่งถูกแพร่อะตอมของทองคำเข้าไป



รูปที่ 4.12 ข. แสดงภาพตัดขวางของโมยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็น ซึ่งถูกแพร่อะตอมของทองคำเข้าไป

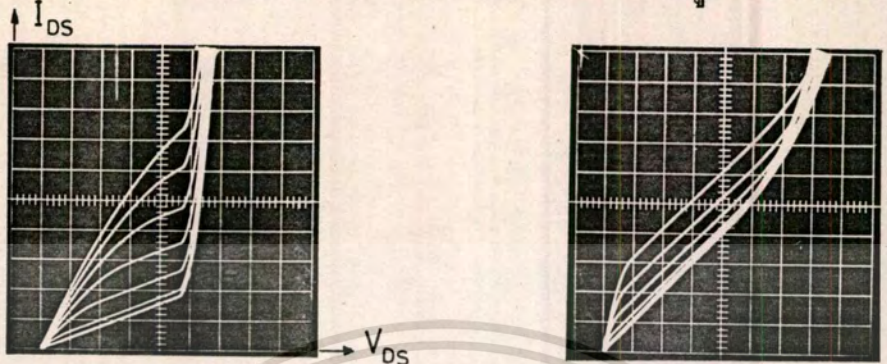
รูปที่ 4.12 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของโมยซ์เฟตที่สร้างขึ้น

(ก) จากฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดนี้

(ข) จากฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็น

การทดลองและผลการทดลอง

นำฟิล์มยอซ์เฟตที่สร้างขึ้นจากฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นแต่ละชนิด มาทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V char.) ได้ผลการทดลองแสดงดังในรูป 4.13 และ 4.14

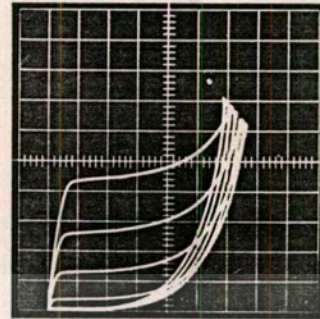
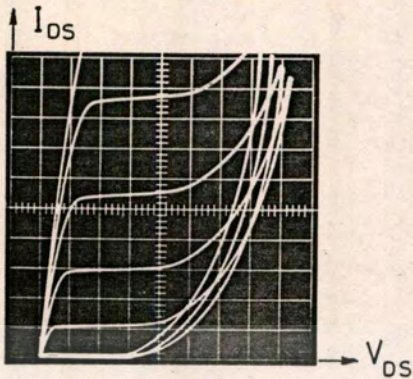


- |    |                                   |    |                                   |
|----|-----------------------------------|----|-----------------------------------|
| ก) | $w = 200 \mu\text{m}$             | ข) | $w = 400 \mu\text{m}$             |
|    | $L = 40 \mu\text{m}$              |    | $L = 40 \mu\text{m}$              |
|    | Ver. : 0.5 mA/div.                |    | Ver. : 0.5 mA/div.                |
|    | Hor. : 2 V/div.                   |    | Hor. : 5 V/div.                   |
|    | $V_g : 2 \text{ V/step, 7 steps}$ |    | $V_g : 1 \text{ V/step, 7 steps}$ |



- |    |                                   |    |                                   |
|----|-----------------------------------|----|-----------------------------------|
| ค) | $w = 600 \mu\text{m}$             | ง) | $w = 800 \mu\text{m}$             |
|    | $L = 60 \mu\text{m}$              |    | $L = 80 \mu\text{m}$              |
|    | Ver. : 0.5 mA/div.                |    | Ver. : 0.5 mA/div.                |
|    | Hor. : 5 V/div.                   |    | Hor. : 5 V/div.                   |
|    | $V_g : 1 \text{ V/step, 7 steps}$ |    | $V_g : 1 \text{ V/step, 7 steps}$ |

รูปที่ 4.13 แสดง I-V char. ของฟิล์มยอซ์เฟตที่สร้างขึ้นบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)  $w = 200 \mu\text{m}$

ข)  $w = 400 \mu\text{m}$

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

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

Ver. : 0.2 mA/div.

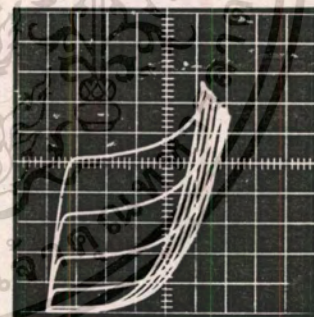
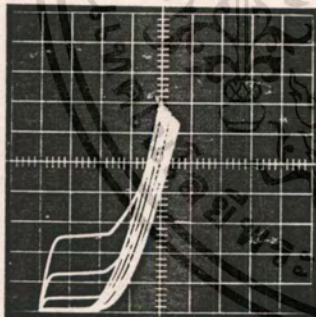
Ver. : 0.2 mA/div.

Hor. : 5 V/div.

Hor. : 5 V/div.

$V_g$  : 1 V/step, 7 steps

$V_g$  : 2 V/step, 7 steps



ค)  $w = 600 \mu\text{m}$

ง)  $w = 800 \mu\text{m}$

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

$L = 80 \mu\text{m}$

Ver. : 0.2 mA/div.

Ver. : 0.2 mA/div.

Hor. : 5 V/div.

Hor. : 5 V/div.

$V_g$  : 1 V/step, 7 steps

$V_g$  : 1 V/step, 7 steps

รูปที่ 4.14 แสดง I-V char. ของพินมอซซีเฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

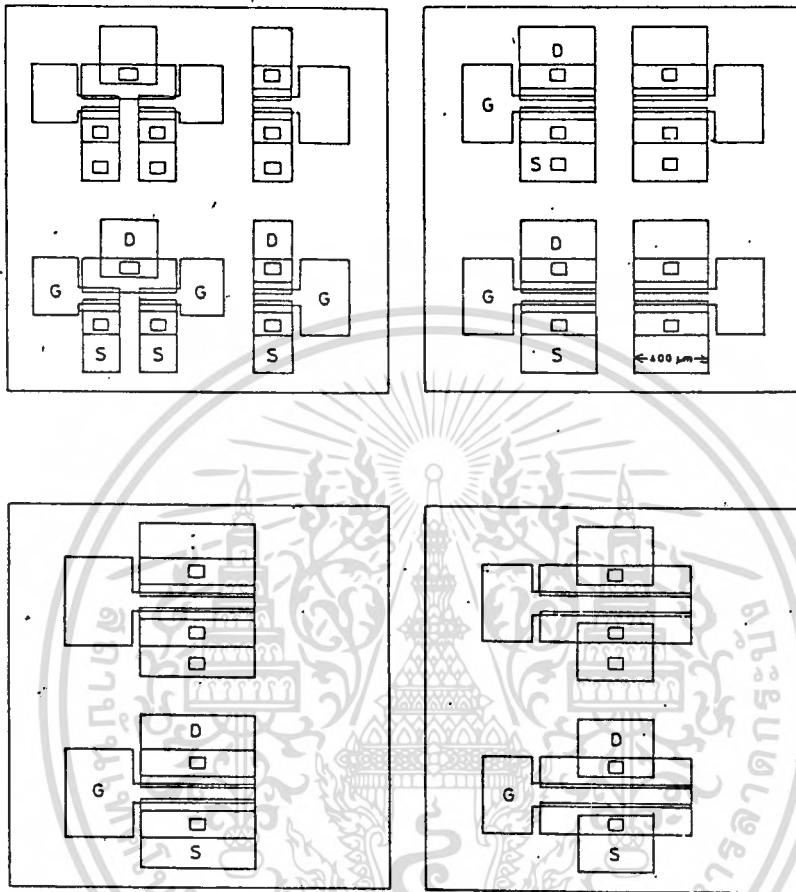
ผลการทดลองวัดคุณสมบัติ I-V char. ของพินมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นทั้งชนิดนี้ จะเห็นว่ามอยซ์เฟตที่มีขนาดความยาวแชนแนลต่าง ๆ กันโดย  $L = 40, 60$  และ  $80 \mu\text{m}$  ที่มีอัตราส่วน  $w/L = 10$  แสดงดังในรูปที่ 4.13 ข), ค), ง) ตามลำดับ ต่างก็ให้คุณสมบัติความสัมพันธ์ I-V char. ที่คล้ายกันโดยที่ไม่ปรากฏช่วงกระแสอิ่มตัวที่ชัดเจน จึงพอสรุปได้ว่าลักษณะกราฟของกระแสไม่ได้เป็นผลเนื่องมาจากกรณีของ short channel effect สำหรับในกรณีที่ว่า  $w = 200 \mu\text{m}$  และ  $L = 40 \mu\text{m}$  ซึ่งมีอัตราส่วน  $w/L = 5$ , แสดงดังในรูปที่ 4.13 ก) จะเห็นได้ชัดว่าลักษณะของช่วงกระแสอิ่มตัวปรากฏชัดเจนขึ้น และเหมือนกับลักษณะ I-V char. ของ MOS FET ทั่ว ๆ ไป ในกรณีที่ค่า  $w/L = 5$  จึงสรุปได้ว่าลักษณะ I-V char. ดังกล่าวจะมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องทางเดินกระแส

สำหรับผลการทดลองกรณีของพินมอยซ์ที่สร้างบนฐานรอง เริ่มต้นชนิดอื่น แสดงดังในรูปที่ 4.14 ก) - ง) ซึ่งจะมีขนาดของช่องทางเดินกระแสต่าง ๆ กันต่างก็ให้ลักษณะของกราฟ I-V char. เหมือนกับ MOS FET ทั่ว ๆ ไป ซึ่งลักษณะของกราฟ I-V char. จะแสดงให้เห็นโหมดการทำงานเป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนท์โหมด

#### 4.1.3.2 การศึกษาผลของขนาด โครงสร้างของช่องทางเดินกระแสต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ เอ็นมอยซ์เฟต

##### การออกแบบและการสร้าง

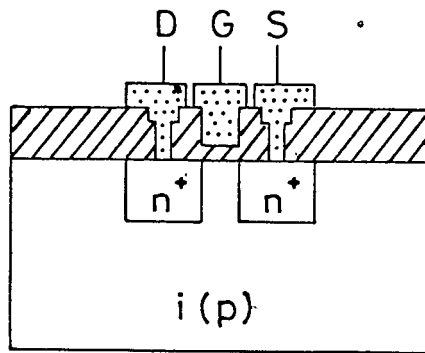
จากการออกแบบพินมอยซ์เฟต ที่มีขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) และความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) ให้มีขนาดต่าง ๆ กันคือ มีขนาด  $w/L$  เป็น  $40/200 \mu\text{m}$ ,  $40/400 \mu\text{m}$ ,  $60/600 \mu\text{m}$  และ  $80/800 \mu\text{m}$  นั้นจะได้นำต้นแบบของพินมอยซ์เฟตมาใช้สร้างเอ็นมอยซ์เฟตด้วย เพื่อศึกษาผลของขนาดช่องทางเดินกระแส ต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ของเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรอง เริ่มต้นต่างชนิดกัน แผนภาพลวดลายด้านบนแสดงขนาดต่าง ๆ ของเอ็นมอยซ์เฟตที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 4.15



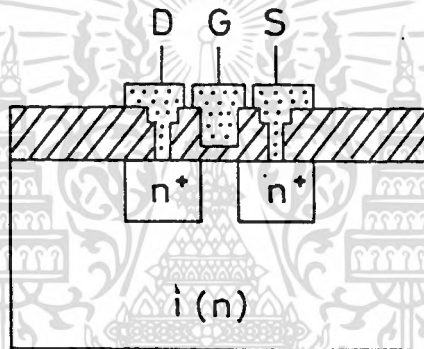
รูปที่ 4.15 แสดงขนาดและลวดลายของเอ็นเมอซซ์เฟดที่ออกแบบ

ในการทดลองสร้างเอ็นเมอซซ์เฟดจะเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระบาย (100) มีพื้นที่ความต้านทาน 20 - 50 Ω-cm. ชุดหนึ่ง และแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ระบาย (100) มีพื้นที่ความต้านทาน 5 - 8 Ω-cm. อีกชุดหนึ่ง นำไปทดลองสร้างเอ็นเมอซซ์เฟดตามกระบวนการสร้างที่ 1 ในบทที่ 3 ซึ่งหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างดังกล่าวจะได้เอ็นเมอซซ์เฟดที่มีโครงสร้างแสดงดังภาพตัดขวางในรูปที่ 4.16 ก. และ 4.16 ข.ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ก. แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของเอ็นเมอซซีเฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี ซึ่งถูกแพรวะต่อมของทองคำเข้าไป



รูปที่ 4.16 ข. แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของเอ็นเมอซซีเฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น ซึ่งถูกแพรวะต่อมของทองคำเข้าไป

รูปที่ 4.16 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของเอ็นเมอซซีเฟตที่สร้างขึ้น

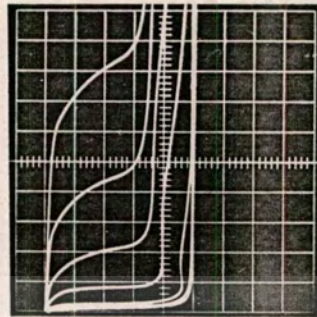
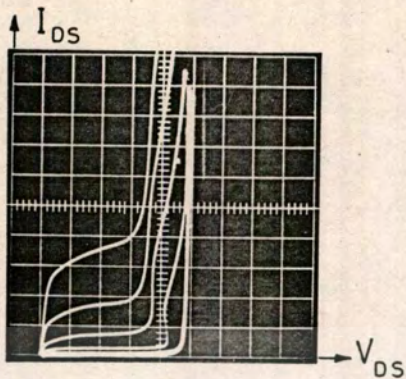
(ก) จากฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี

(ข) จากฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น

#### การทดลองและผลการทดลอง

จากนี้ให้นำเอ็นเมอซซีเฟตที่สร้างขึ้นจากฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี มาทำการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V char.) ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังในรูป 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)  $w = 200 \mu\text{m}$

ข)  $w = 400 \mu\text{m}$

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

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

Ver. : 0.2 mA/div.

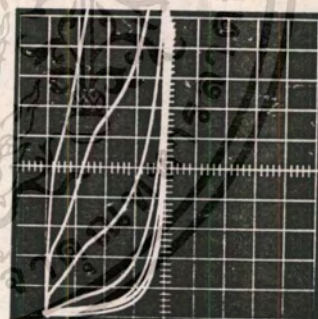
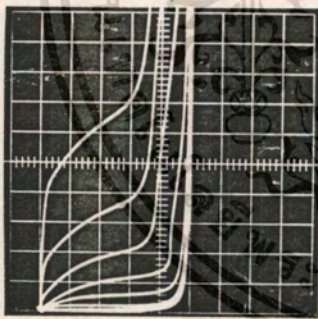
Ver. : 0.2 mA/div.

Hor. : 2 V/div.

Hor. : 2 V/div.

$V_{gs} : 2 \text{ V/step, 7 steps}$

$V_{gs} : 2 \text{ V/step, 7 steps}$



ค)  $w = 600 \mu\text{m}$

ง)  $w = 800 \mu\text{m}$

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

$L = 80 \mu\text{m}$

Ver. : 0.2 mA/div.

Ver. : 0.2 mA/div.

Hor. : 2 V/div.

Hor. : 2 V/div.

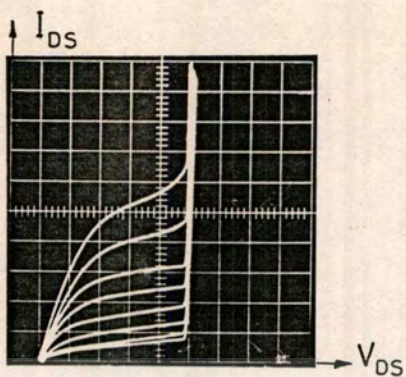
$V_{gs} : 2 \text{ V/step, 7 steps}$

$V_{gs} : 2 \text{ V/step, 7 steps}$

รูปที่ 4.17 แสดง I-V char. ของเอ็นเอมอซซีเฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

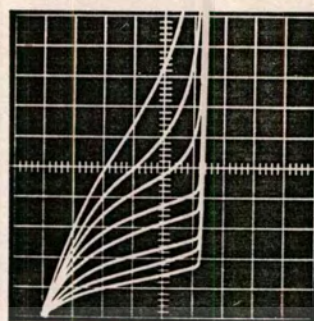


ก)  $w = 200 \mu\text{m}$   
 $L = 40 \mu\text{m}$

Ver. : 0.02 mA/div.

Hor. : 2 V/div.

$V_g$  : 1 V/step, 7 steps

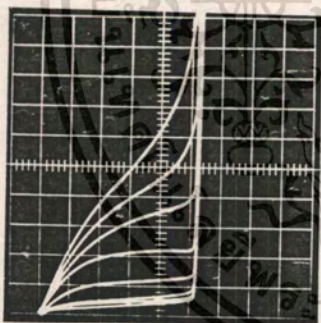


ข)  $w = 400 \mu\text{m}$   
 $L = 40 \mu\text{m}$

Ver. : 0.02 mA/div.

Hor. : 2 V/div.

$V_g$  : 1 V/step, 7 steps

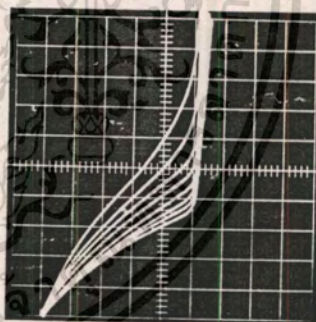


ค)  $w = 600 \mu\text{m}$   
 $L = 60 \mu\text{m}$

Ver. : 0.02 mA/div.

Hor. : 2 V/div.

$V_g$  : 1 V/step, 7 steps



ง)  $w = 800 \mu\text{m}$   
 $L = 80 \mu\text{m}$

Ver. : 0.02 mA/div.

Hor. : 2 V/div.

$V_g$  : 1 V/step, 7 steps

รูปที่ 4.18 แสดง I-V char. ของเอ็นเมอชพีเฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่วารณมีใดคทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นว่า กรณีเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองเริ่มต้นชนิดพี ที่มีขนาด  $w/L$  ต่าง ๆ กัน จะให้คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันแสดงดังในรูปที่ 4.17 เช่นเดียวกับคุณสมบัติ I-V char. ของเอ็นมอสเฟตทั่วไป แต่เป็นลักษณะของดีฟลิกชัน โหมด กรณีเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองเริ่มต้นชนิดเอ็น จะให้คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันแสดงดังในรูปที่ 4.18 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเอ็นมอสเฟตโดยทั่วไป ในลักษณะของดีฟลิกชัน โหมด

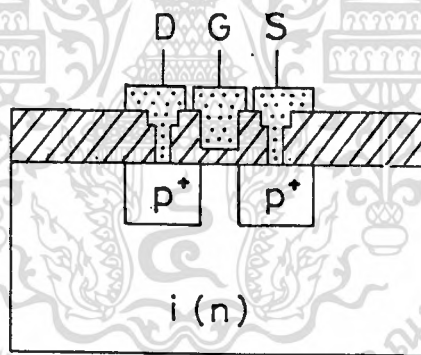
จากผลการทดลองในตอนที 4.1 นี้สรุปได้ว่า มอยซ์เฟตทั้งชนิดเอ็นเช่นเนล และพีเช่นเนล สามารถสร้างได้บนฐานรองชนิดเอ็น หรือพีที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำ อีกในหนึ่งก็คือเฟตแบบ MOIS สามารถให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับเฟตแบบ MOS ทั่ว ๆ ไปได้ โดยถ้าเลือกใช้ฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี จะต้องทำการเลือกค่าพิกัดความต้านทานให้มีค่าสูงมากกว่า 20 - 50  $\Omega\text{-cm}$ . และต้องกำหนดขนาดของช่องทางเดินกระแส ( $w/L$ ) ให้มีค่าต่ำ ๆ ( $< 5$ ) จึงจะทำให้ได้มอยซ์เฟตที่คุณสมบัติ I-V char. เหมือนกับมอสเฟตทั่ว ๆ ไปด้วย ส่วนกรณีที่ใช้ฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นเป็นชนิดเอ็นสามารถนำมาใช้สร้างมอยซ์เฟตซึ่งให้คุณสมบัติ I-V char. ได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ดี จะต้องมีการปรับปรุง และแก้ไข กระบวนการสร้าง เพื่อให้ได้มอยซ์เฟตที่มีการทำงานในลักษณะแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ โหมดที่สมบูรณ์ ในการศึกษาและวิจัยต่อ ๆ ไปจะเลือกใช้ฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็นเป็นฐานรองเริ่มต้น สำหรับใช้ในการสร้างเพื่อศึกษาเรื่องของมอยซ์เฟตต่อไป

## 4.2. การศึกษาคุณสมบัติของมอยซ์เฟตที่มีการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

### 4.2.1 การทดลองและผลการทดลองวัดคุณสมบัติของมอยซ์เฟต ที่มีการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด การออกแบบและการสร้าง

การศึกษาคุณสมบัติของมอยซ์เฟตที่มีการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด เป็นการศึกษา และทดลอง เพื่อวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็นแล้วเปลี่ยนให้เป็นอินทรินซิค โดยการเติมอะตอมของทองคำเข้าไปในฐานรองซิลิกอน ทำให้ได้มอยซ์เฟตที่มีโครงสร้างดังโครงสร้างภาพตัดขวางในรูปที่ 4.19 มอยซ์เฟตที่ใช้ในการทดลองนี้ จะมีขนาดความกว้าง ( $w$ ) และความยาว ( $L$ ) ของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ  $200 \mu\text{m}$  และ  $20 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ในกระบวนการสร้างครั้งนี้ เลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ (100) มีพิสัยความต้านทาน  $5 - 8 \Omega\text{-cm}$ . ทำการสร้างมอยซ์เฟตตามกระบวนการสร้างที่ 1 ในบทที่ 3



รูปที่ 4.19 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็น ซึ่งถูกแพร่อะตอมของทองคำเข้าไป

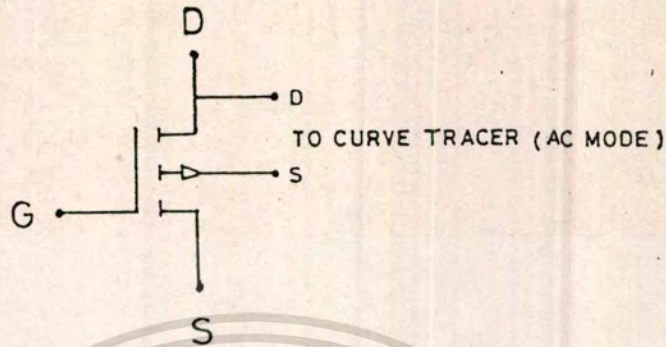
#### การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับมอยซ์เฟตที่สร้างขึ้นตามกระบวนการสร้างที่ 1 ในบทที่ 3 โดยใช้ฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็นเอ็น มีการทำงานเป็นเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด โดยสมบูรณ์ ดังนั้นจึงนำมอยซ์เฟตที่สร้างขึ้น มาทำการวัดหารอยต่อ p-i และคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ( $I-V \text{ char.}$ )

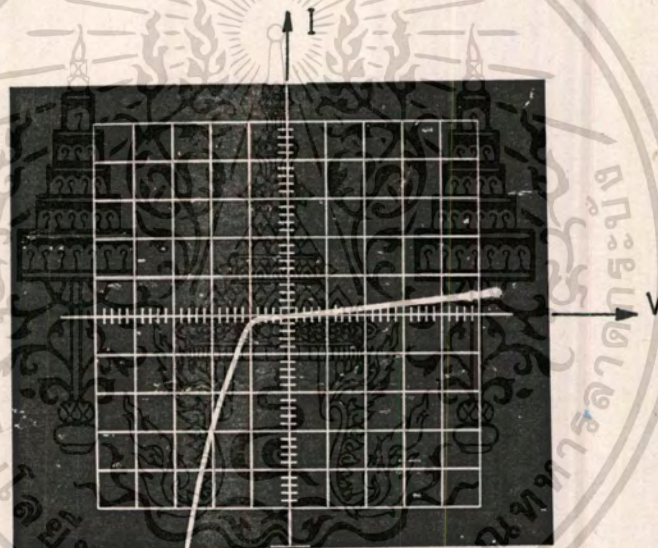
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.1 การทดลองวัดรอยต่อ p-i (p-i junction)

การทดลองวัดรอยต่อ p-i ทำได้โดยการวัดรอยต่อระหว่างเดรนกับฐานรองซิลิกอน โดยใช้ Curve Tracer ซึ่งวงจรการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.20 สำหรับผลการวัดแสดงดังรูป 4.21



รูปที่ 4.20 แสดงวงจรการวัดรอยต่อ p-i



Ver. : 0.1 mA/div., Hor. : 50 V/div.

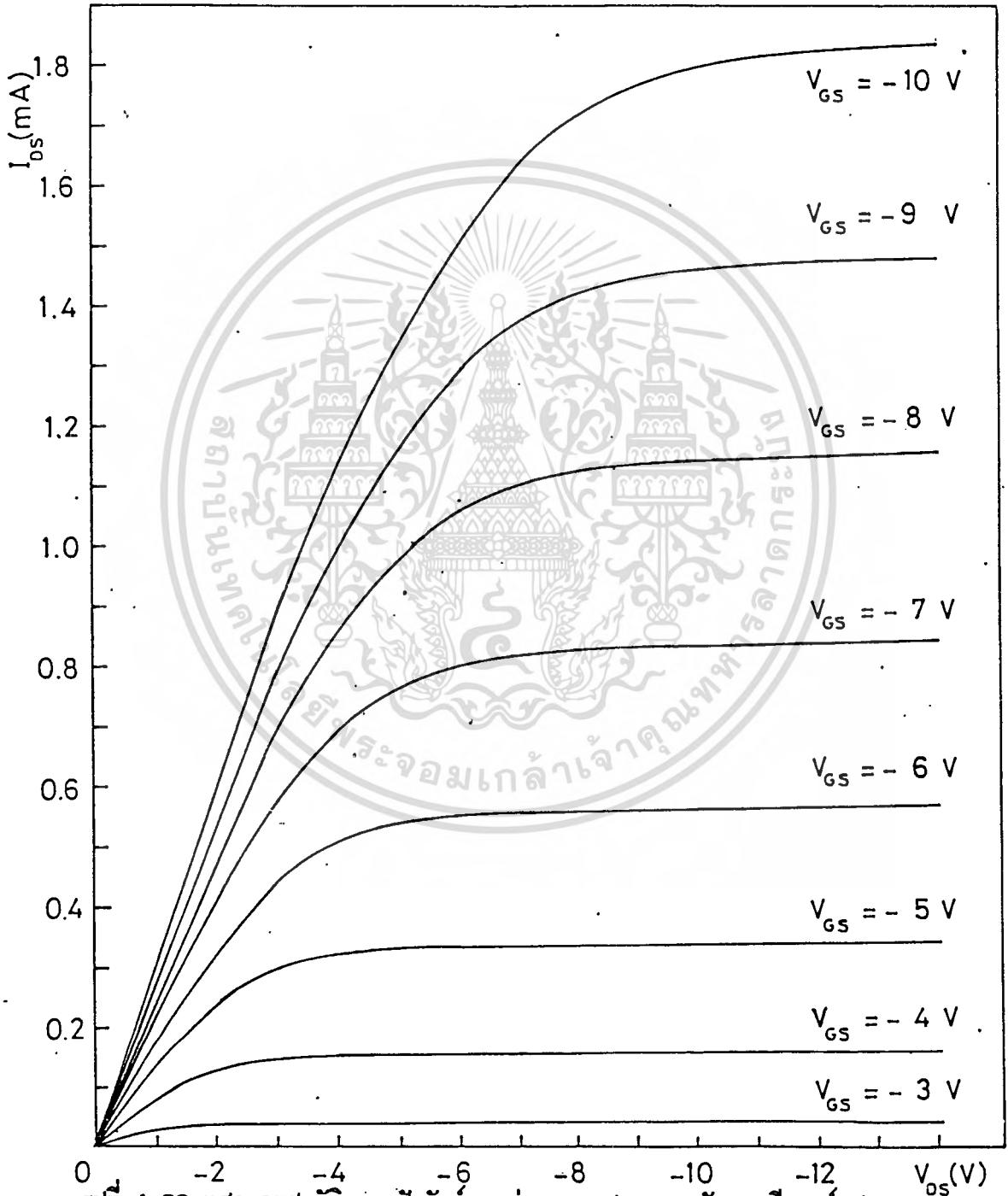
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟ I-V char. ของรอยต่อ p-i ของส่วนเดรนกับฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิค

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 จะพบว่าเกิดมีรอยต่อระหว่างสารเจือชนิดพีกับฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิค (p-i junction) โดยมีค่า Reverse breakdown voltage = 40 V. ส่วนทางด้าน Forward Bias นั้นเนื่องจากค่าความต้านทานของส่วนอินทรีนซิคมีค่ามากทำให้กระแสไหลผ่านได้น้อย จึงไม่สามารถวัดค่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อ (Built-in Voltage) ได้อย่างชัดเจน แต่จะเห็นเป็นลักษณะของเส้นกราฟที่มีความชันค่าสูง ๆ ซึ่งก็คือค่าของความต้านทานในส่วนอินทรีนซิค (i)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.2 การทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V char.)

นำโมยซ์เฟตที่สร้างขึ้นมาทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยใช้เครื่องบันทึก 2 แกนบันทึกผล ผลจากการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังกล่าว แสดงดังรูป 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโมยซ์เฟต

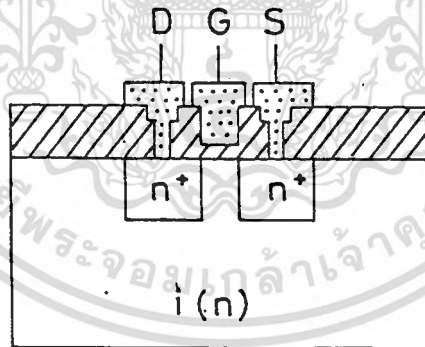
ที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$  บันทึกด้วยเครื่องบันทึก 2 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นการใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าขณะที่แรงดันที่เกต ( $V_G$ ) มีค่าเป็นศูนย์ กระแสเดรน-ซอส ( $I_{DS}$ ) จะไม่ไหลจนกระทั่งแรงดันระหว่างเดรน-ซอส ( $V_{DS}$ ) มีค่าเท่ากับค่า Reverse Breakdown Voltage ระหว่างเดรนกับฐานรองจึงจะเกิดกระแส  $I_{DS}$  ไหล ซึ่งกลไกการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ อธิบายได้เช่นเดียวกับการเกิดในมอสเฟต (MOSFET) ทั่ว ๆ ไป นอกจากนั้นยังพบว่าคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  สามารถถูกควบคุมได้ด้วยแรงดัน  $V_{GS}$  เช่นเดียวกับมอสเฟตชนิดพีแชนแนล

#### 4.2.2 การทดลองและผลการทดลองวัดคุณสมบัติของเอ็นมอยซ์เฟตที่มีการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด การทดลองและผลการทดลอง

การศึกษาคุณสมบัติของเอ็นมอยซ์เฟตที่มีการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด เป็นการศึกษาและทดลองเพื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเอ็นมอยซ์เฟต ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็นแล้ว เปลี่ยนเป็นชนิดอินทรีนิก โดยการเติมอะตอมของทองคำเข้าไปในฐานรอง ทำให้ได้เอ็นมอยซ์เฟตที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็น ซึ่งถูกแพร่อะตอมของทองคำเข้าไป

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเอ็นมอยซ์เฟต (หัวข้อ 4.1.3.2) พบว่าโหมดการทำงานที่ได้จะเป็นดีพลีชันโหมด ซึ่งสังเกตได้จากผลการทดลองจะเห็นว่าขณะที่แรงดันเกตเป็นศูนย์ ยังคงมีกระแสเดรน-ซอสไหลอยู่ได้นั่นเอง แต่เนื่องจากเราต้องการเอ็นมอยซ์เฟตที่มีการทำงานเป็นเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีแก้ไข ซึ่งวิธีแก้ไขที่นิยมใช้กันมากมีอยู่ 2 วิธีคือ การเลือกใช้ฐานรองนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รองซิลิกอนที่มีค่าพิกัดความต้านทานสูง ๆ ( $N_D$  ต่ำ) วิธีนี้มีข้อเสียคือ การเลือกซื้อแผ่นผลึกซิลิกอนตามต้องการนั้นทำได้ยากและมีราคาแพงกว่าแบบธรรมดามาก ดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีหนึ่ง คือการแพร่สารเจือซดเซสเข้าไปในส่วนที่ต้องการควบคุมค่าพิกัดความต้านทานเท่านั้น ซึ่งวิธีนี้เราสามารถเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนที่มีค่าพิกัดความต้านทานค่าต่าง ๆ และยังสามารถปรับปรุงกระบวนการสร้างเพื่อการแพร่ซดเซสได้อย่างเหมาะสมอีกด้วย ดังกระบวนการสร้างที่ 2 สำหรับสร้างเอ็นมอยซ์เฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนท์โหมดที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ในการทดลองตอนนี้ได้ออกแบบให้เอ็นมอยซ์เฟต มีขนาดความกว้าง (w) และความยาว (L) ของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 200  $\mu\text{m}$  และ 20  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ในกระบวนการสร้างครั้งนี้ เลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ (100) มีพิกัดความต้านทาน 5 - 8  $\Omega\text{-cm}$ .

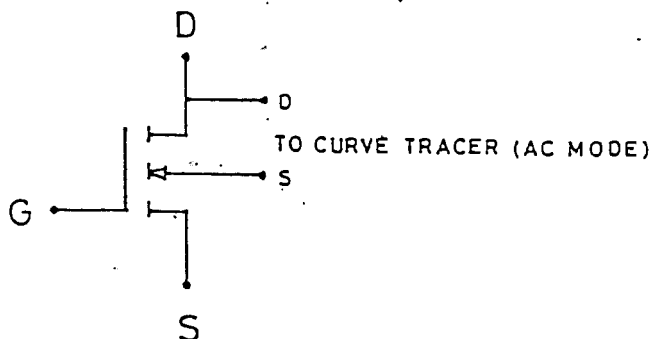
ทำการสร้างเอ็นมอยซ์เฟตตามกระบวนการสร้างที่ 2 ในบทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างขึ้นตามกระบวนการสร้างที่ 2 ในบทที่ 3 โดยใช้ฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็นนั้น จะได้เอ็นมอยซ์เฟตที่มีการทำงานเป็นเอ็นฮานซ์เมนท์โหมด จากนั้นจึงนำเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างขึ้นนั้นมาทำการวัดหาค่ารอยต่อ  $n-i$  และคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V char.)

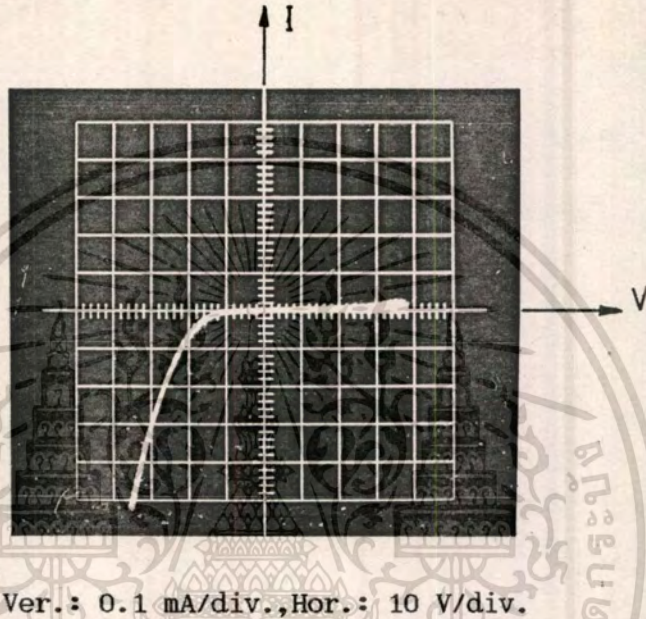
#### 4.2.2.1 การทดลองวัดรอยต่อ $n-i$ ( $n-i$ junction)

การทดลองวัดหาค่ารอยต่อ  $n-i$  เพื่อศึกษาหาการเกิดของรอยต่อระหว่างส่วนเดรนกับส่วนฐานรองที่เป็นอินทรีนซิค ซึ่งทำได้โดยการวัดรอยต่อระหว่างเดรนกับฐานรองของเอ็นมอยซ์เฟต โดยใช้ Curve Tracer วิธีการวัดแสดงดังรูปที่ 4.24 ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 4.24 แสดงวงจรการวัดรอยต่อ  $n-i$  ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.25 จะพบว่าเกิดมีรอยต่อระหว่างสารเจือชนิดเอ็นกับฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิก (n-i junction) โดยมีค่า Reverse breakdown voltage ประมาณ 11 โวลต์ ส่วนทางด้าน Forward Bias นั้นไม่สามารถเห็นค่าของ Built-in Voltage ได้ชัดเจน แต่จะเห็นลักษณะของเส้นกราฟทางด้าน Forward bias มีความชันมากจนเกือบขนานกับแกนนอน ซึ่งค่าความชันก็คือค่าความต้านทานในส่วนอินทรีนซิกที่มีค่ามากนั่นเอง



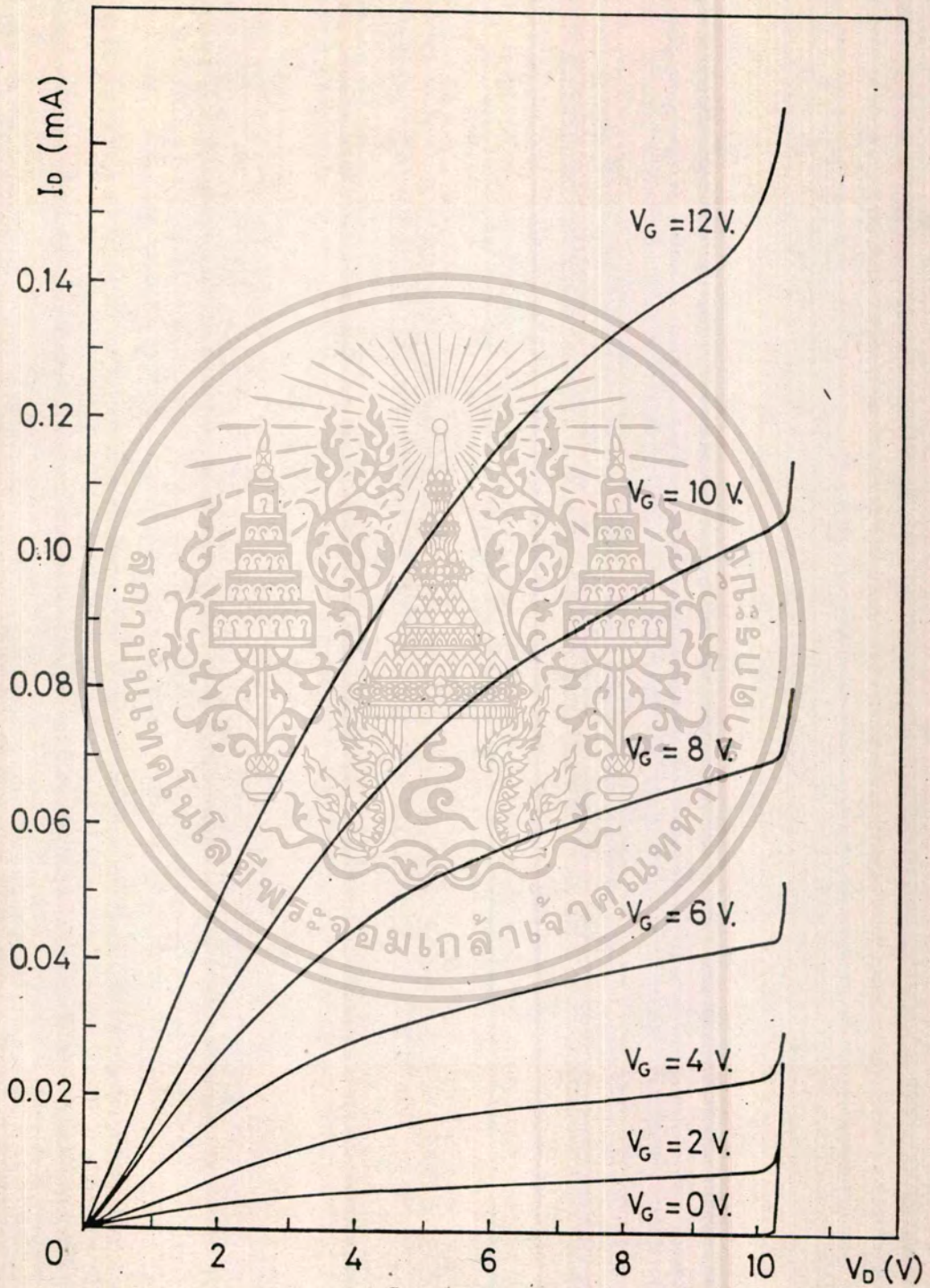
รูปที่ 4.25 แสดงกราฟ I-V char. ของรอยต่อ n-i ส่วนเดียวกับฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิก

#### 4.2.2.2 การทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V char.)

นำเอ็นมอยซ์เฟดที่ทดลองสร้างขึ้น มาทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยใช้เครื่องบันทึก 2 แกน บันทึกผล ผลจากการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังกล่าว แสดงดังรูป 4.26

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าขณะที่แรงดันเกต ( $V_G$ ) มีค่าเป็นศูนย์ (เส้นล่างสุด) กระแสเดรน-ซอส ( $I_{DS}$ ) จะไม่ไหล จนกระทั่งแรงดันเดรน-ซอส ( $V_{DS}$ ) มีค่าเท่ากับค่า Reverse breakdown voltage ระหว่างเดรนกับฐานรอง (ประมาณ 10 โวลต์) จึงจะเกิดกระแส  $I_{DS}$  ไหล และเมื่อค่าแรงดันเกตมีค่าเป็นบวกมากขึ้นเพียงพอจะทำให้เกิดกระแส  $I_{DS}$  ไหลได้ คุณสมบัติดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า เอ็นมอยซ์เฟดมีการทำงานเป็นแบบ เอ็นฮานซ์เม้นท์โหมด โดยสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณิโดยทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

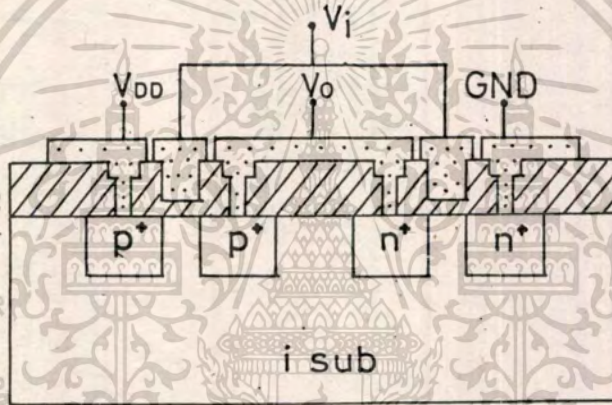


รูปที่ 4.26 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเอ็นเมอชพีเฟต

ที่มีขนาด  $w = 200\ \mu\text{m}$ ,  $L = 20\ \mu\text{m}$  บันทึกด้วยเครื่องบันทึก 2 แกน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น การนำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดลองและการพัฒนาโครงสร้างคอมพลิเมนต์ารีมอยซ์ (CMOIS)

จากการศึกษาและทดลองสร้างมอยซ์เฟดตัวเดียว ๆ ทำให้เราสามารถสร้างมอยซ์เฟด ทั้งชนิดพี-แชนแนล และเอ็น-แชนแนล บนฐานรองชนิดอินทรินซิกที่ได้จากการแพร่อะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดพี หรือชนิดเอ็นได้ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า การเลือกใช้ฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น จะสามารถสร้างมอยซ์เฟดที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่า ดังนั้นในการศึกษาคอมพลิเมนต์ารีมอยซ์จึงเลือกใช้ฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นเป็นชนิดเอ็น แล้วทำการสร้างเอ็นมอยซ์เฟดและพีมอยซ์เฟดให้ทำงานร่วมกันเป็นวงจรบนฐานรองเดียวกันนั้น ลักษณะโครงสร้างของคอมพลิเมนต์ารีมอยซ์ซึ่งใช้งานเป็นอินเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 4.27



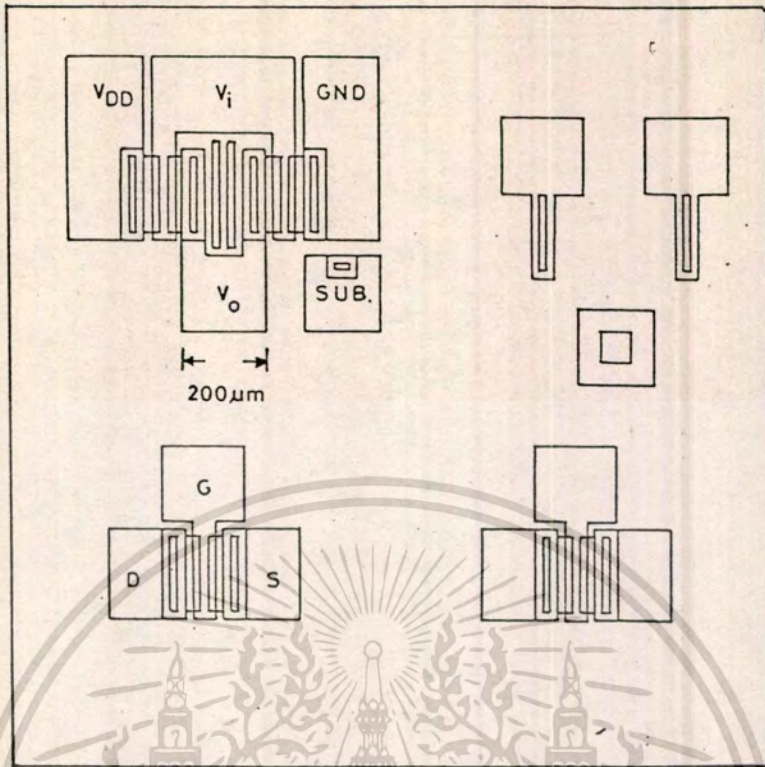
รูปที่ 4.27 แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้างคอมพลิเมนต์ารีมอยซ์อินเวอร์เตอร์

#### 4.3.1 การทดลองสร้างคอมพลิเมนต์ารีมอยซ์อินเวอร์เตอร์

##### การออกแบบและการสร้าง

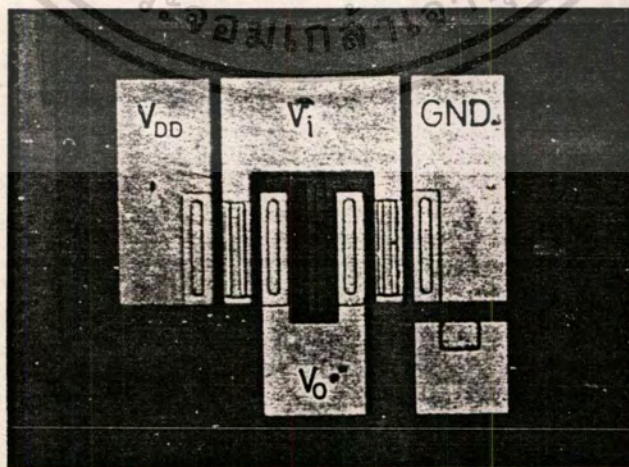
ในการศึกษาและทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างคอมพลิเมนต์ารีมอยซ์ จำเป็นต้องมีวงจรรวมตัวอย่างเพื่อการทดสอบ วงจรรวมที่เป็นพื้นฐานของวงจรรวมแบบดิจิทัลทั่วไปคืออินเวอร์เตอร์ ดังนั้นในการศึกษาค้างนี้จึงเลือกออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วยพีมอยซ์เป็นมอยซ์ตัวโหลดและเอ็นมอยซ์เป็นมอยซ์ตัวขับ สำหรับการออกแบบเพื่อการศึกษาในครั้งนี้นี้จะมีขนาดของความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น  $200 \mu\text{m}$  และ  $20 \mu\text{m}$  ตามลำดับทั้งของมอยซ์ตัวโหลดและมอยซ์ตัวขับ ตัวอย่างลวดลายวงจร CMOIS Inverter ที่ออกแบบไว้แสดงดังในรูปที่ 4.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงตัวอย่างลวดลายวงจรร CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบไว้

หลังจากออกแบบ CMOIS อินเวอร์เตอร์เพื่อการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวแล้ว จึงนำมาสร้างด้วยกระบวนการสร้างที่ 3 ในบทที่ 3 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีระนาบ (100) มี พิกัดความต้านทาน 5 - 8  $\Omega$ -cm. หลังจากสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะได้ภาพถ่ายด้านบนของตัวอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายวงจรร CMOIS อินเวอร์เตอร์จากชิ้นงาน

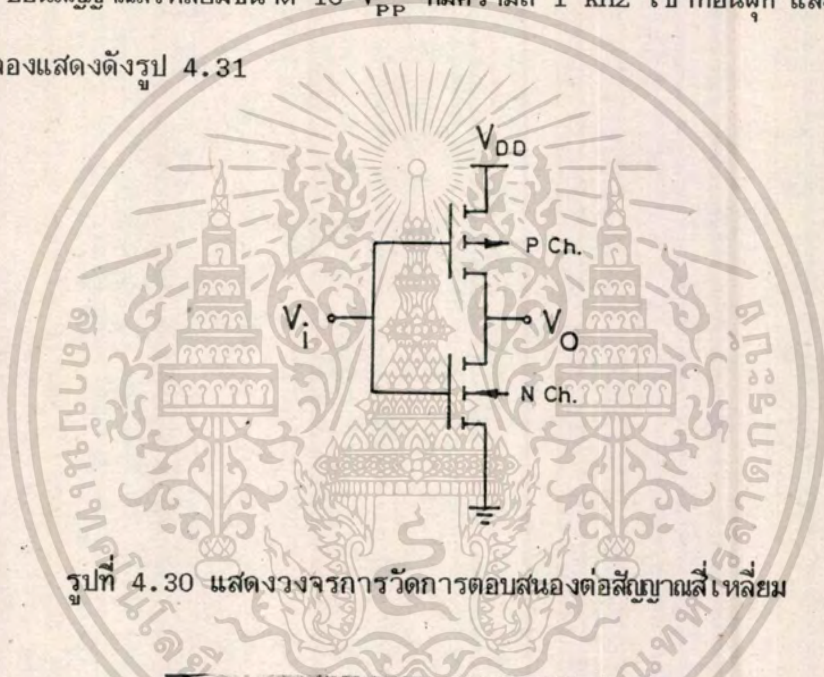
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและผลการทดลอง

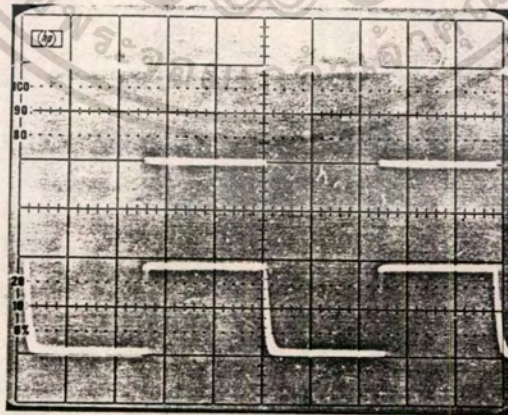
หลังจากผ่านกระบวนการสร้างแล้วจึงนำ CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่ทดลองสร้างขึ้นมาทำการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

4.3.1.1 การทดลองและผลการทดลองวัดการตอบสนองต่อสัญญาณสี่เหลี่ยม

CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่ถูกสร้างขึ้น จะถูกนำมาทำการทดลองวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณสี่เหลี่ยม ซึ่งการวัดการตอบสนองต่อสัญญาณสี่เหลี่ยมจะใช้วงจรถอดลองดังรูปที่ 4.30 โดยให้  $V_{DD} = 10\text{ V}$  ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมขนาด  $10\text{ V}_{PP}$  ที่มีความถี่  $1\text{ kHz}$  เข้าที่อินพุท และวัดสัญญาณที่เอาต์พุท ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.31



รูปที่ 4.30 แสดงวงจรถอดลองวัดการตอบสนองต่อสัญญาณสี่เหลี่ยม



สัญญาณอินพุท

สัญญาณเอาต์พุท

Ver.: Ch1 = 5V/div. (บน), Ch2 = 5V/div. (ล่าง) Hor.: 0.2 ms/div.

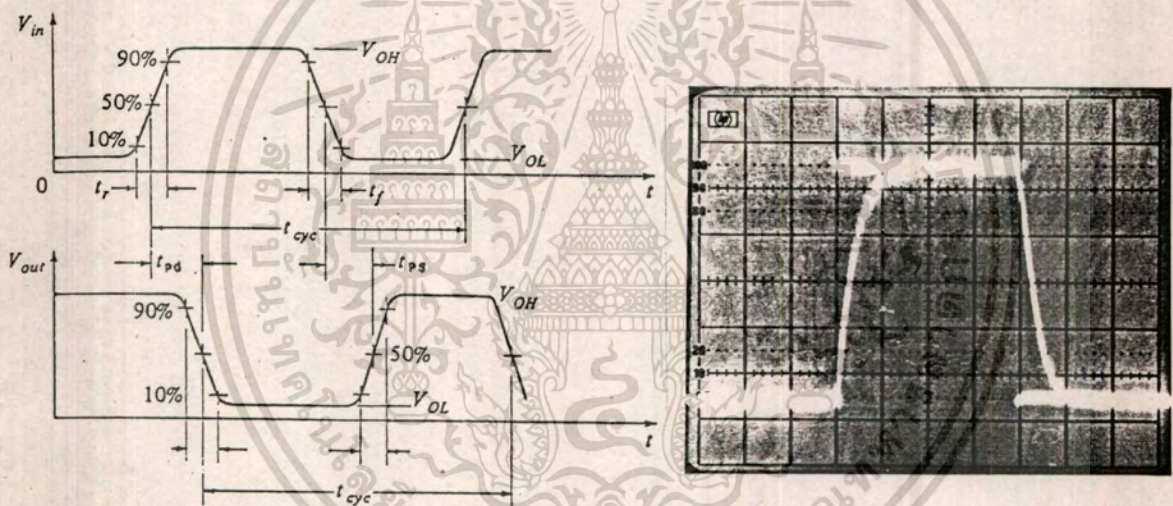
รูปที่ 4.31 แสดงสัญญาณเอาต์พุทกลางเปรียบเทียบกับอินพุทของ CMOIS อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตจะกลับเฟสกับอินพุต และสัญญาณเอาต์พุตที่สถานะสูงมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของแรงดัน  $V_{DD}$  ส่วนสัญญาณเอาต์พุตที่สถานะต่ำมีค่าเท่ากับกราวด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ CMOS นี้สามารถตอบสนองต่อสัญญาณสี่เหลี่ยมได้

#### 4.3.1.2 การทดลองและผลการทดลองวัดความเร็วในการสวิตช์ (Switching speed)

การทดลองวัดความเร็วในการสวิตช์ทำได้โดยการวัดค่าเวลาของการตอบสนองต่อสัญญาณสี่เหลี่ยม ดังนั้น การวัดค่าเวลาต่าง ๆ จึงใช้วงจรดังรูป 4.30 เช่นเดิม โดยกำหนดให้แรงดัน  $V_{DD}$  เท่ากับ 10 V แล้วทำการป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมขนาด 10 V<sub>PP</sub> ที่มีความกว้างของพัลส์ขนาด 200  $\mu$ s เข้าทางอินพุตและวัดสัญญาณเอาต์พุตเปรียบเทียบกับอินพุต ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.32



ก.

ข.

รูปที่ 4.32 แสดงรูปการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุต

(ก) แสดงความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้

(ข) ผลการทดลองที่วัดได้

จากผลการทดลองรูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุต สามารถอ่านค่าเวลาต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$t_{pd} = 10 \mu s$$

$$t_r = 35 \mu s$$

$$t_{ps} = 15 \mu s$$

$$t_f = 40 \mu s$$

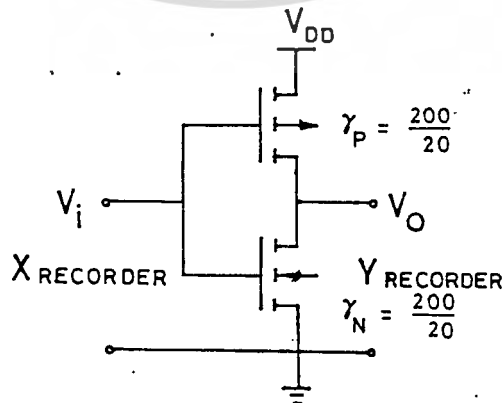
จากนิยาม maximum clock frequency =  $(t_{pd} + t_{ps})^{-1}$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} f_{max} &= (10\mu s + 15\mu s)^{-1} \\ &= 40 \text{ kHz} \end{aligned}$$

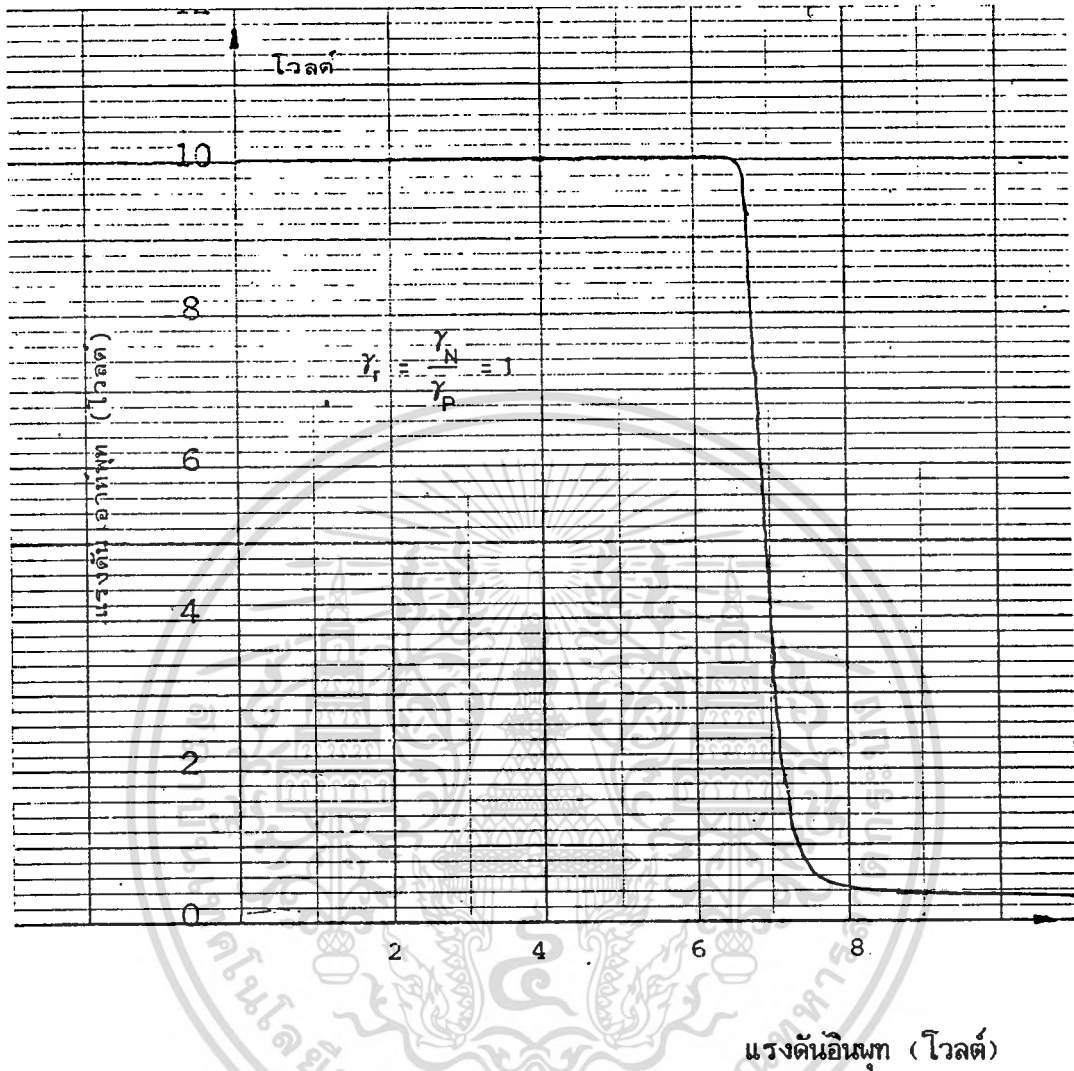
#### 4.3.1.3 การทดลองและผลการทดลองวัดการตอบสนองการส่งผ่านสัญญาณ (Transfer characteristic)

การวัดการตอบสนองการส่งผ่านสัญญาณใช้วงจรดังรูป 4.33 โดยกำหนดให้  $V_{DD} = 10 \text{ V}$  แล้วป้อนแรงดัน  $V_{GS}$  เป็นอินพุต ( $V_i$ ) ทำการเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตตั้งแต่  $0 \text{ V} - 12 \text{ V}$  บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนไปโดยใช้เครื่องบันทึก 2 แกน ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 แสดงวงจรวัดการตอบสนองการส่งผ่านสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของ CMOS อินเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองรูปที่ 4.34 จะเห็นว่าที่แรงดันอินพุตมีค่าเป็น 0 V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็น 10 V ซึ่งเท่ากับค่าของ  $V_{DD}$  ซึ่งเรียกว่าเป็นสถานะ high และแรงดันของเอาต์พุตจะเริ่มเปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะ low ที่มีแรงดันเอาต์พุตประมาณ 0.3 V เมื่อแรงดันอินพุตมีค่า 6.5 V ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CMOS อินเวอร์เตอร์มีการตอบสนองต่อการส่งผ่านสัญญาณที่ดี

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาถึง โครงสร้างของคอมพลีเมนต์เมทาซีในหัวผู้เขียนพบว่าขนาดของโครงสร้างเช่นความกว้าง และความยาวของช่องทางเดินกระแส การที่ไม่มีบ่อแยก (well) ในโครงสร้าง รวมทั้งระยะห่างระหว่างเอ็นเมอชและพีเมอชยังสามารถลดขนาดลงได้อีกนั้น จะมีผลทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วในการสวิตช์เร็วขึ้นอีกด้วย อีกทั้งจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่น (density) ของจำนวนอุปกรณ์ให้มากขึ้นในแผ่นที่จำกัดเท่าเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบ CMOS ทั่ว ๆ ไป สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับขนาดที่เหมาะสมจะได้ทำการศึกษาต่อไป

#### 4.3.2 การทดลองและผลการทดลองศึกษาผลของ โครงสร้างทางเรขาคณิตต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ CMOIS อินเวอร์เตอร์

ในการศึกษาและทดลองถึงผลของขนาดโครงสร้างทางเรขาคณิตนั้น เราจะทำการศึกษาอัตราส่วนของความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) ต่อ ความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) ซึ่งเราเรียกค่า อัตราส่วนนี้ว่าค่า  $\sigma$  ค่า  $\sigma$  ที่เราจะพิจารณาในการออกแบบเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์มี 3 ชนิดคือ

$\sigma_L$  คือค่าอัตราส่วนของความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) ต่อความยาวของช่องทางเดินกระแสของมออร์ฟตัวโหลด ( $w_L/L_L$ )

$\sigma_D$  คือค่าอัตราส่วนของความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) ต่อความยาวของช่องทางเดินกระแสของมออร์ฟตัวขับ ( $w_D/L_D$ )

$\sigma_r$  คือค่าอัตราส่วนของ  $\sigma_D/\sigma_L$

ในการศึกษาผลของค่า  $\sigma$  นี้เราจะทำการทดลองวัดคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของ CMOIS อินเวอร์เตอร์ ที่ค่า  $\sigma_r$  ค่าต่าง ๆ

##### 4.3.2.1 การทดลองและผลการทดลองศึกษาผลของ $\sigma_r$ ต่อการส่งผ่านสัญญาณของ CMOIS

###### อินเวอร์เตอร์

###### การออกแบบและการสร้าง

ในการทดลองศึกษาผลของ  $\sigma_r$  ต่อการส่งผ่านสัญญาณเราจะกำหนดค่า  $\sigma_D$  และ  $\sigma_L$  ให้มีค่าต่างๆ กันเพื่อให้  $\sigma_r$  มีค่าตามต้องการ และในการกำหนดอัตราส่วนของ  $\sigma_r$  ต้องกำหนดให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบ คืออินเวอร์เตอร์จะมีขนาดไม่เล็กหรือใหญ่จนเกินขีดความสามารถที่จะเขียนต้นแบบและสร้างได้ ค่า  $\sigma_r$  ที่ออกแบบจะมีค่าต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางที่ 4.1 สำหรับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

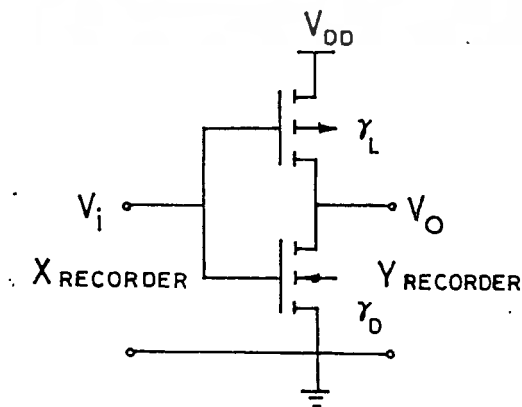
สร้างจะใช้กระบวนการสร้างที่ 3 ในบทที่ 3 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีระนาบ (100) มี  
พิถีความต้านทาน  $5 - 8 \Omega\text{-cm}$ . เป็นฐานรองที่ใช้สร้าง CMOIS อินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าของ  $\sigma_r$  ค่าต่าง ๆ กันรวมทั้งขนาดของมอยซ์แต่ละตัวที่ออกแบบไว้

$\sigma_r$	$\sigma_D$	$w_D$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_D$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_L$	$w_L$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_L$ ( $\mu\text{m}$ )
1	10	200	20	10	200	20
2	10	200	20	5	100	20
5	10	200	20	2	40	20
10	10	200	20	1	40	40
20	10	200	20	1/2	40	80
100	10	200	20	1/10	40	400

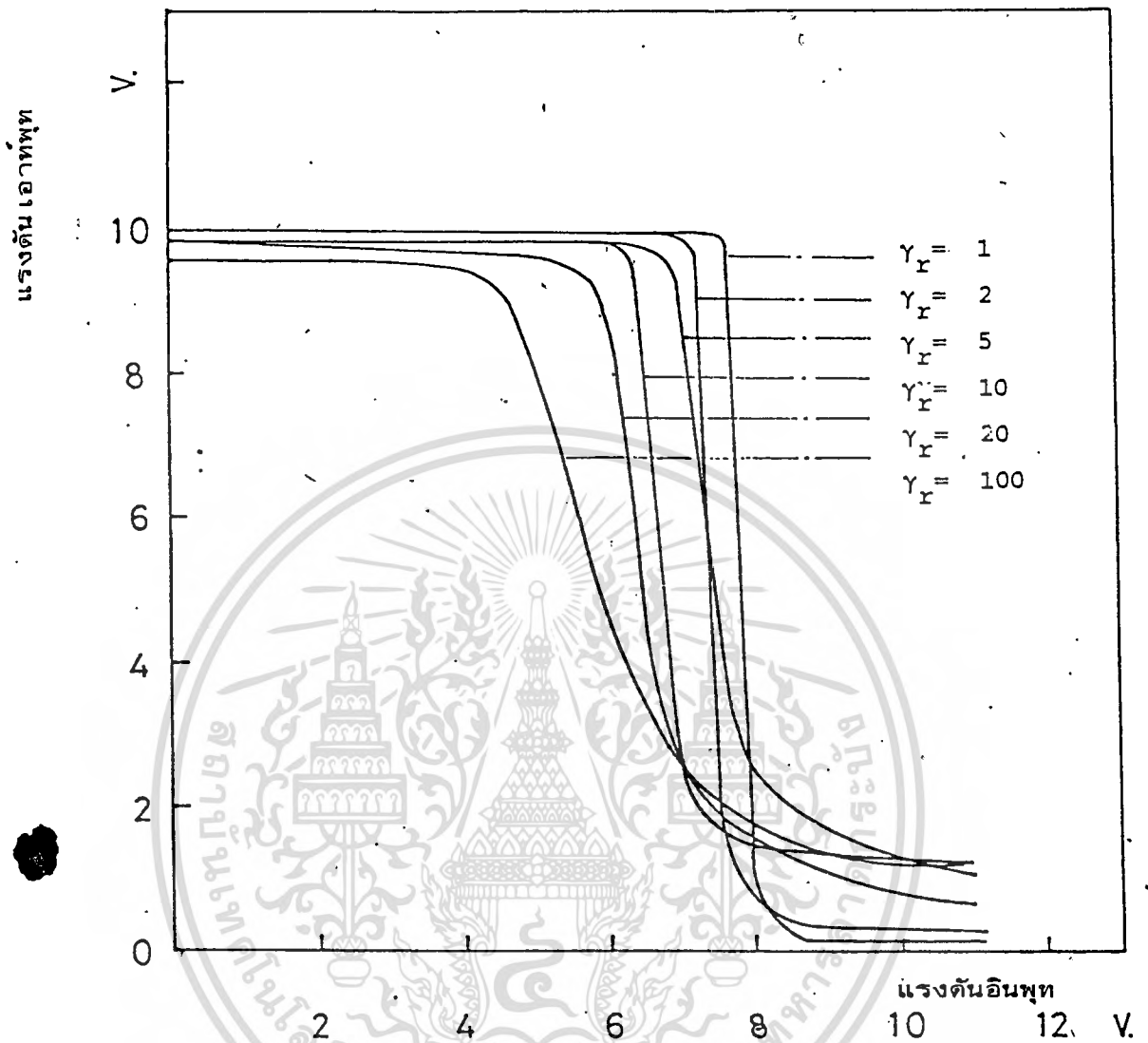
#### การทดลองและผลการทดลอง

การวัดการตอบสนองการส่งผ่านสัญญาณใช้วงจรดังรูปที่ 4.35 ทำการทดสอบ CMOIS  
อินเวอร์เตอร์ทุกตัวที่สร้างขึ้น โดยกำหนดให้  $V_{DD} = 10\text{ V}$  แล้วป้อนแรงดัน  $V_{GS}$  เป็นอินพุทโดยเปลี่ยน  
ค่าแรงดันตั้งแต่  $0\text{ V} - 12\text{ V}$  แล้วบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุทและอินพุทที่สัมพันธ์กันโดยใช้เครื่องบันทึก 2  
แกน ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.35 แสดงวงจรวัดการตอบสนองการส่งผ่านสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของ CMOIS อินเวอร์เตอร์ ที่มีค่า  $\gamma_r$  ต่าง ๆ

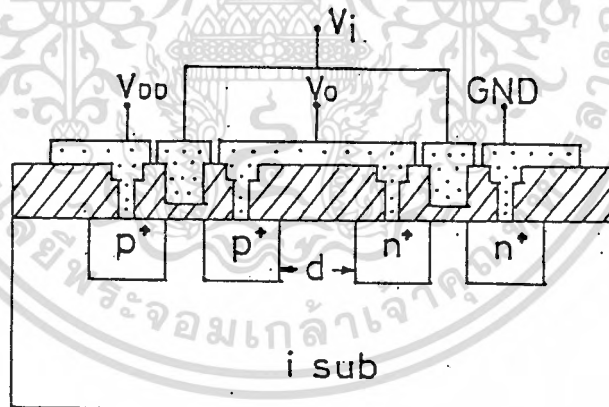
จากการทดลองตอนที่ 4.3.2.1 ซึ่งเป็นการศึกษาทดลองวัดคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของ CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดของค่า  $\gamma_r$  ต่าง ๆ กัน ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.36 จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่ค่า  $\gamma_r$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นจุดเปลี่ยนสถานะของสัญญาณจะเลื่อนไปทางซ้าย คือการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณที่แรงดันอินพุตมีค่าต่ำลง จากผลการทดลองตอนที่ 4.3.2.1 นี้ทำให้เราทราบแนวโน้มของจุดเปลี่ยนสถานะของสัญญาณได้ทำให้สามารถที่จะเลือกออกแบบ CMOIS อินเวอร์เตอร์ให้มีจุดเปลี่ยนสถานะได้ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.2 การทดลองและผลการทดลองศึกษาผลของระยะห่างระหว่างมอยซ์เฟตในวงจร CMOIS อินเวอร์เตอร์

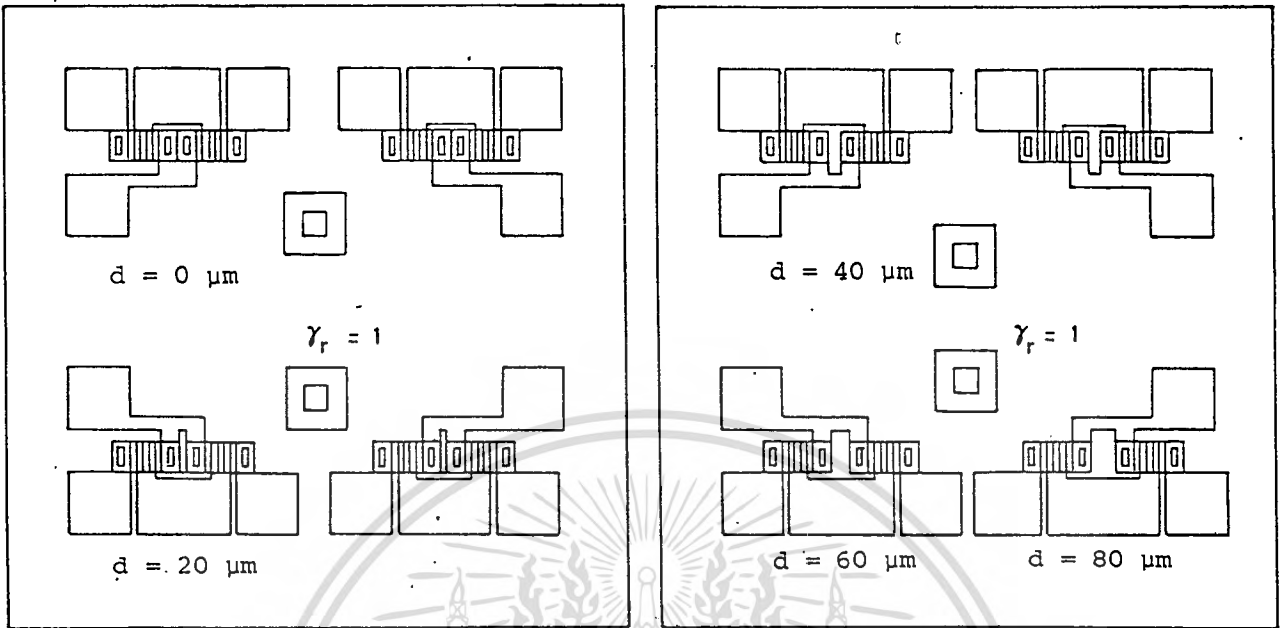
การออกแบบและการสร้าง

โครงสร้างแบบ CMOIS นั้นเราสามารถสร้างเพิ่มมอยซ์และเอ็นมอยซ์บนฐานร่องซิลิกอนซิลิกอนที่เป็นอินทรินซิกพร้อมกันได้ โดยไม่ต้องมีบ่อแยกจึงทำให้เราสามารถลดขนาดของโครงสร้างให้ใกล้เคียงกันได้ ซึ่งจะเป็นผลให้เราสามารถเพิ่มจำนวนเฟตในวงจรรวมให้มีความหนาแน่นต่อพื้นที่ได้มากขึ้น ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องศึกษาผลของระยะห่างระหว่างมอยซ์เฟตตัวไหลด (เพิ่มมอยซ์) และ มอยซ์เฟตตัวขับ (เอ็นมอยซ์) เพื่อหาระยะที่ใกล้ที่สุดของมอยซ์เฟตทั้ง 2 ตัว ที่ยังคงทำงานเป็นปกติ ดังนั้นจึงได้ออกแบบ CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างมอยซ์เฟตตัวไหลดและตัวขับ (d) ให้มีค่าต่างๆ กันคือ 0  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$  และ 80  $\mu\text{m}$  โดยมีขนาดโครงสร้างอื่นๆ เท่ากันหมด สำหรับภาพตัดขวางของโครงสร้าง CMOIS อินเวอร์เตอร์ เพื่อแสดงความหมายของระยะห่างระหว่างมอยซ์ตัวไหลดและมอยซ์ตัวขับ (d) แสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้าง CMOIS อินเวอร์เตอร์ เพื่อแสดงความหมายของระยะห่างระหว่างมอยซ์ตัวไหลดและมอยซ์ตัวขับ (d)

ในการทดลองตอนนี้ เราจะทำการศึกษาถึงผลของระยะห่างระหว่างมอยซ์ตัวไหลด และมอยซ์ตัวขับ (d) ใน CMOIS อินเวอร์เตอร์ โดยกำหนดให้มีขนาดดังนี้  $w_L = 200 \mu\text{m}$ ,  $L_L = 20 \mu\text{m}$ ,  $w_D = 200 \mu\text{m}$ ,  $L_D = 20 \mu\text{m}$  สำหรับขนาดและลวดลายที่ออกแบบไว้แสดงดังรูป 4.38 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



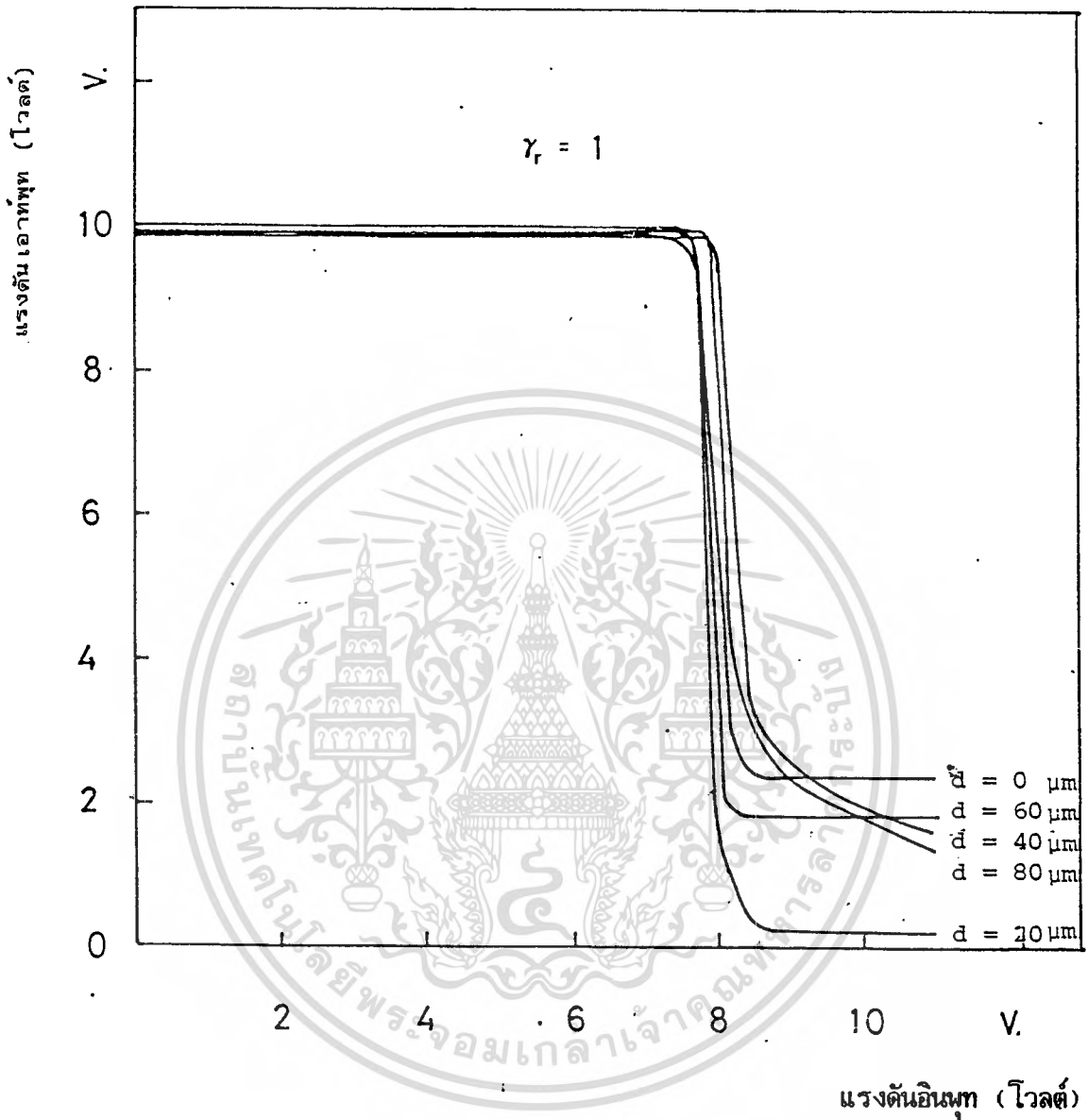
รูปที่ 4.38 แสดงขนาดและลวดลายของ CMOIS ที่ออกแบบให้มีระยะ  $d$  ต่าง ๆ กัน

จากต้นแบบวงจรถูกออกแบบไว้นำมาทดลองสร้าง CMOIS อินเวอร์เตอร์ ตามกระบวนการสร้างที่ 3 ในบทที่ 3 โดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ระบาย (100) มีจำกัดความต้านทาน 5-8  $\Omega\text{-cm}$ .

การทดลองและผลการทดลอง

จากนั้นนำมาทดลองวัดคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของ CMOIS อินเวอร์เตอร์แต่ละตัว โดยใช้วงจรรวการวัดดังรูปที่ 4.35 บันทึกผลด้วยเครื่องบันทึก 2 โดยกำหนดให้  $V_{DD} = 10\text{ V}$  แล้วมีอนแรงดัน  $V_{GS}$  โดยเปลี่ยนค่าแรงดันตั้งแต่  $0\text{ V} - 12\text{ V}$  เพื่อศึกษาผลของระยะ  $d$  ที่อาจมีต่อคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของ CMOIS อินเวอร์เตอร์ สำหรับผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.39 จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าของระยะ  $d$  ไม่มีผลต่อคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของ CMOIS อินเวอร์เตอร์เลย ดังจะสังเกตได้จากการซ้อนทับกันของเส้นกราฟที่มีระยะ  $d$  ค่าต่าง ๆ กัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโครงสร้างของ CMOIS นอกจากจะไม่จำเป็นต้องมีบ่อแยกเหมือนกับในโครงสร้างของ CMOS ทั่วไปแล้ว เอ็นมอซซีและพีมอซซียังสามารถถูกสร้างให้ติดกันได้อีกด้วย ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของโครงสร้างแบบ CMOIS นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต ( $V_1$ ) กับแรงดันเอาต์พุต ( $V_0$ ) ของ CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่มีระยะ  $d$  ค่าต่าง ๆ

#### 4.4 การประยุกต์ใช้งาน CMOIS ในรูปของวงจรรวม

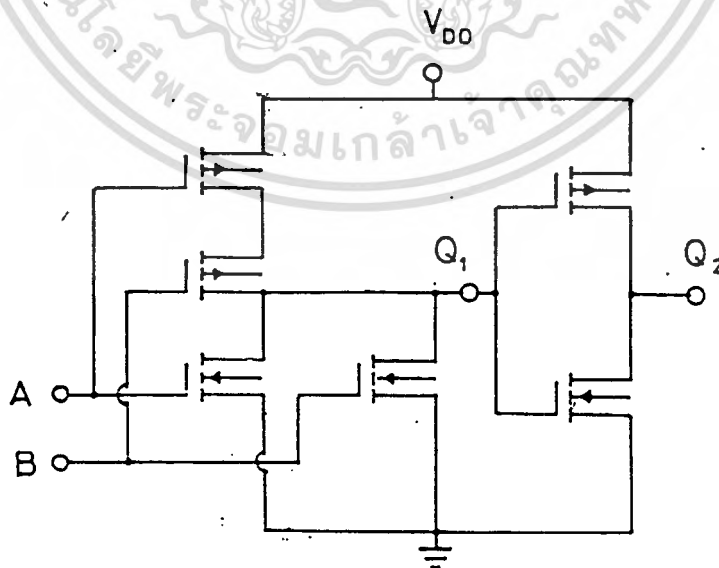
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของ CMOIS ซึ่งนำมาสร้างเป็นวงจรรวม CMOIS อินเวอร์เตอร์แล้วนั้น เราได้ทำการพัฒนางวงจรรวม CMOIS อินเวอร์เตอร์ไปเป็นวงจรรวมชนิดอื่น ๆ เช่น วงจรรวม NOR Gate, OR Gate และ Ring Oscillator

##### 4.4.1 การทดลองสร้างวงจรรวม CMOIS NOR Gate และ OR Gate

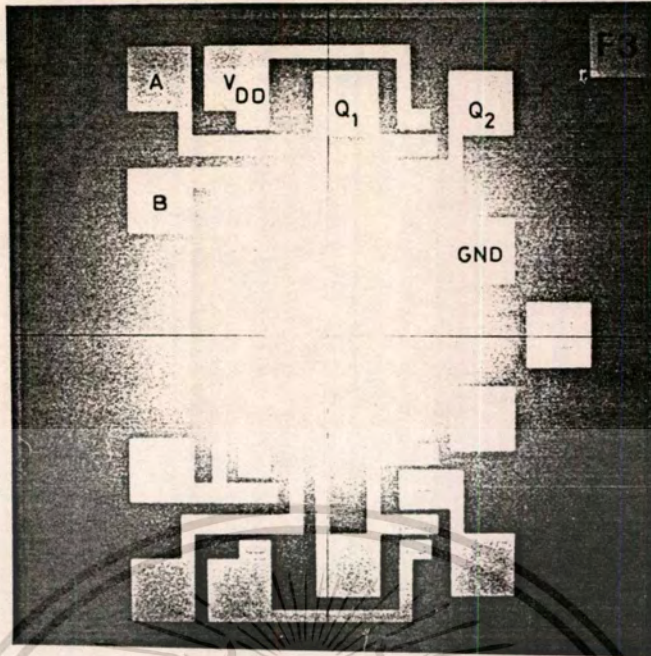
###### การออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบวงจรรวม NOR Gate และ OR Gate ซึ่งมีแผนผังการต่อวงจรแสดงดังรูปที่

4.40 กำหนดให้ขนาดของพินมอยซ์เฟต และเอ็นมอยซ์เฟตแต่ละตัว มีขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) เป็น  $200 \mu\text{m}$  และความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) เป็น  $20 \mu\text{m}$  จากต้นแบบวงจรรวมที่ออกแบบไว้ นำมาทดลองสร้างวงจรรวมแบบ CMOIS NOR Gate และ OR Gate ตามกระบวนการสร้างที่ 3 ในบทที่ 3 โดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ระบาย ( $100$ ) มีพิกัดความต้านทาน  $5-8 \Omega\text{-cm}$ . เป็นฐานรอง หลังจากผ่านกระบวนการสร้างแล้วจะได้รูปถ่ายด้านบนของลวดลายวงจรรวม NOR Gate และ OR Gate จากชิ้นงานที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.40 แสดงแผนผังการต่อวงจร CMOIS NOR Gate และ OR Gate ยืนยันด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

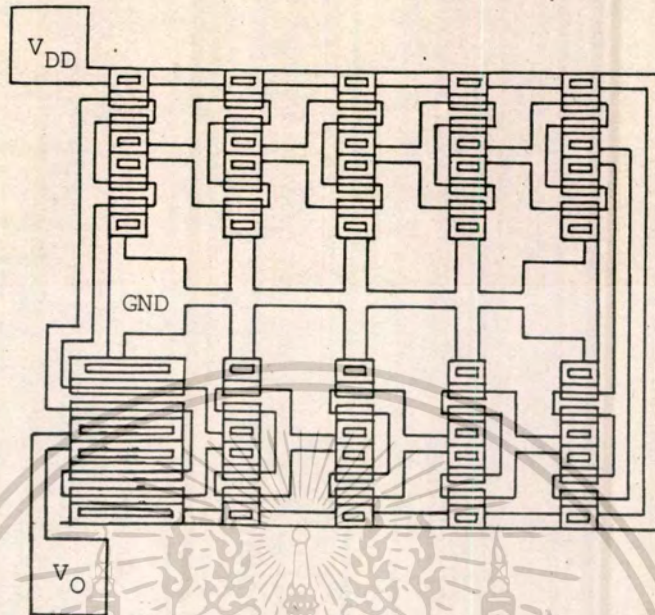


รูปที่ 4.41 แสดงลวดลายวงจร NOR Gate และ OR Gate ที่ถ่ายจากชิ้นงาน

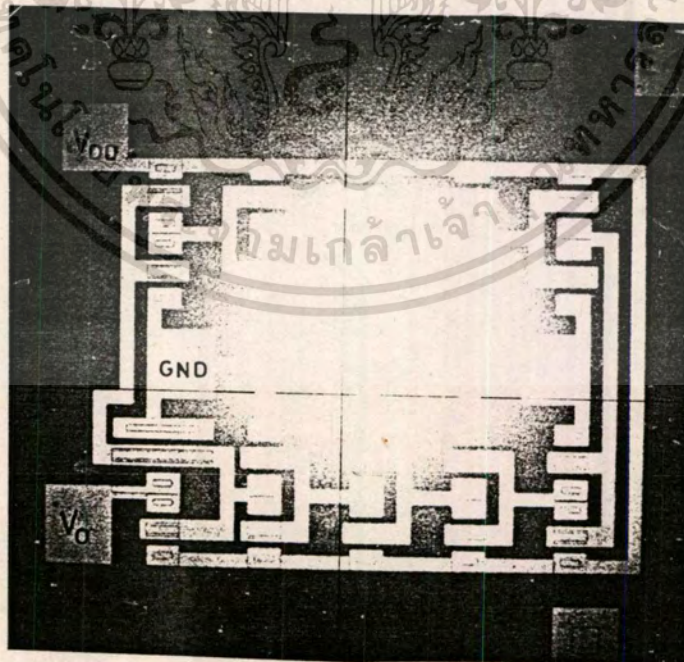
#### การทดลองและผลการทดลอง

หลังจากทำการสร้างด้วยกระบวนการสร้างเดียวกับ CMOS อินเวอร์เตอร์แล้วจึงนำมาทำการวัดคุณสมบัติทางลอจิกของวงจร NOR Gate และ OR Gate โดยให้  $V_{DD} = 10\text{ V}$  ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยมี  $Q_1$  เป็นเอาต์พุตของ NOR Gate และ  $Q_2$  เป็นเอาต์พุตของ OR Gate ตารางที่ 4.2 แสดงตารางความจริงของ NOR Gate และ OR Gate ที่ได้จากการทดลอง

INPUT		OUTPUT	
A (volt)	B(volt)	$Q_1$ (volt)	$Q_2$ (volt)
0	0	5.3	3.3
0	10	2.2	6.7
10	0	2.5	6.0
10	10	2.0	6.2



รูปที่ 4.43 แสดงต้นแบบลวดลายวงจรด้านบนของ Ring Oscillator 9 states

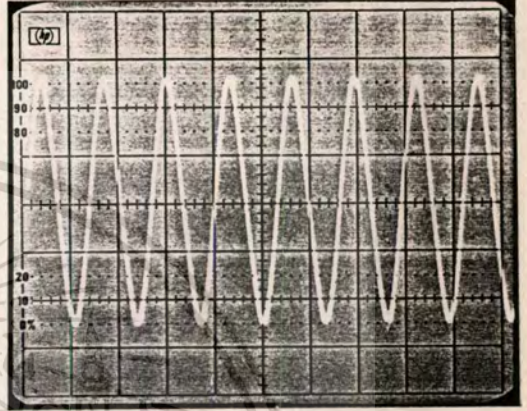
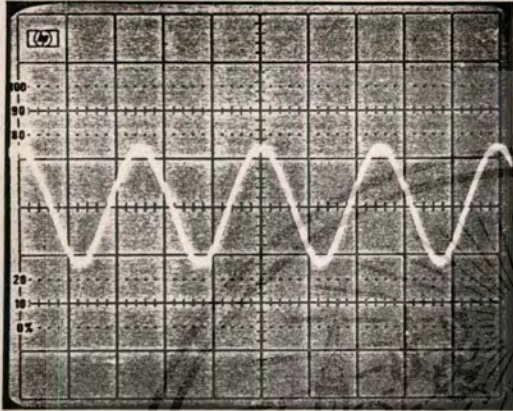


รูปที่ 4.44 แสดงภาพถ่ายลวดลายวงจร Ring Oscillator 9 states จากชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและผลการทดลอง

นำวงจรรวม CMOIS Ring Oscillator ขนาด 5 states และ 9 states ที่สร้างขึ้นมาทำการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่กับแรงดัน  $V_{DD}$  โดยทำการป้อนแรงดัน  $V_{DD}$  มีค่าต่าง ๆ กัน แล้ววัดสัญญาณความถี่ที่เอาต์พุตของ Ring Oscillator ตัวอย่างผลการทดลองแสดงสัญญาณความถี่แสดงดังรูปที่ 4.45 และ 4.46 ตามลำดับ



ก.

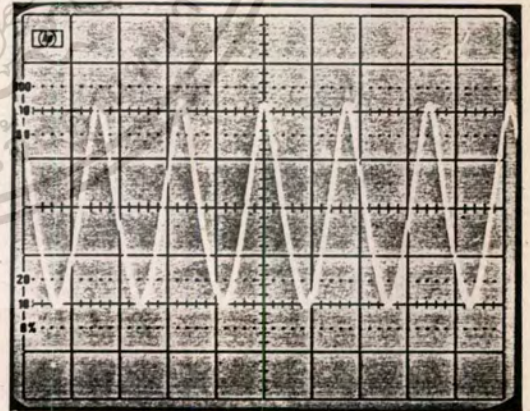
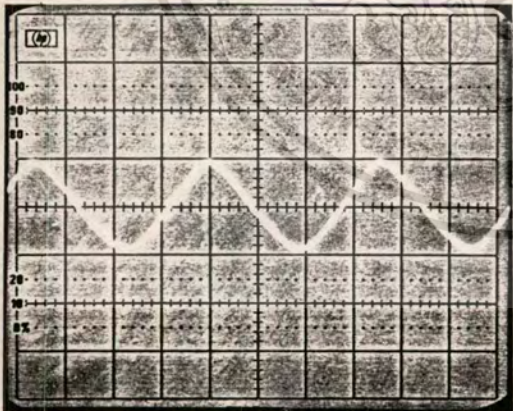
ข.

Ver.: 1 V/div., Hor.: 1  $\mu$ s/div.

Ver.: 1 V/div., Hor.: 1  $\mu$ s/div.

รูปที่ 4.45 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของ CMOIS Ring Oscillator 5 states

(ก) ขณะป้อนแรงดัน  $V_{DD} = 10$  V, (ข) ขณะป้อนแรงดัน  $V_{DD} = 15$  V



ก.

ข.

Ver.: 1 V/div., Hor.: 1  $\mu$ s/div.

Ver.: 1 V/div., Hor.: 1  $\mu$ s/div.

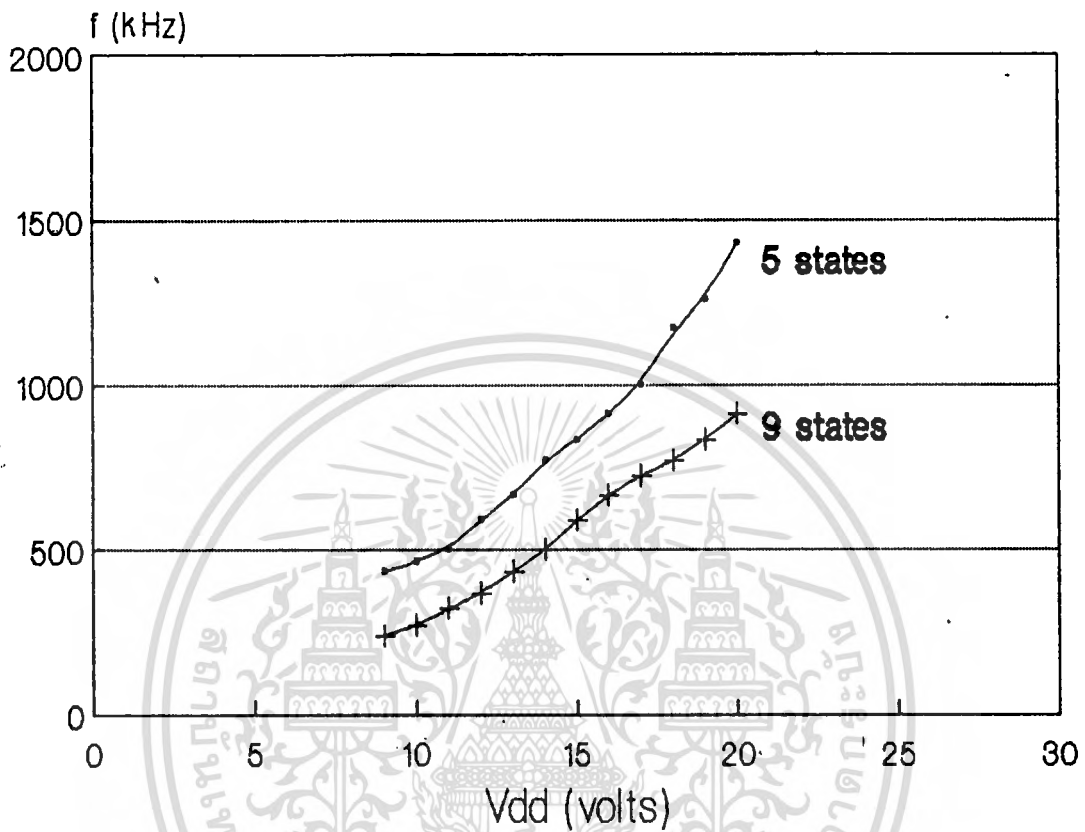
รูปที่ 4.46 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของ CMOIS Ring Oscillator 9 states

(ก) ขณะป้อนแรงดัน  $V_{DD} = 10$  V, (ข) ขณะป้อนแรงดัน  $V_{DD} = 15$  V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการวัดสัญญาณความถี่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดัน

$V_{DD}$  ของ Ring Oscillator 5 states และ 9 states แสดงดังรูปที่ 4.47



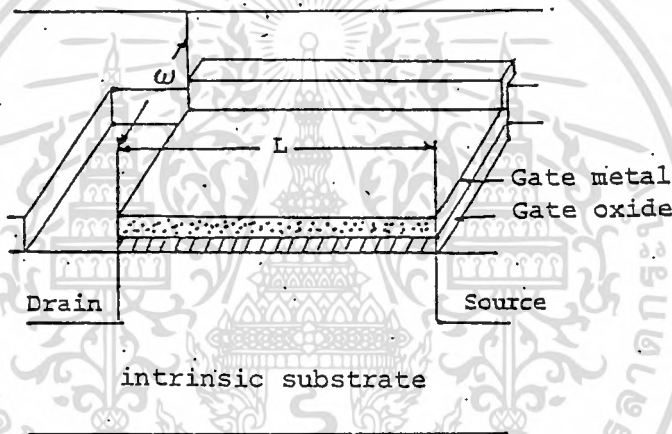
รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดัน  $V_{DD}$  ของ Ring Oscillator 5 states และ 9 states

จากผลการทดลองรูปที่ 4.45 และ 4.46 จะเห็นว่าวงจรรวม CMOIS Ring

Oscillator 5 states และ 9 states สามารถทำงานเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สร้างความถี่ได้ และความถี่ที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปไซน์ (sine wave) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.47 จะเห็นว่าวงจรรวม CMOIS Ring Oscillator จะทำงานโดยขึ้นกับแรงดัน  $V_{DD}$  คือเมื่อแรงดัน  $V_{DD}$  มีค่าถึงจุดทำงานของวงจร Ring Oscillator วงจร Ring Oscillator จะเริ่มสร้างความถี่ขึ้นมาค่าหนึ่ง และเมื่อแรงดัน  $V_{DD}$  มีค่าเพิ่มขึ้นค่าความถี่ที่ Ring Oscillator สร้างขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ที่ค่าแรงดัน  $V_{DD}$  เท่ากัน Ring Oscillator ที่มีจำนวน state น้อยจะให้ความถี่สูงกว่า Ring Oscillator ที่มีจำนวน state มากกว่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การทำงานและคุณสมบัติของมอซเฟตแบบอินtrinsic เมนทึโหมด

มอซเฟตทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ อยู่ในตระกูลของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทผลของสนามไฟฟ้า บางทีจึงเรียกว่ามอซเฟต ลักษณะโครงสร้างจะคล้าย ๆ กับโครงสร้างของมอสเฟต ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ ส่วนเดรน, ส่วนซอร์ส, ส่วนเกต และฐานรอง ซึ่งฐานรองนี้จะเป็นฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรินซิก ที่สร้างมาจากฐานรองเริ่มต้นชนิดเอ็น แล้วแพร่อะตอมทองคำเข้าไป ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของมอซเฟต แสดงดังรูปที่ 5.1

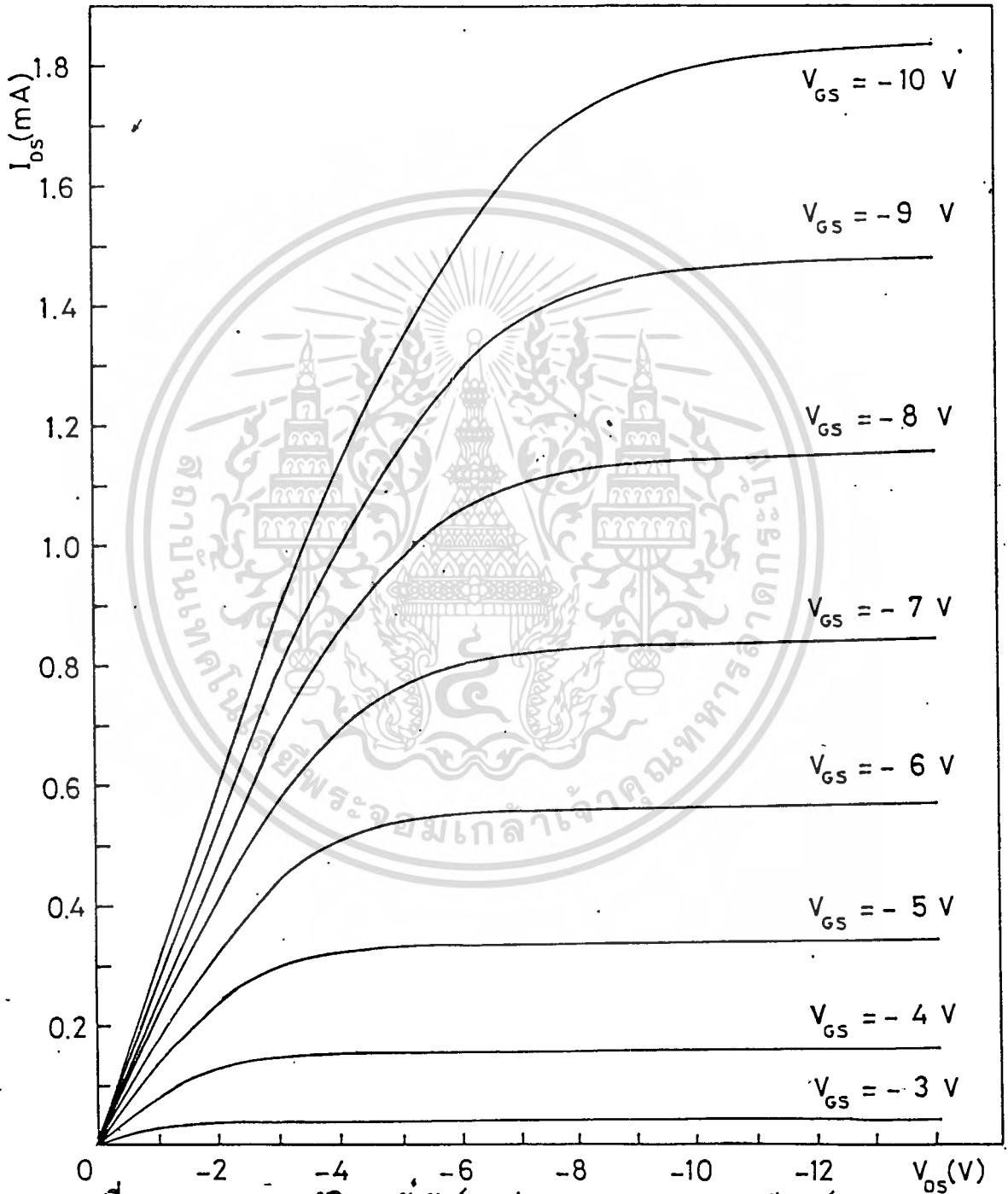


รูปที่ 5.1 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะ โครงสร้างของมอซเฟต

จากลักษณะ โครงสร้างดังกล่าวซึ่งบริเวณส่วนเกตประกอบด้วย Metal Oxide Intrinsic Semiconductor จึงเรียกทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ว่ามอซเฟตทรานซิสเตอร์ (MOIS Tr.) ลักษณะการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอซเฟตจะคล้าย ๆ กับกรณีของมอสเฟต ดังนั้นในการพิจารณาหลักการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะพิจารณาเช่นเดียวกับมอสเฟต โดยจะมีสมการต่าง ๆ ที่อ้างอิงจากสมการของมอสเฟต แต่จะมีพารามิเตอร์บางตัวที่แตกต่างกันซึ่งจะมีการนิยามต่อไป

### 5.1 การวิเคราะห์การทำงานของเฟลต

จากผลการทดลองสร้างเฟลตบนฐานรองเริ่มต้นชนิดอื่นที่ถูกแพรวะต่อมทองคำเข้าไปในฐานรองนั้น เมื่อนำเฟลตที่สร้างขึ้นในตอนที 4.1.3.1 มาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  ได้กราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเฟลต

ที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$  บันทึกด้วยเครื่องบันทึก 2 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะ โครงสร้างของพีมอยซ์เฟตที่มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของพีมอสเฟต ดังนั้นในการพิจารณาคุณสมบัติของพีมอยซ์เฟตจะใช้สมการของพีมอสเฟตเป็นสมการอ้างอิง เนื่องจากพีมอยซ์เฟตจะมีฐานรองเป็นฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรินซิกซึ่งต่างจากฐานรองของพีมอสเฟต ดังนั้นในกรณีของพีมอยซ์เฟต สมการทั่วไปของกระแส  $I_{DS}$  เขียนได้เป็น

$$I_{DS} = \mu_{pAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS} - (V_{DS}^2 / 2)] \quad (5.1)$$

โดยที่  $\mu_{pAu}$  เป็น Mobility ของโฮลในซิลิกอนชนิดอินทรินซิกที่ถูกแพรวด้วยอะตอมของทองคำ

และกำหนดให้  $\mu_{pAu} = \alpha_{pAu} \mu_p$  (5.2)

โดย  $\alpha_{pAu}$  : proportional constant ในกรณีของโฮล

หรือ  $\alpha_{pAu} = \mu_{pAu} / \mu_p$  (5.3)

สมการที่ 5.1 เป็นสมการกระแสทั่วไปของพีมอยซ์เฟต เมื่อพิจารณาการทำงานในช่วงกระแสอิ่มตัวของพีมอยซ์เฟตก็จะใช้หลักการเดียวกับของพีมอสเฟต คือที่ช่วงอิ่มตัว  $(V_G - V_T) = V_{DS}$  ดังนั้นสมการที่ 5.1 จะเขียนเป็นสมการกระแส  $I_{DS}$  ในช่วงกระแสอิ่มตัวได้เป็น

$$I_{DS} = \mu_{pAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T)^2 / 2] \quad (5.4)$$

เมื่อพิจารณาการทำงานในช่วงเชิงเส้นของพีมอยซ์เฟตก็จะใช้หลักการเดียวกับของพีมอสเฟต คือที่ช่วงเชิงเส้น  $(V_G - V_T) > V_{DS}$  ดังนั้นสมการที่ 5.1 จะเขียนเป็นสมการกระแส  $I_{DS}$  ในช่วงเชิงเส้นได้เป็น

$$I_{DS} = \mu_{pAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS}] \quad (5.5)$$

จากสมการกระแส  $I_{DS}$  ของพีมอยซ์เฟตที่ 5.4 และ 5.5 สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์อื่น ๆ ของพีมอยซ์เฟตได้

### 5.1.1 การหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) ของพีมอยซ์เฟต

ในการพิจารณาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) นั้นเราจะใช้นิยามเช่นเดียวกับกรณีของพีมอสเฟต จะได้ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) ของพีมอยซ์เฟตคือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาท์พุท ( $\Delta I_{DS}$ ) ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันอินพุท ( $\Delta V_{GS}$ ) ซึ่งค่า  $g_m$  นี้จะเป็นตัวบอกอัตราการขยายแรงดันของพีมอยซ์เฟต ซึ่งเราจะหาได้โดยการนำค่า  $g_m$  ไปคูณกับค่าความต้านทานโหลด ( $R_L$ ) จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามของ  $g_m$  จะได้ว่า

$$g_m = \Delta I_{DS} / \Delta V_{GS} \quad \text{โดยที่ } V_{DS} \text{ คงที่} \quad (5.6)$$

พิจารณาสมการกระแสในช่วงเชิงเส้นจะได้

$$I_{DS} = \beta [(V_{GS} - V_T) V_{DS}] \quad (5.7)$$

เมื่อ  $\beta = [(\mu_{pAu} \epsilon_o \epsilon_{ox}) / T_{ox}] (w/L)$

ดังนั้น  $g_m = \beta V_{DS}$  (5.8)

เมื่อพิจารณาสมการกระแสในช่วงอิ่มตัวจะได้ว่า

$$g_{m(sat)} = \beta (V_G - V_T) \quad (5.9)$$

ในกรณีของพีมอซีเฟต เราสามารถหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) จากอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์พุท ( $\Delta I_{DS}$ ) ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุท ( $\Delta V_G$ ) ได้เช่นเดียวกัน

ดังนั้น  $g_m = \Delta I_{DS} / \Delta V_{GS}$  โดยที่  $V_{DS}$  คงที่ (5.10)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของพีมอซีเฟตในรูปที่ 5.2 สามารถนำมาหาค่า  $g_m$  ได้ ซึ่งค่า  $g_m$  ที่คำนวณจากกราฟเป็นค่า  $g_m$  ในช่วงกระแสอิ่มตัว ดังนั้นค่า  $g_m$  ที่ได้จึงเป็นค่า  $g_{m(sat)}$  และเมื่อเรานำค่า  $g_{m(sat)}$  กับค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกต  $\Delta V_{GS}$  มาเขียนเป็นกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $g_{m(sat)}$  กับ  $\Delta V_{GS}$  จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 5.3

### 5.1.2 การหาค่าขอส-เดรนคอนดักแตนซ์ ( $g_{sd}$ ) ของพีมอซีเฟต

จากนิยาม ขอส-เดรน คอนดักแตนซ์ของมอสคือ ค่าความนำไฟฟ้าของแชนแนลซึ่งจะขึ้นกับจำนวนประจุที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในชั้นกลับของช่องทางเดินกระแส ซึ่งค่า  $g_{sd}$  จะหาได้จาก

$$g_{sd} = \Delta I_{DS} / \Delta V_{DS} \quad \text{โดยที่ } V_G \text{ มีค่าคงที่} \quad (5.11)$$

จากสมการ  $I_{DS}$  ในช่วงเชิงเส้นจะได้ว่า

$$I_{DS} = \beta [(V_G - V_T) V_{DS} - (V_{DS}^2 / 2)]$$

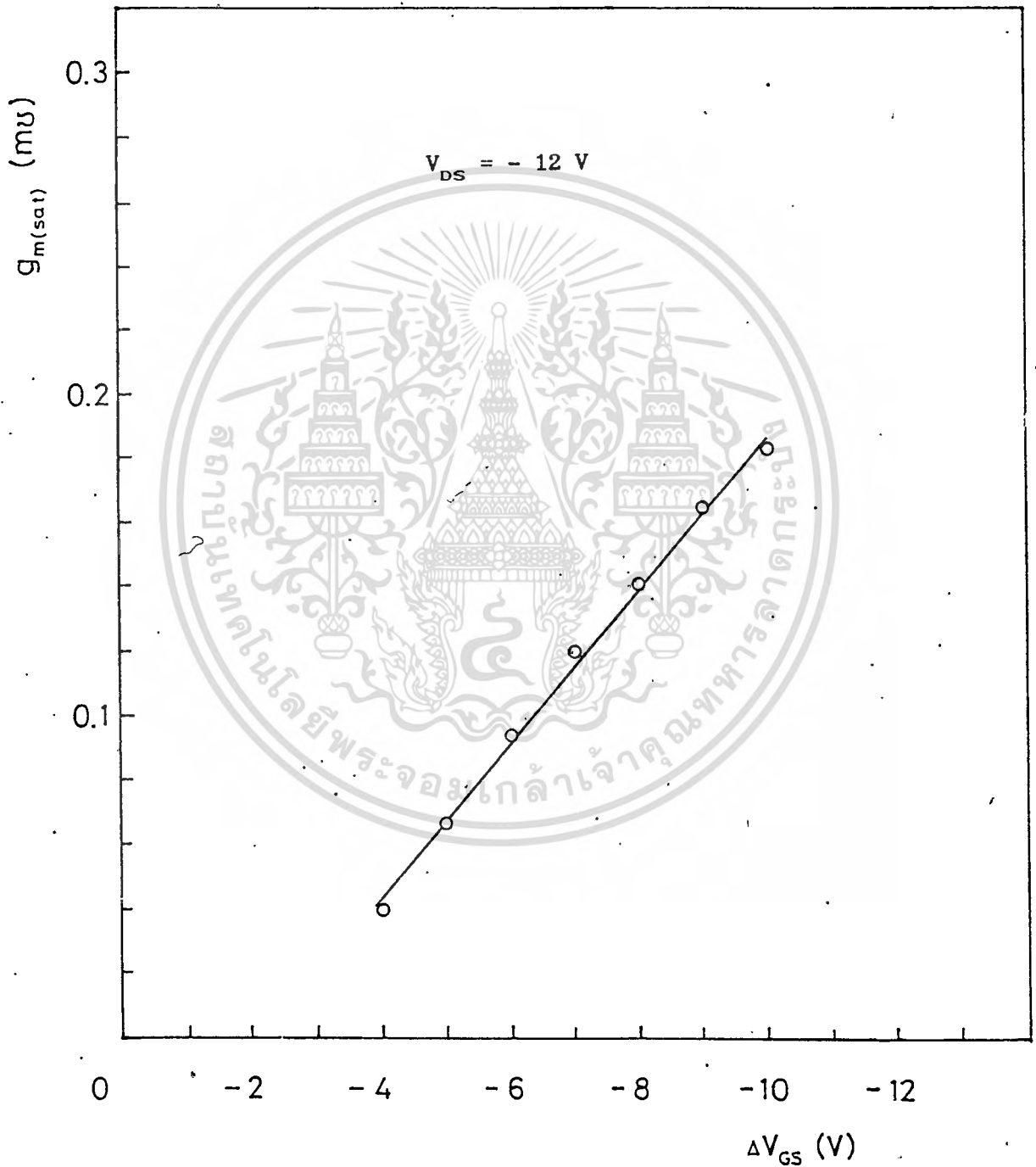
ดังนั้น  $g_{sd} = \beta (V_G - V_T - V_{DS})$  (5.12)

ในช่วงอิ่มตัวจะได้  $g_{sd(sat)} = 0$

ในกรณีของพีมอซีเฟตก็จะสามารถหาค่า  $g_{sd}$  ได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์

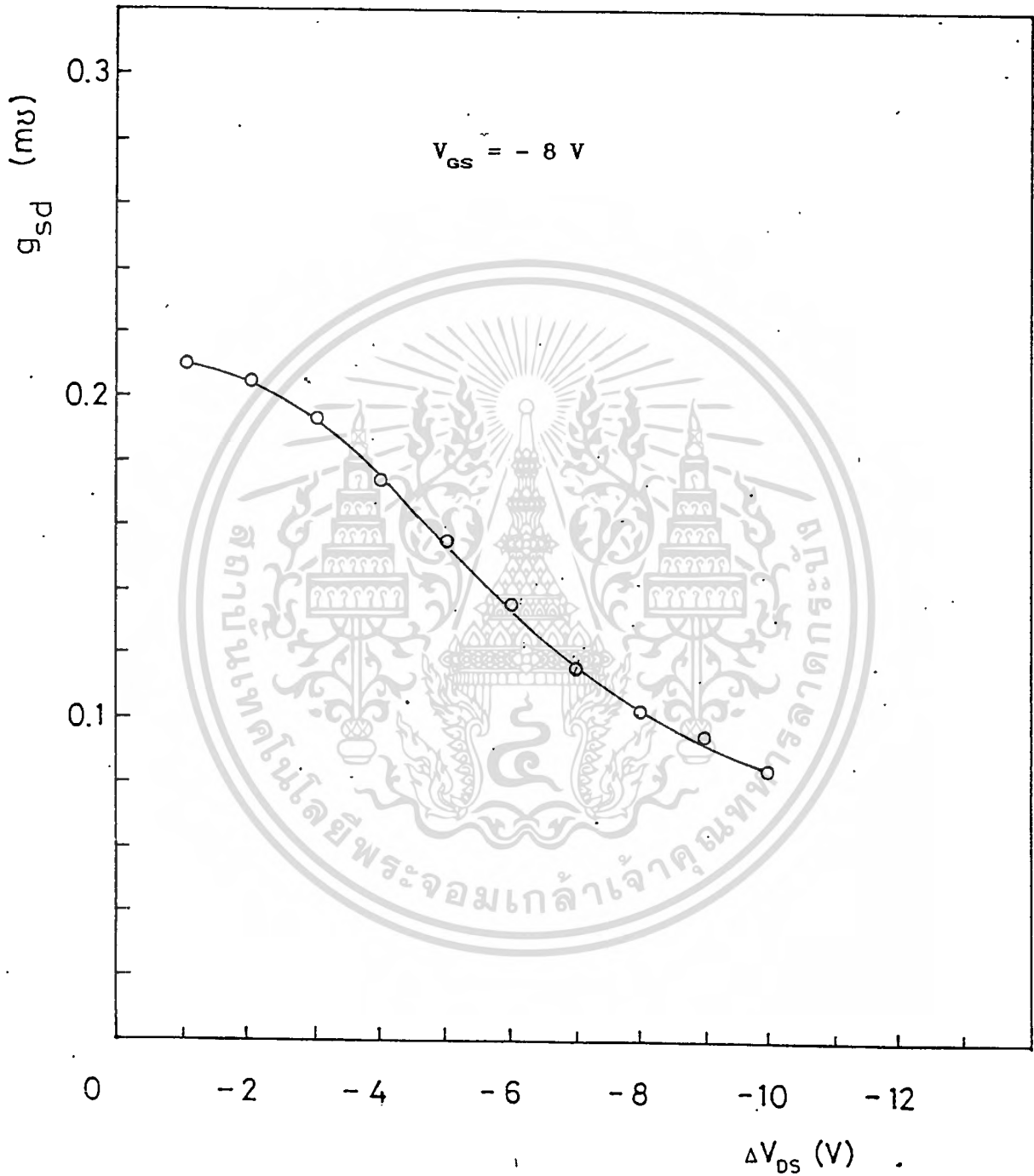
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พหุคูณแรงดัน  $V_{DS}$  ซึ่งเราสามารถหาค่า  $g_{sd}$  ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของพีมอซซีเฟตดังรูปที่ 5.2 และเมื่อนำค่า  $g_{sd}$  ที่คำนวณได้จากกราฟมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $g_{sd}$  กับ  $V_{DS}$  จะได้กราฟดังรูป 5.4



รูปที่ 5.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $g_{m(sat)}$  กับ  $\Delta V_{GS}$  ของพีมอซซีเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$   
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $g_{sd}$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  ของเมมอริสเฟลด์

ที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

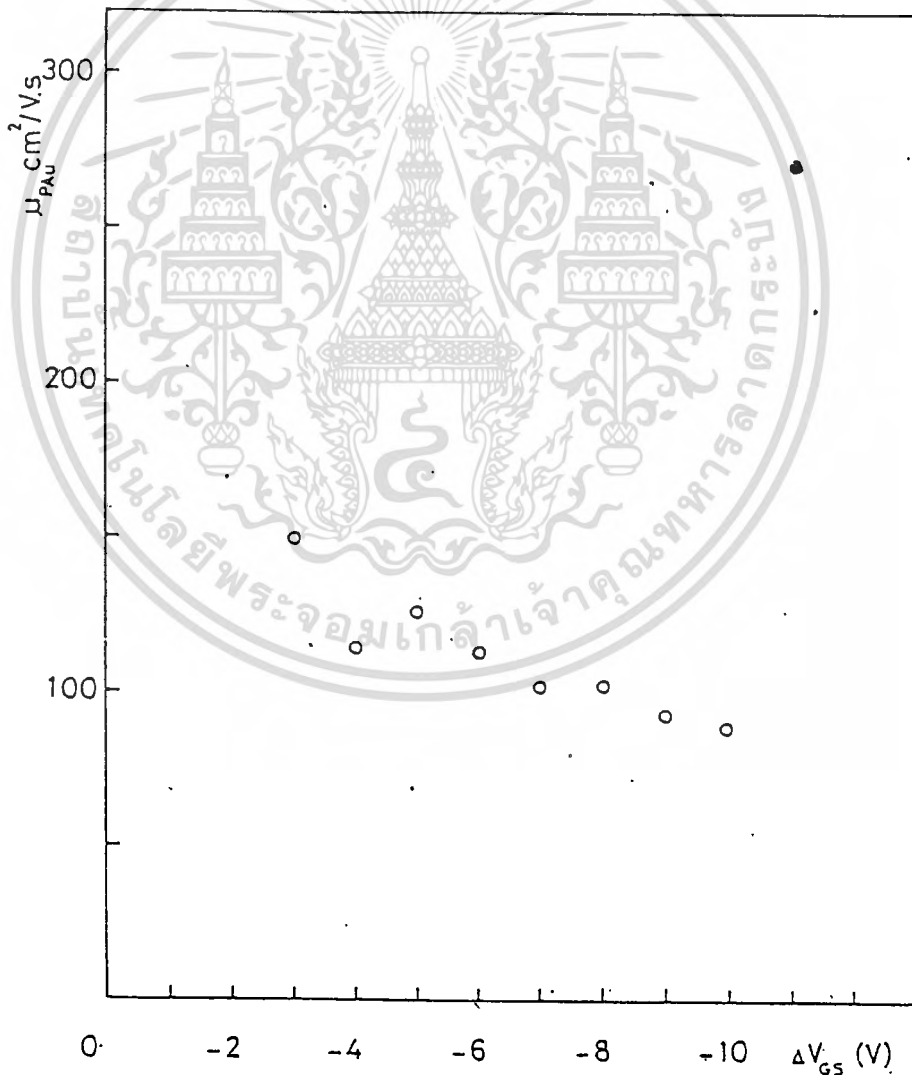
### 5.1.3 การหาค่าความคล่องตัวของประจุพาหะโฮล ( $\mu_{pAu}$ ) ของพีมอยซ์เฟต

ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะโฮล ( $\mu_{pAu}$ ) ของพีมอยซ์เฟตสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของพีมอยซ์เฟตจากรูปที่ 5.2 โดยใช้สมการกระแส  $I_{DS}$  ที่ 5.1 ของพีมอยซ์เฟตมาคำนวณ

$$\text{จาก } I_{DS} = \mu_{pAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS} - (V_{DS}^2 / 2)]$$

$$\text{ดังนั้น } \mu_{pAu} = [I_{DS} / \{(\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS} - (V_{DS}^2 / 2)]\}] \quad (5.13)$$

ผลจากการคำนวณหาค่า ( $\mu_{pAu}$ ) เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ( $\mu_{pAu}$ ) กับค่าแรงดัน  $V_{GS}$  จะได้กราฟดังรูปที่ 5.5



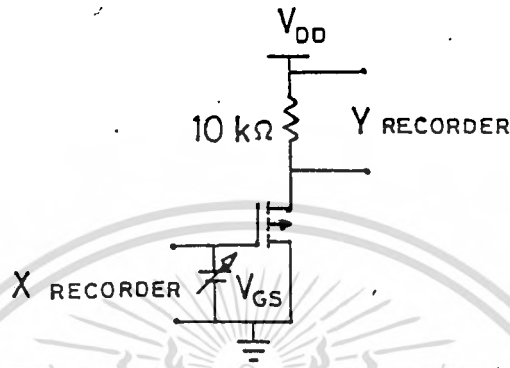
รูปที่ 5.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ( $\mu_{pAu}$ ) กับแรงดัน  $V_{GS}$  ของพีมอยซ์เฟต

ที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.1.4 การวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage : $V_T$ ) ของพินมอยซ์เฟลต

การวัดค่าแรงดันขีดเริ่มทำได้โดยใช้วงจรการวัดดังรูป 5.6 แล้วใช้เครื่องบันทึก 2 แกน บันทึกผล โดยบันทึกเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$



รูปที่ 5.6 แสดงวงจรการวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม

ผลจากการทดลองวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 5.7 เนื่องจากการหาค่าแรงดันขีดเริ่มจะทำให้ช่วงที่เฟลตทำงานในช่วงอิมิตัว เช่นเดียวกับในกรณีของมอสเฟลต ดังนั้นเราจะอ้างอิงสมการของมอสเฟลตเพื่อใช้กับมอยซ์เฟลต สำหรับหาค่าแรงดันขีดเริ่มจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  พิจารณาเฟลตที่ทำงานในช่วงอิมิตัวจะได้ว่า  $V_{DS} > V_G - V_T$  ดังนั้นจากสมการกระแสจะได้

$$I_{DS} = \beta/2(V_G - V_T)^2 \quad (5.14)$$

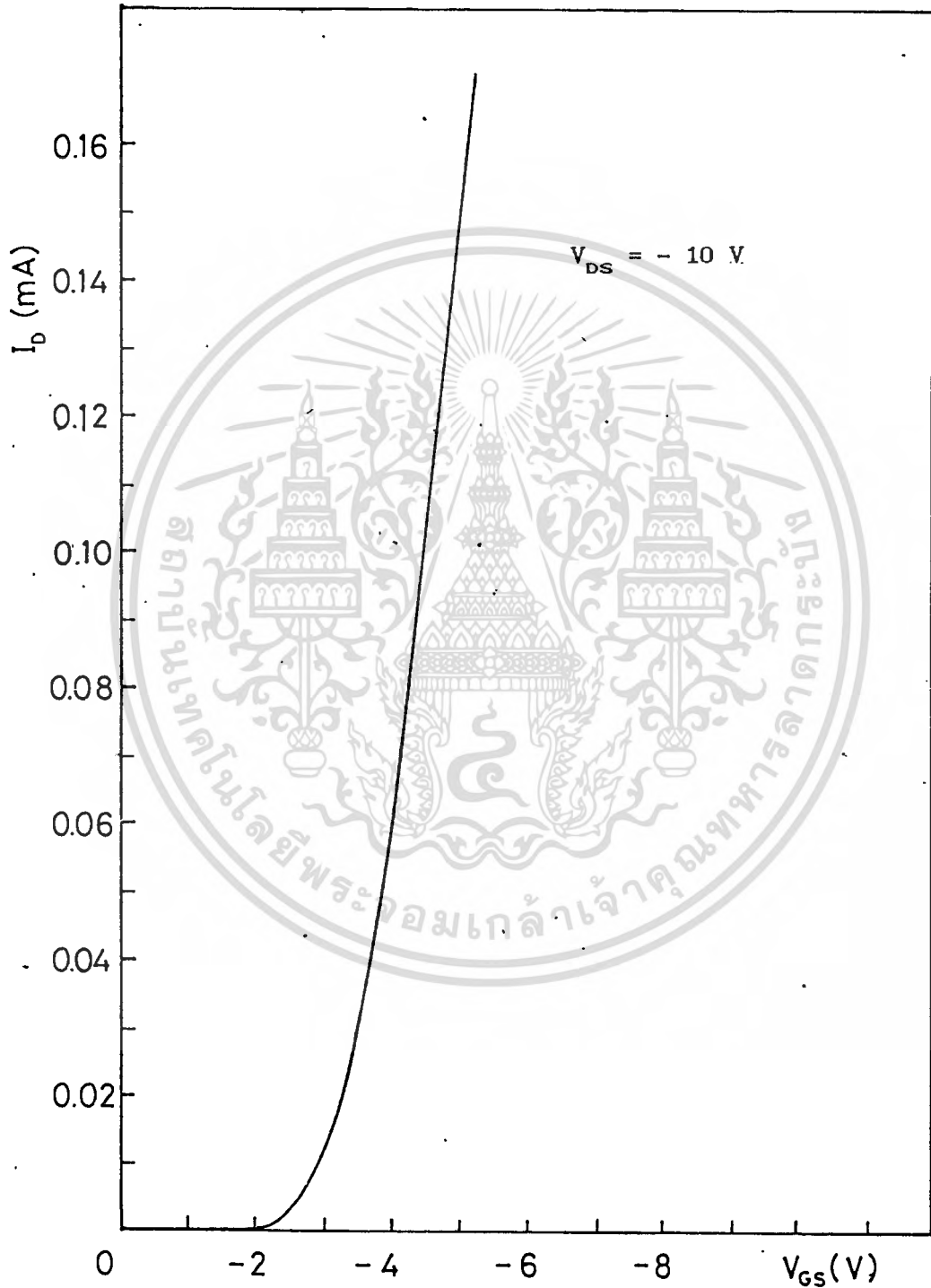
$$(I_{DS})^{1/2} = (\beta/2)^{1/2}(V_G - V_T) \quad (5.15)$$

เมื่อพิจารณากระแส  $(I_{DS})^{1/2} = 0$  จะได้ว่า

$$V_T = V_G \quad (5.16)$$

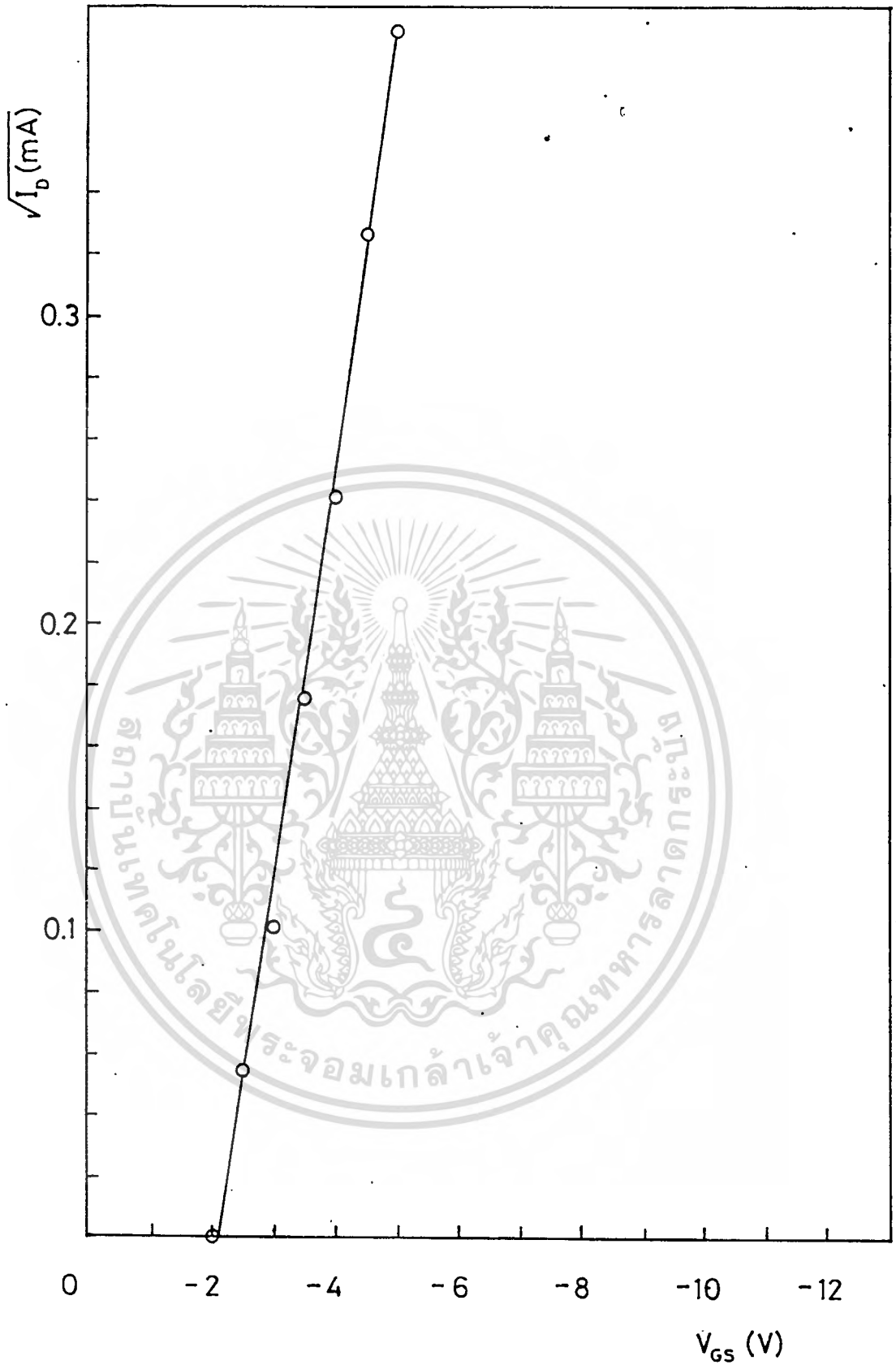
ดังนั้นจากผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  ดังรูปที่ 5.7 เมื่อนำค่ากระแส  $I_{DS}$  มาคำนวณหาค่า  $(I_{DS})^{1/2}$  แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(I_{DS})^{1/2}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  ได้ดังรูปที่ 5.8 จุดที่กระแส  $(I_{DS})^{1/2} = 0$  ค่าแรงดัน  $V_G$  ที่ได้ก็คือค่า  $V_T$  นั้นเอง ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 5.8 จึงอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มได้มีค่าเท่ากับ - 2.1 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส  $I_{DS}$  กับ แรงดัน  $V_{GS}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(I_{DS})^{1/2}$  กับ แรงดัน  $V_{GS}$

ของฟิล์มยอซ์เฟดที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.5 การวัดค่าการตอบสนองต่อความถี่ของมอดูล์เฟต

ในการหาค่าความถี่สูงสุดที่มอดูล์เฟตจะตอบสนองได้ ( $f_o$ ) สามารถหาได้ด้วยวิธีการคำนวณโดยการคำนวณจากสมการดังนี้

$$\text{จาก} \quad g_m = 1/X_c = 2\pi fC \quad (5.17)$$

$$\text{หรือ} \quad f = g_m/2\pi C_G \quad (5.18)$$

เมื่อ  $X_c$  = ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุ

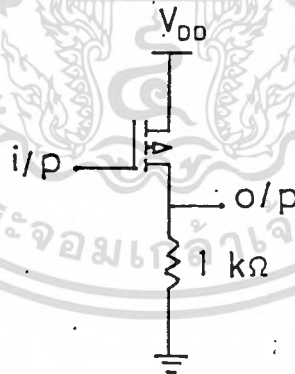
$g_m$  = ทรานส์คอนดักแตนซ์ของมอดูล์เฟต

$C_G$  = ค่าความจุไฟฟ้าที่เกต =  $C_o \cdot A$

$$\text{จะได้ว่า} \quad f_{o(\text{sat})} = (\mu_{pAu} \epsilon_{ox} \epsilon_o / T_{ox}) (w/L) (V_G - V_T) / (2\pi \epsilon_{ox} \epsilon_o / T_{ox}) (w \cdot L)$$

$$\text{หรือ} \quad f_{o(\text{sat})} = \mu_{pAu} |V_G - V_T| / 2\pi L^2 \quad (5.19)$$

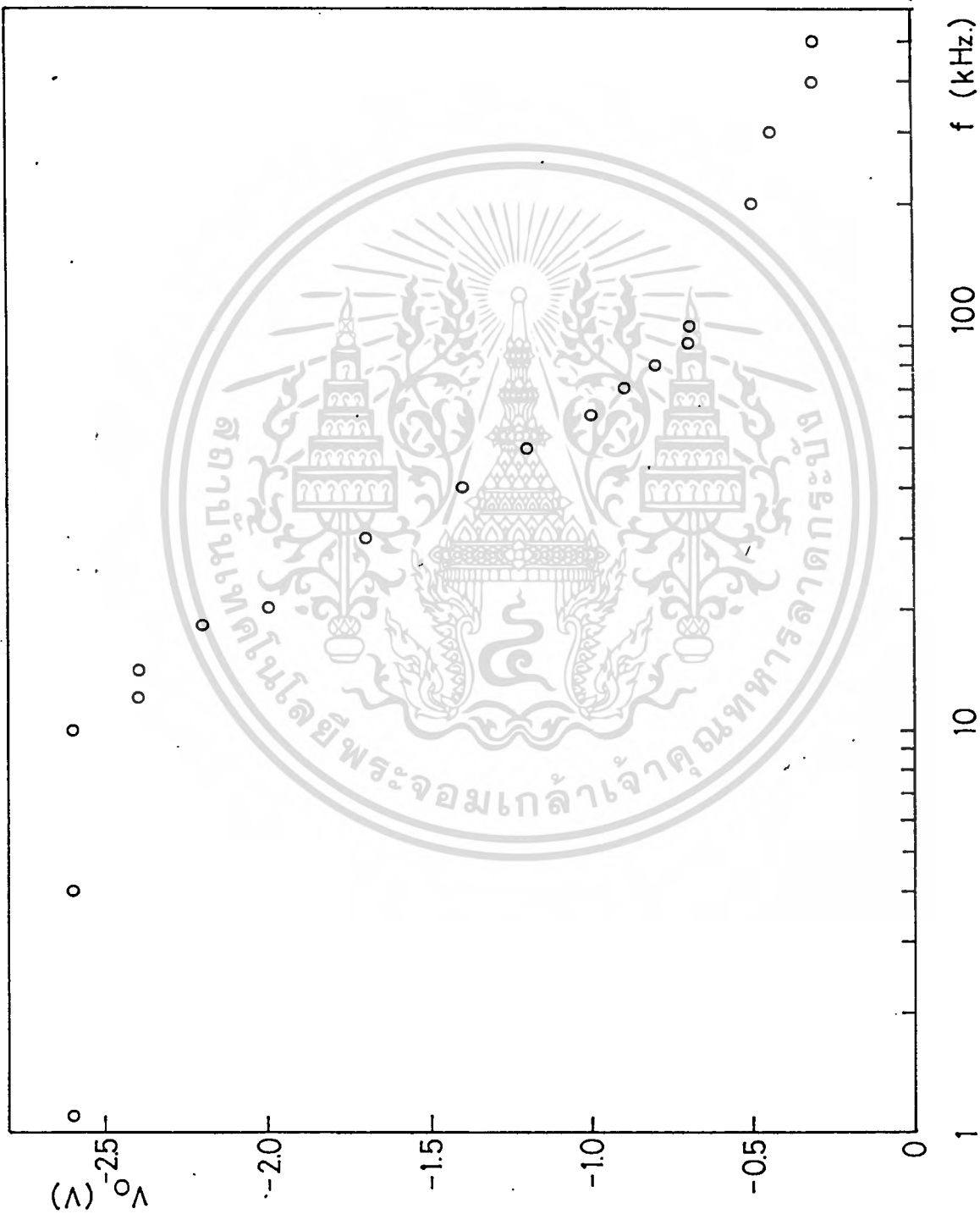
ในกรณีของมอดูล์เฟต ก็สามารถคำนวณหาค่า  $f_{o(\text{sat})}$  จากสมการได้เช่นเดียวกันแต่ในการแทนค่าพารามิเตอร์บางตัวลงในสมการ จะต้องใช้ค่าของมอดูล์เฟต ในการหาค่า  $f_o$  ในตอนนี้จะเป็นการหาค่า  $f_o$  ด้วยการวัดจริงจากมอดูล์เฟตที่สร้างขึ้น โดยใช้วงจรการวัดแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงวงจรที่ใช้วัดการตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ของมอดูล์เฟต

นำผลการทดลองนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่ได้ดังรูปที่ 5.10. จากกราฟเราจะหาค่าความถี่ที่มอดูล์เฟตสามารถตอบสนองสูงสุด ( $f_o$ ) ได้โดยดูที่จุดที่แรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) มีค่าลดลงเหลือ 70. % ซึ่งจะอ่านค่าได้เท่ากับ 28 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



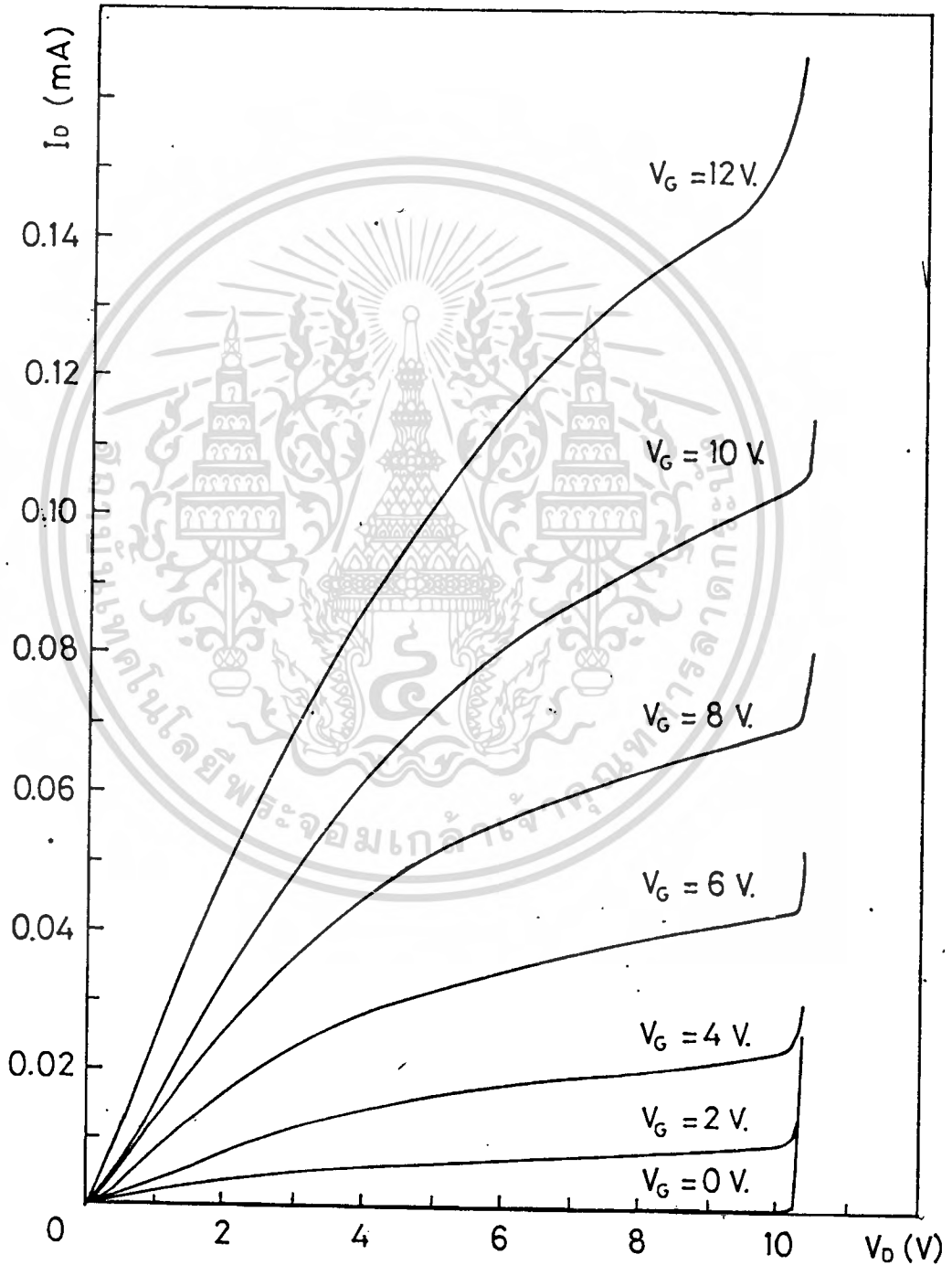
รูปที่ 5.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่

ของขั้วมอยซ์เฟตที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การวิเคราะห์การทำงานของเอ็นเมอชพีเฟต

จากผลการทดลองสร้างเอ็นเมอชพีเฟตบนฐานรองซิลิกอนเริ่มต้นชนิดเอ็น ที่ถูกแพรวะอะตอมทองคำ, เข้าไปในฐานรองนั้นเมื่อนำเอ็นเมอชพีเฟตที่สร้างขึ้นในการทดลองตอนที่ 4.1.3.2 มาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเอ็นเมอชพีเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ใน  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$  บันทึกด้วยเครื่องบันทึก 2 แกน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะโครงสร้างของเอ็นเมอชพีเฟต พบว่าจะมีลักษณะคล้ายกับเอ็นเมอสเฟต จะต่างกัน เฉพาะที่ฐานรองเท่านั้น ดังนั้นในการพิจารณาคุณสมบัติของเอ็นเมอชพีเฟตจะใช้สมการของเอ็นเมอสเฟต เป็นสมการอ้างอิง ซึ่งจะได้สมการกระแส  $I_{DS}$  เป็น

$$I_{DS} = \mu_{nAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS} - (V_{DS}^2 / 2)] \quad (5.20)$$

โดยที่  $\mu_{nAu}$  เป็น Mobility ของอิเล็กตรอนในซิลิกอนชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของ ทองคำ และกำหนดให้  $\mu_{nAu} = \alpha_{nAu} \mu_n$  (5.21)

โดย  $\alpha_{nAu}$  : proportional constant ในกรณีของอิเล็กตรอน

$$\text{หรือ} \quad \alpha_{nAu} = \mu_{nAu} / \mu_n \quad (5.22)$$

สมการที่ 5.20 เป็นสมการทั่วไปของกระแสของเอ็นเมอชพีเฟต เมื่อพิจารณาการทำงาน ในช่วงอิมิตัวของเอ็นเมอชพีเฟตก็จะใช้หลักการเดียวกับของเอ็นเมอสเฟต คือในช่วงกระแสอิมิตัว

$(V_G - V_T) = V_{DS}$  ดังนั้นสมการที่ 5.20 จะเขียนเป็นสมการกระแส  $I_{DS}$  ในช่วงกระแสอิมิตัวได้เป็น

$$I_{DS} = \mu_{nAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T)^2 / 2] \quad (5.23)$$

สมการที่ 5.20 เป็นสมการทั่วไปของกระแสของเอ็นเมอชพีเฟต เมื่อพิจารณาการทำงาน ในช่วงเชิงเส้นของเอ็นเมอชพีเฟตก็จะใช้หลักการเดียวกับของเอ็นเมอสเฟต คือในช่วงเชิงเส้น

$(V_G - V_T) > V_{DS}$  ดังนั้นสมการที่ 5.20 จะเขียนเป็นสมการกระแส  $I_{DS}$  ในช่วงเชิงเส้นได้เป็น

$$I_{DS} = \mu_{nAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS}] \quad (5.24)$$

จากสมการกระแส  $I_{DS}$  ของเอ็นเมอชพีเฟตที่ 5.23 และ 5.24 สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ และคำนวณหาคุณสมบัติและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์อื่น ๆ ของเอ็นเมอชพีเฟตได้

### 5.2.1 การหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) ของเอ็นเมอชพีเฟต

ในการพิจารณาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) นั้นเราจะใช้นิยามเช่นเดียวกันกับในกรณี ของเอ็นเมอสเฟต ดังนั้นจากนิยามของ  $g_m$  จะได้ค่า  $g_m$  ดังสมการที่ 5.6 และ 5.7 คือ

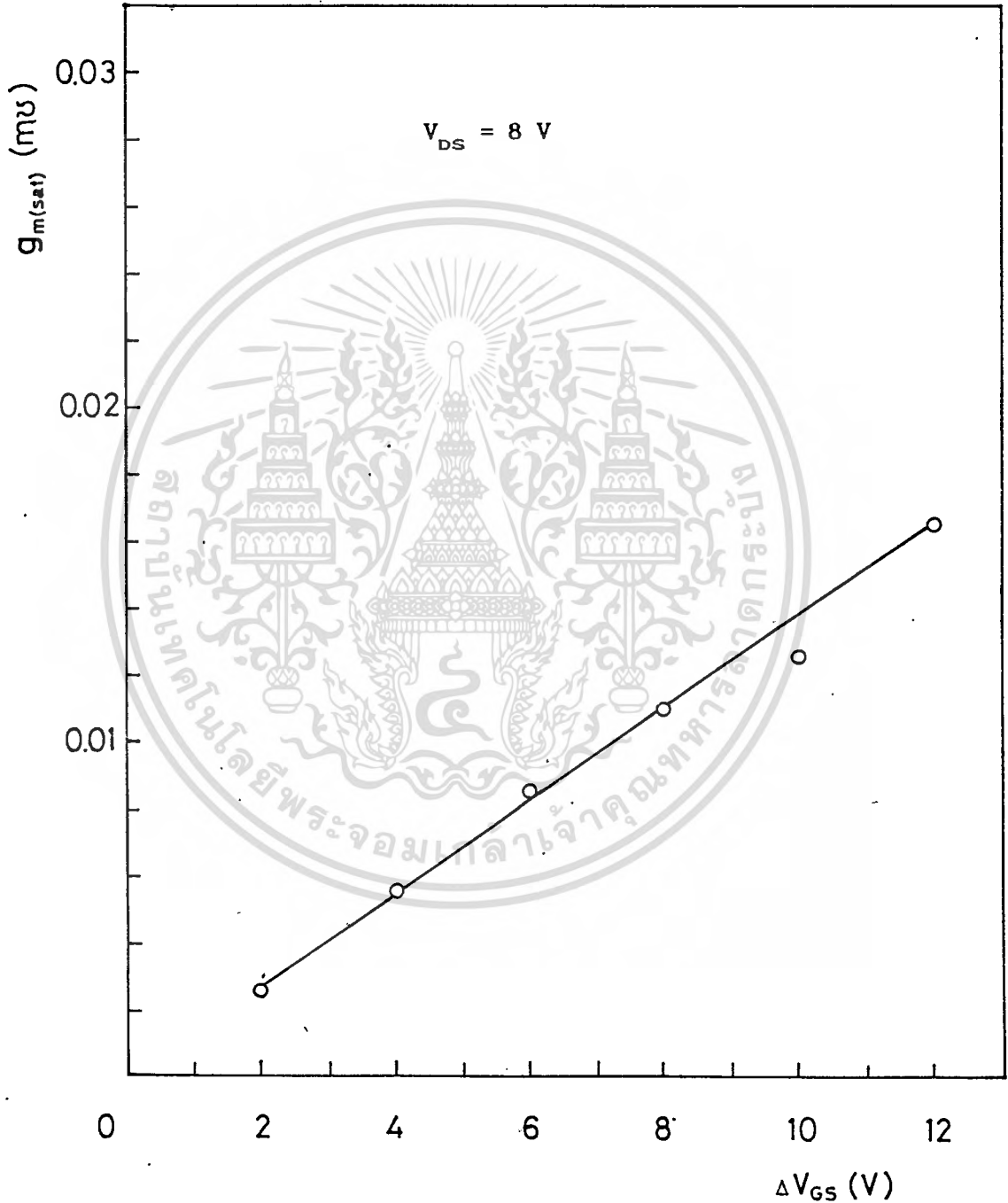
$$g_m = \Delta I_{DS} / \Delta V_G \quad \text{โดยที่ } V_{DS} \text{ คงที่}$$

$$\text{หรือ} \quad g_m = \beta V_{DS}$$

และในช่วงกระแสอิมิตัวจะได้ดังสมการที่ 5.8 คือ  $g_m^{(sat)} = \beta (V_G - V_T)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  และแรงดัน  $V_{DS}$  ของเอ็นเมอช้เฟตดังรูปที่ 5.11 สามารถนำมาคำนวณหาค่า  $g_m$  ได้ และค่า  $g_m$  ที่คำนวณได้จากกราฟจะเป็นค่าที่คำนวณในช่วงกระแสอิ่มตัว ซึ่งก็คือค่า  $g_{m(sat)}$  ผลจากการคำนวณค่า  $g_{m(sat)}$  เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เกต ( $\Delta V_G$ ) จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $g_{m(sat)}$  กับ  $\Delta V_{GS}$  ของเอ็นเมอช้เฟต

ที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 การหาค่าชอส-เดรน คอนดักแตนซ์ ( $g_{sd}$ ) ของเอ็นเมอชพีเฟต

จากนิยาม ชอส-เดรน คอนดักแตนซ์ของมอสคือ ค่าความนำไฟฟ้าของแชนแนลซึ่งจะขึ้นกับจำนวนประจุที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในชั้นกลับของช่องทางเดินกระแส การหาค่าชอส - เดรน คอนดักแตนซ์ของเอ็นเมอชพีเฟต เราจะอ้างอิงจากนิยามของเอ็นเมอชพีเฟต เช่นเดียวกัน ดังนั้นเราสามารถหาค่า  $g_{sd}$  ได้จากสมการที่ 5.11 คือ

$$g_{sd} = \Delta I_{DS} / \Delta V_{DS} \quad \text{โดยที่ } V_G \text{ มีค่าคงที่}$$

จากสมการ  $I_{DS}$  ในช่วงเชิงเส้นที่ 5.24 จะได้ว่า

$$I_{DS} = \beta [(V_G - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 / 2]$$

ดังนั้น

$$g_{sd} = \beta (V_G - V_T - V_{DS})$$

ในช่วงอิ่มตัวจะได้  $g_{sd(sat)} = 0$

ในกรณีของเอ็นเมอชพีเฟตก็จะสามารถหาค่า  $g_{sd}$  ได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์พุทต่อแรงดัน  $V_{DS}$  ในทางปฏิบัติเราสามารถคำนวณหาค่า  $g_{sd}$  ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  ในรูปที่ 5.11 เช่นเดียวกัน และถ้านำค่า  $g_{sd}$  ที่คำนวณได้กับค่าแรงดัน  $V_{DS}$  มาเขียนเป็นกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 5.13

### 5.2.3 การหาค่าความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน ( $\mu_{nAu}$ ) ของเอ็นเมอชพีเฟต

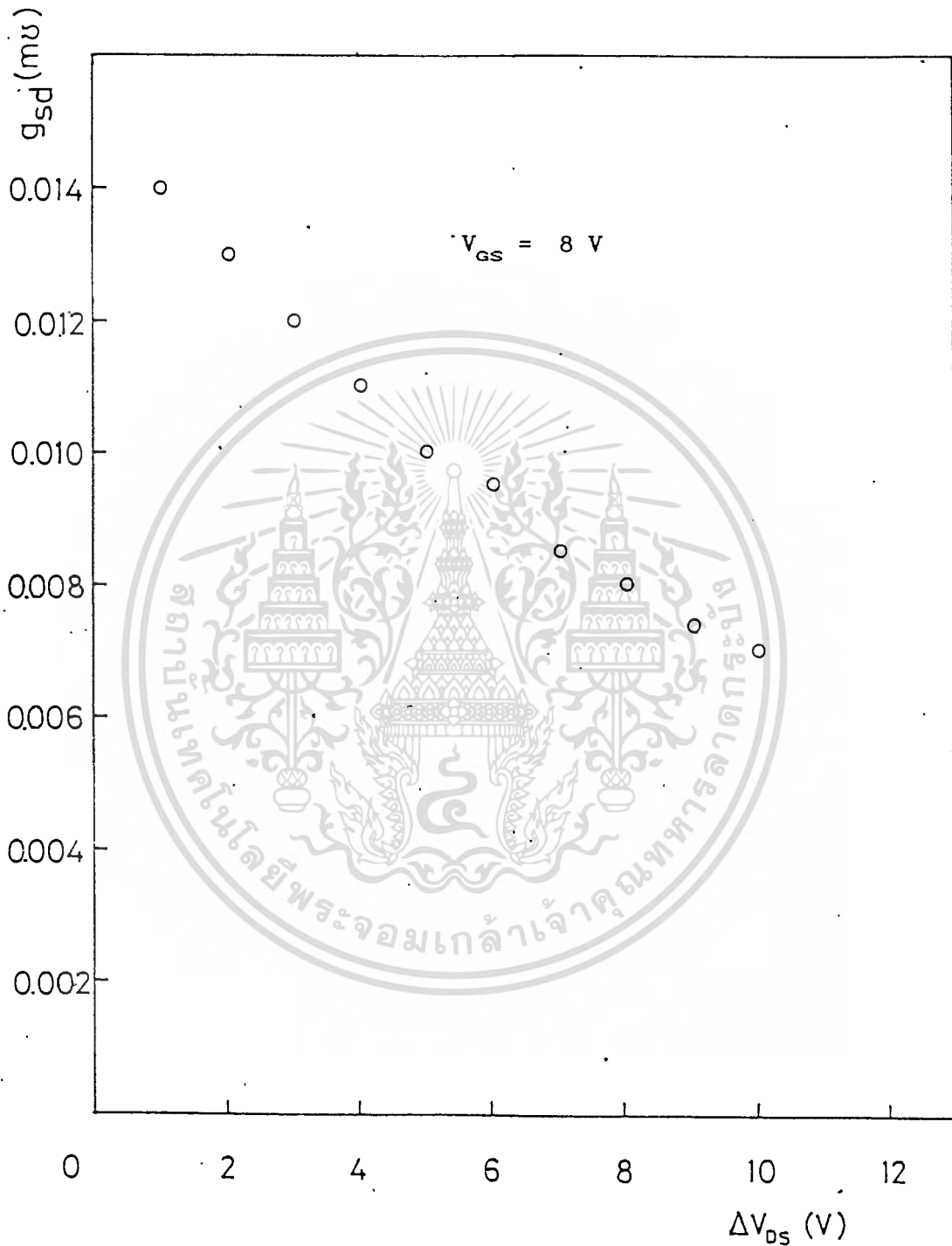
ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน ( $\mu_{nAu}$ ) ของเอ็นเมอชพีเฟตสามารถคำนวณหาได้จากผลการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{DS}$  จากรูปที่ 5.11 โดยการคำนวณด้วยสมการกระแส  $I_{DS}$  ที่ 5.20 จากสมการที่ 5.20

$$I_{DS} = \mu_{nAu} (\epsilon_o \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS} - (V_{DS}^2 / 2)]$$

ดังนั้น  $\mu_{nAu} = [I_{DS} / \{ (\epsilon_{ox} \epsilon_o / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS} - (V_{DS}^2 / 2)] \}] \quad (5.25)$

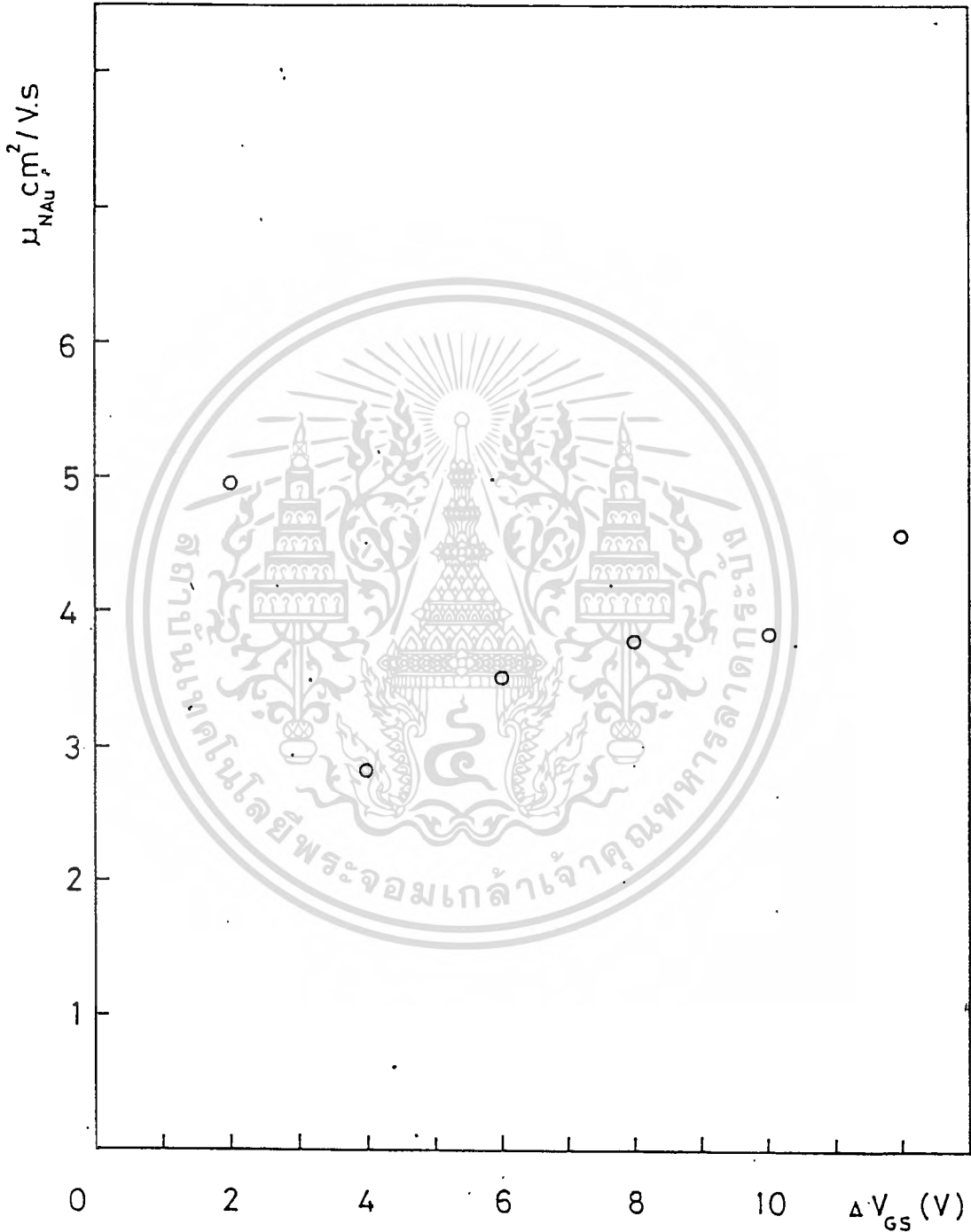
ผลจากการคำนวณหาค่า  $\mu_{nAu}$  เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\mu_{nAu}$  กับค่าแรงดัน  $V_{GS}$  จะได้ว่าความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 5.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $g_{sd}$  กับ แรงดัน  $V_{DS}$

ของอินเมอซซ์เฟตที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$



รูปที่ 5.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\mu_{NAU}$  กับ แรงดัน  $V_{GS}$

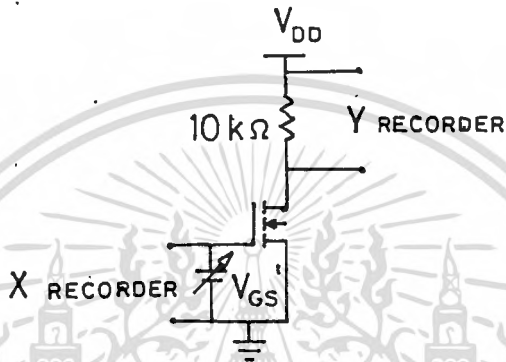
ทองเส้นเมอริต์เฟดที่มีขนาด  $w = 200 \mu m$ ,  $L = 20 \mu m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.2.4 การวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage: $V_T$ ) ของเอ็นเมอซเฟต

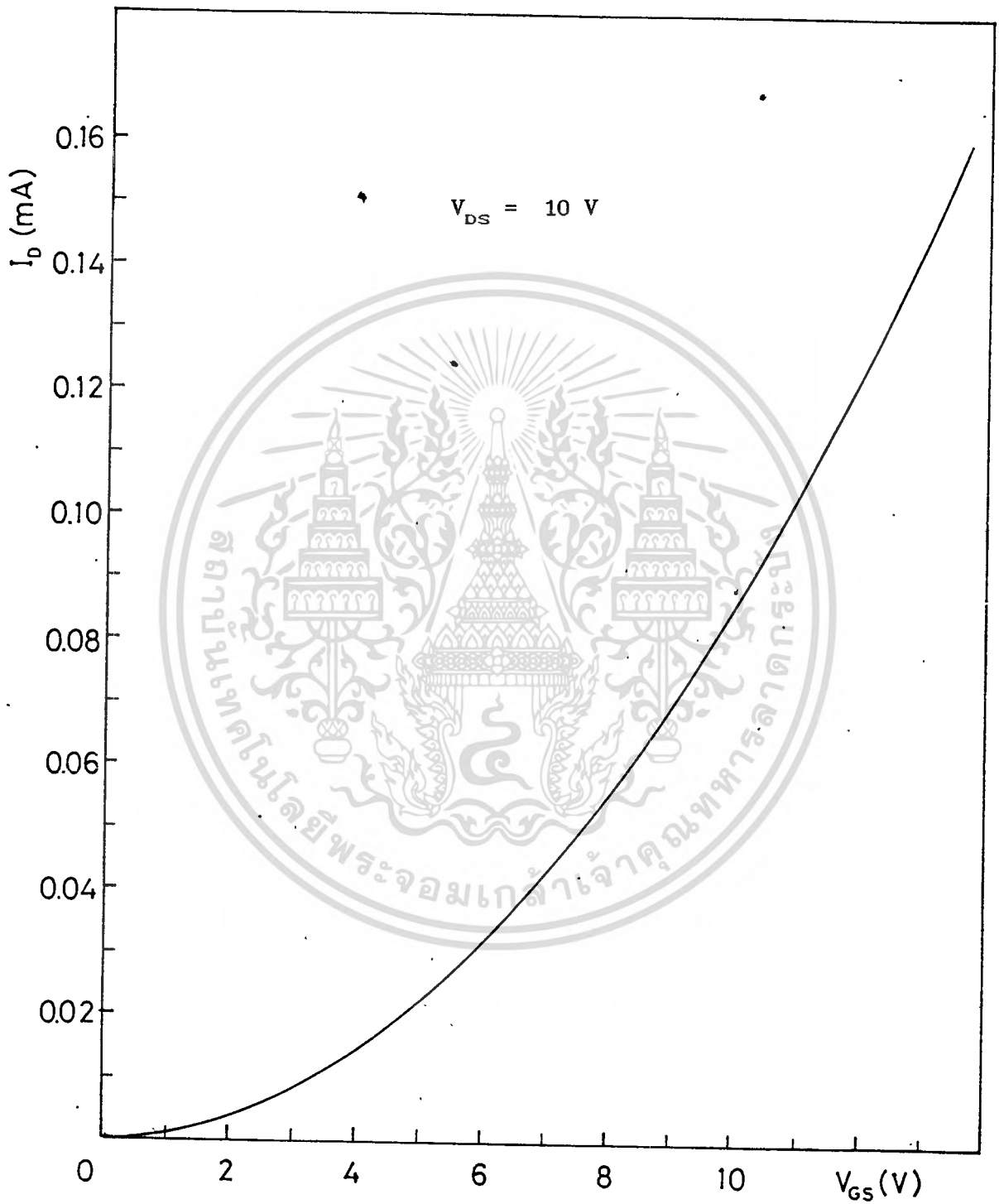
การวัดค่าแรงดันขีดเริ่มจะต้องทำการวัดหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  ก่อน โดยใช้วงจรการวัดดังรูป 5.15 แล้วใช้เครื่องบันทึก 2 แกนบันทึกผลโดยบันทึกเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$



รูปที่ 5.15 แสดงวงจรการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นเมอซเฟต

ผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  แสดงดังกราฟรูปที่ 5.16 ในการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มนั้น จะวัดในช่วงที่เฟตทำงานในช่วงอิมิตัว พิจารณาเฟตที่ทำงานในช่วงอิมิตัวจะได้ว่า  $V_{DS} > V_G - V_T$  ดังนั้นจะได้สมการกระแสดังสมการที่ 5.14 และ 5.15 เมื่อพิจารณากระแส  $(I_{DS})^{1/2} = 0$  จะได้ว่า  $V_T = V_G$ .

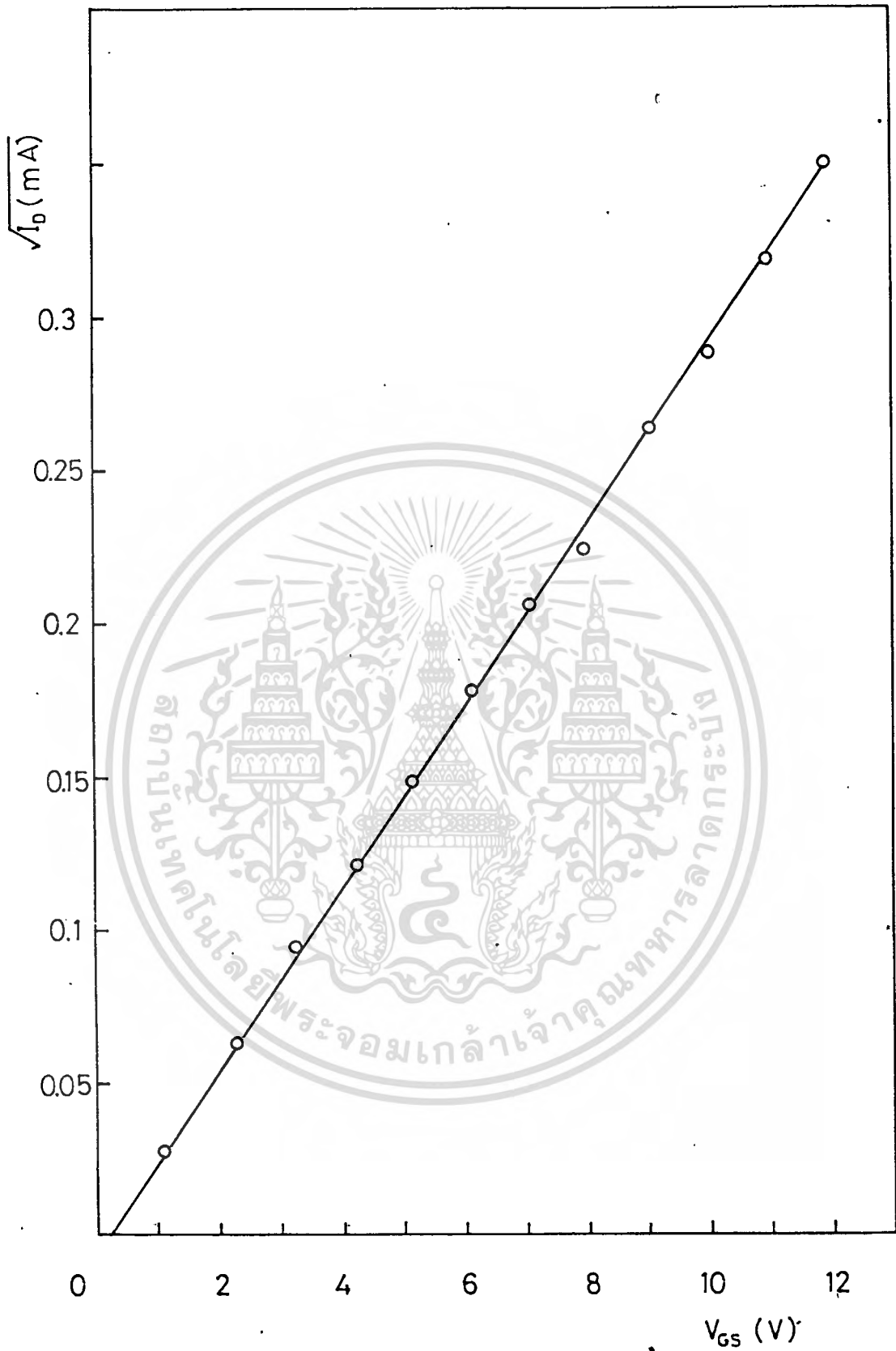
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I_{DS}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  รูปที่ 5.16 เรายังไม่สามารถอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มได้ ในการอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มนั้น เราต้องพิจารณาจากสมการกระแส  $I_{DS}$  เช่นเดียวกับในกรณีของเอ็นเมอสเฟต จากกราฟรูปที่ 5.16 เมื่อนำมาคำนวณหาค่า  $(I_{DS})^{1/2}$  แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(I_{DS})^{1/2}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  ได้กราฟดังรูป 5.17 ซึ่งจะสามารถหาค่าแรงดันขีดเริ่มได้ โดยที่ค่าของแรงดันขีดเริ่มก็คือค่าของแรงดัน  $V_G$  ที่เริ่มมีกระแส  $I_{DS}$  ไหลหรือคือค่า  $V_G$  ที่จุดกระแส  $(I_{DS})^{1/2} = 0$  ดังนั้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(I_{DS})^{1/2}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  รูปที่ 5.17 จึงอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มที่กระแส  $(I_{DS})^{1/2} = 0$  ได้เท่ากับ 0.2 โวลต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส  $I_{DS}$  กับ แรงดัน  $V_{GS}$

ของเอ็นเมอส์เฟตที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



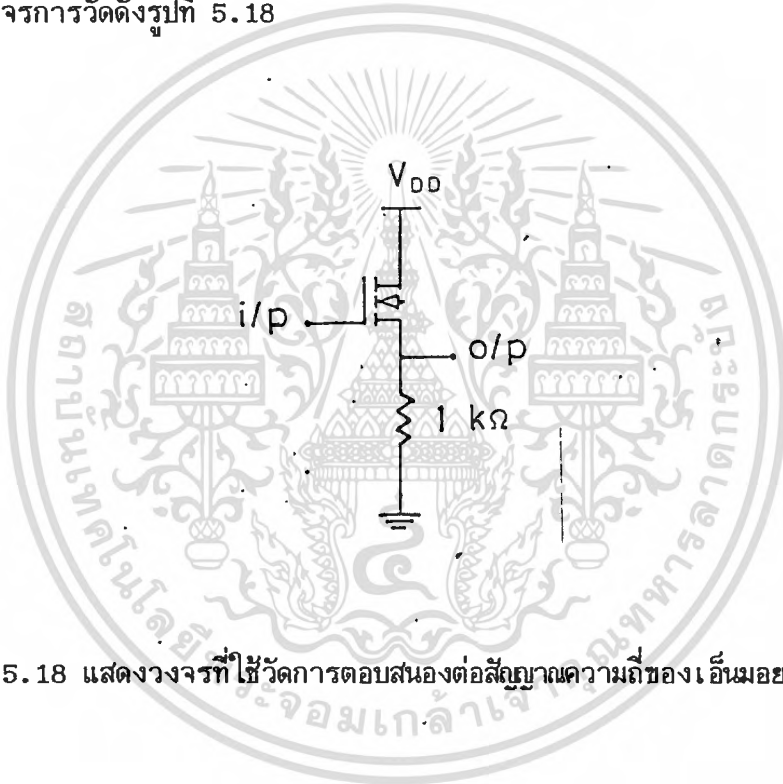
รูปที่ 5.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(I_{DS})^{1/2}$  กับ แรงดัน  $V_{GS}$

ของเอ็นเมอรัลเฟตที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.5 การวัดค่าการตอบสนองต่อความถี่ของเอ็นเมอซซ์เฟต

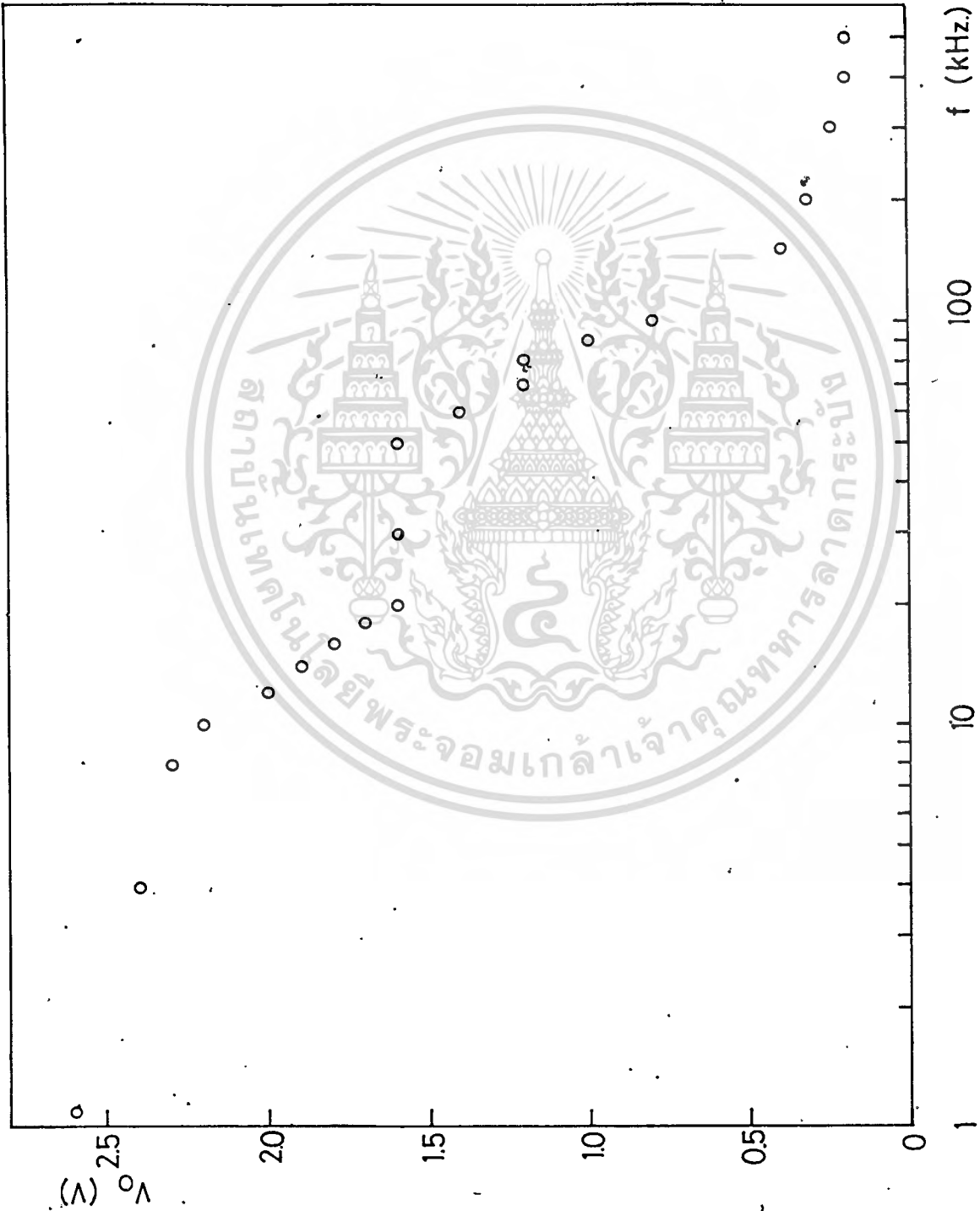
ในการหาค่าความถี่สูงสุดที่เอ็นเมอซซ์เฟตจะตอบสนองได้ ( $f_o$ ) จะใช้หลักการพิจารณาเช่นเดียวกับในกรณีของพีเอ็มเอซซ์เฟต คือจะสามารถคำนวณค่า  $f_o$  ได้จากสมการที่ 5.19 ได้เช่นกันโดยแทนค่า  $\mu_{PMOS}$  ลงในสมการ แต่การหาค่า  $f_o$  ของเอ็นเมอซซ์เฟตในตอนนี้เป็นารวัดค่า  $f_o$  จริงจากการทดลอง โดยใช้วงจรการวัดดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แสดงวงจรที่ใช้วัดการตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ของเอ็นเมอซซ์เฟต

เมื่อนำผลการทดลองนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  กับความถี่  $f_o$  ได้กราฟดังรูปที่ 5.19 จากกราฟเราจะหาค่าความถี่ที่พีเอ็มเอซซ์เฟตสามารถตอบสนองสูงสุด ( $f_o$ ) ได้โดยดูที่จุดที่แรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) มีค่าลดลงเหลือ 70 % ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าพีเอ็มเอซซ์เฟตมีการตอบสนองต่อความถี่สูงสุดได้เท่ากับ 26 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่

ของเก็วมอชท์เฟดท์ที่มีขนาด  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิจารณ์

การพัฒนาโครงสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดใหม่แบบ MOIS

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้าง การทำงาน และคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ หรือมอสเฟต เนื่องจากประสบกับปัญหาการเลือกชนิดของฐานรอง ให้เหมาะสมกับชนิดของมอสที่จะทำการสร้าง ทำให้มีแนวความคิดที่จะสร้างมอสเฟตบนฐานรองตัวกลางที่สามารถใช้สร้างทั้งพีมอส และเอ็นเมอสได้

จากการศึกษาโครงสร้างของไดโอดแบบ p-i-n<sup>+</sup> นั้นทำให้ได้แนวความคิดที่จะใช้ฐานรองชนิดอินทรินซิกของ p-i-n<sup>+</sup> ไดโอดมาเป็นฐานรองสำหรับสร้างมอสเฟต ซึ่งจะทำได้มอสเฟตที่มีโครงสร้างใหม่ โดยจะมีส่วนประกอบของเกทที่เป็นโลหะ (Metal) กับฉนวน SiO<sub>2</sub> (Oxide) และส่วนฐานรองที่เป็นชนิดอินทรินซิก (Intrinsic Semiconductor) ดังนั้นจะเรียกทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างใหม่นี้ว่า MOIS Transistor หรือ MOIS FET (มอซเฟต) ทรานซิสเตอร์แบบมอซเฟตนี้มีข้อดีคือสามารถสร้างเอ็นเมอซ หรือพีมอซบนฐานรองชนิดอินทรินซิกได้ และฐานรองชนิดอินทรินซิกนั้นสามารถสร้างจากฐานรองซิลิกอนชนิดพีหรือชนิดเอ็นได้ ซึ่งฐานรองชนิดอินทรินซิกนี้สามารถสร้างได้ในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้ นอกจากนี้จากการที่สามารถสร้างทั้งเอ็นเมอซและพีมอซบนฐานรองชนิดอินทรินซิกได้ ทำให้สามารถพัฒนาโครงสร้างของมอซเฟตไปสู่โครงสร้างแบบคอมพลีเมนต์ารีมอซ (Complementary MOIS; CMOIS) ที่ไม่ต้องมีบ่อแยกได้ ทำให้สามารถสร้างวงจรรวมที่มีโครงสร้างแบบ CMOIS ได้ง่ายขึ้น

การออกแบบ, การสร้าง และการเก็บบรรจุ

ในขั้นตอนการออกแบบจะพิจารณาหลักการในการออกแบบเช่นเดียวกับมอสเฟต โดยจะทำการพิจารณาโครงสร้างทางเรขาคณิต คือขนาดของช่องทางเดินกระแสเป็นหลัก ซึ่งในการศึกษาโครงสร้างของมอซเฟตจะออกแบบให้มอซเฟตมีขนาดของช่องทางเดินกระแสต่าง ๆ กันและในการประยุกต์มอซเฟต ไปสู่วงจรรวมแบบ CMOIS ก็ยังพิจารณาโครงสร้างทางเรขาคณิต  $\sigma_x$  คืออัตราส่วนระหว่างขนาดของมอซเฟตตัวขับ ( $\sigma_0$ ) ต่อขนาดของมอซเฟตตัวโหลด ( $\sigma_L$ ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสร้างที่ใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้างมอยซ์เฟตนั้น จะใช้กระบวนการสร้างคล้าย ๆ กับของมอสเฟต จะเพิ่มขั้นตอนการแพร่อะตอมของทองคำเข้ามา เพื่อเปลี่ยนชนิดของฐานรองให้เป็นชนิดอินทรีชนิด การสร้างพีมอยซ์นั้น เราจะใช้สารเจือโบรอนเป็นสารเจือที่เติมเข้าไปเพื่อสร้างส่วนเดรน - ซอส ส่วนการสร้างเอ็นมอยซ์จะใช้สารเจือฟอสฟอรัสเป็นสารเจือที่เติมเข้าไปเพื่อสร้างส่วนเดรน - ซอส ขั้นตอนการสร้างเกตออกไซด์ จะใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งสร้างเกตออกไซด์ให้มีความหนาประมาณ  $700 \text{ \AA}$

ในกระบวนการสร้างมอยซ์เฟตนั้นจะมี 2 กระบวนการคือ กระบวนการสร้างที่ 1 เป็นกระบวนการสร้างสำหรับสร้างพีมอยซ์เฟตหรือเอ็นมอยซ์เฟต ส่วนกระบวนการสร้างที่ 2 เป็นกระบวนการสร้างสำหรับสร้างเอ็นมอยซ์ โดยเพิ่มขั้นตอนการเติมอะตอมสารเจือซดเซย์ในบริเวณของช่องทางเดินกระแสเพื่อการซดเซย์ให้เอ็นมอยซ์เฟตมีการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด และในการสร้างวงจรรวมแบบ CMOS นั้นจะใช้กระบวนการสร้างที่ 3 โดยจะเพิ่มขั้นตอนการแพร่สารเจืออีกหนึ่งขั้นตอนเพื่อสร้างทั้งพีมอยซ์ และเอ็นมอยซ์บนฐานรองเดียวกัน

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างแล้ว จึงนำ MOIS devices มาทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นก่อน แล้วจึงนำไปทำการเก็บบรรจุต่อไป ขั้นตอนการเก็บบรรจุจะใช้กระบวนการเก็บบรรจุของห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. โดยทำการตัดแยกชิปแล้วเก็บบรรจุลงในตัวถังโลหะแบบ 3 ขาหรือแบบ 8 ขา ส่วนกระบวนการเก็บบรรจุลงบนตัวถังแบบเซรามิกใช้กระบวนการเก็บบรรจุของ บริษัท ซิกเนติกส์ไทย

#### การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองขั้นแรก เป็นการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของมอยซ์เฟต ที่ได้ทดลองสร้างขึ้น การทดลองตอนนี้จะทำการวัด I-V char. ของพีมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพีและชนิดเอ็นที่ถูกแพร่อะตอมทองคำเข้าไป และเอ็นมอยซ์เฟตที่สร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพีและชนิดเอ็นที่ถูกแพร่อะตอมทองคำเข้าไปเช่นกัน (โดยกำหนดขนาดของช่องทางเดินกระแสของพีมอยซ์และเอ็นมอยซ์เฟตเป็น  $w = 400 \text{ \mu m}$ ,  $L = 40 \text{ \mu m}$ ) เพื่อทดสอบดูว่าโครงสร้างของมอยซ์เฟตแบบต่าง ๆ ทั้ง 4 แบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. พิมพ์แผ่นที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดพีที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป
2. พิมพ์แผ่นที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็นที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป
3. เอ็นมอยซ์แผ่นที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดพีที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป
4. เอ็นมอยซ์แผ่นที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็นที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป

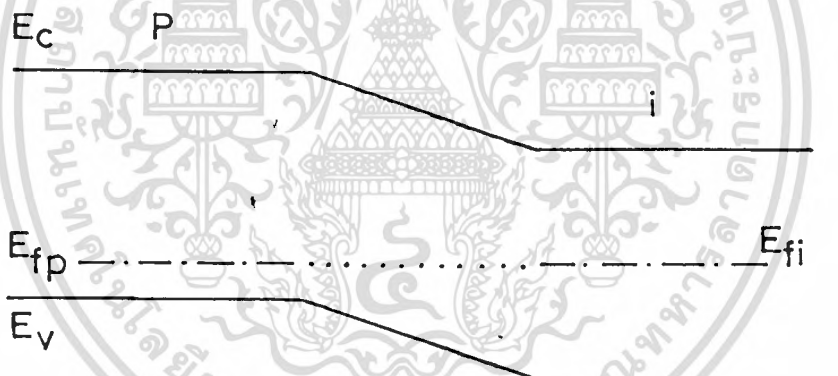
สามารถทำงานเป็นทรานซิสเตอร์ได้

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เราสามารถสร้างพิมพ์หรือเอ็นมอยซ์แผ่นบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดพี หรือชนิดเอ็นที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป จากคุณสมบัติ I-V char. ของมอยซ์แผ่นที่ได้ พบว่าทั้งพิมพ์และเอ็นมอยซ์แผ่น ที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดพีหรือชนิดเอ็นที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป ต่างก็ให้คุณสมบัติ I-V char. เช่นเดียวกับมอสเฟตทั่วไป แต่พิมพ์แผ่นที่สร้างบนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดพีที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป จะให้ลักษณะของกราฟที่มีช่วงกระแสอิมิตัวมีลักษณะเป็นความชันคล้าย ๆ กับกรณีของ Short channel Effect ดังนั้นจึงได้มีการทดลองสร้างมอยซ์แผ่นที่มีขนาดต่าง ๆ กัน คือมี  $w/L$  เป็น 400/40, 600/60, 800/80 และ 200/40 บนฐานรองเริ่มต้นชนิดพีและชนิดเอ็นที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป เพื่อศึกษาผลของ Short channel Effect จากผลการวัดคุณสมบัติ I-V char. ในกรณีของพิมพ์ที่สร้างบนฐานรองเริ่มต้นชนิดพีที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป ปรากฏว่าการที่กราฟในช่วงอิมิตัวของกระแสมีลักษณะเป็นความชัน ไม่ได้เกิดเนื่องจากผลของ Short channel Effect จากผลของการวัดคุณสมบัติ I-V char. ของมอยซ์แผ่นที่สร้างทั้งหมด พบว่าสามารถสร้างมอยซ์แผ่นทั้งพิมพ์และเอ็นมอยซ์ บนฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดพีหรือชนิดเอ็นที่ถูกแพรวะต่อมทองคำ เข้าไป ได้ และในการเลือกใช้ชนิดของฐานรองเริ่มต้นถ้าเลือกใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดพี จะต้องทำการเลือกค่าพิกัดความต้านทานให้มีค่าสูงกว่า 20-50  $\Omega\text{-cm}$  และต้องกำหนดให้มีขนาดของช่องทางเดินกระแส ( $w/L$ ) มีค่าต่ำ ๆ จึงจะทำให้มอยซ์แผ่นที่สร้างมีคุณสมบัติ I-V char. เหมือนกับมอสเฟตทั่ว ๆ ไปได้ ในกรณีที่เลือกใช้ฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็น สามารถนำมาใช้สร้างมอยซ์แผ่นซึ่งให้คุณสมบัติ I-V char. ได้ดี แต่ยังคงต้องปรับปรุงกระบวนการสร้างเพื่อที่จะให้ได้มอยซ์แผ่นที่มีโหมดการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เม้นท์โหมด

ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอยซ์แผ่นต่อไปนี้ ได้เลือกใช้ฐานรองซิลิกอน เริ่มต้นชนิดเอ็น เป็นฐานรองที่จะใช้สร้างพิมพ์และเอ็นมอยซ์แผ่น ในการศึกษาคุณสมบัติของพิมพ์แผ่นที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

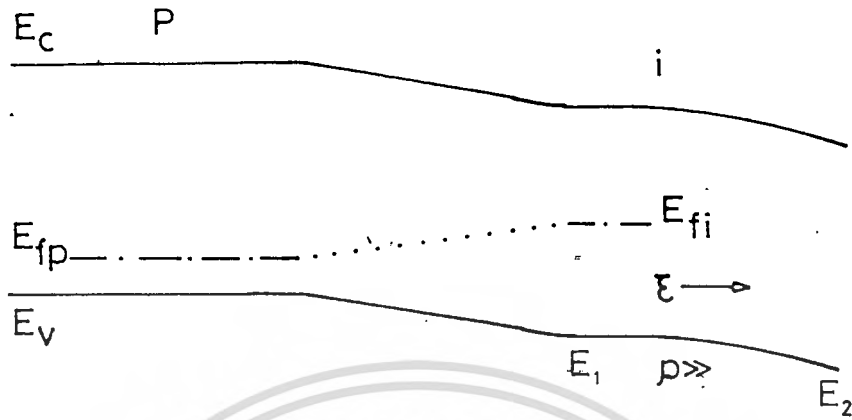
การทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ได้ทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน พบว่า ขณะที่แรงดันที่เกต ( $V_G$ ) มีค่าเป็นศูนย์กระแสเดรนจะน้อยจะไม่ไหล แต่เมื่อเพิ่มค่าแรงดันที่เกตจนถึง  $-3$  โวลต์ จึงจะเริ่มมีกระแสไหลได้และเมื่อเพิ่มค่าแรงดันที่เกตให้เป็นลบมากขึ้น ค่าของกระแสที่ไหลก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งลักษณะการทำงานของพีมอซเฟตนี้จะเหมือนกับพีมอสเฟต และมีโหมดการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ในการวัดหารอยต่อระหว่างส่วนเดรนกับฐานรองที่เป็นชนิดอินทรีนซิค (p-i junction) นั้น พบว่าเกิดมีรอยต่อระหว่างสารเจือชนิดพีกับฐานรองซิลิกอนชนิดอินทรีนซิค โดยใน ส่วนทางด้าน Reverse bias นั้นจะเห็นลักษณะของเส้นกราฟกระแสขานกับแกนนอน และเส้นกราฟจะเริ่มต้นคือมีกระแสไหลได้มากที่สุด Reverse Breakdown ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจน แต่ทางด้าน Forward bias นั้นจะมีลักษณะของเส้นกราฟ I-V char. เป็นความชันซึ่งอธิบายได้คือ ที่ส่วนของฐานรองชนิดอินทรีนซิคเป็นส่วนที่มีค่าความต้านทานสูง ทำให้กระแสไหลผ่านได้น้อย จึงเกิดเป็นกราฟที่มีความชันเกิดขึ้น ซึ่งอธิบายเป็นลักษณะของ Energy band diagram ดังรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.1 แสดง Energy band diagram ระหว่างรอยต่อ p-i ในกรณีที่ภาวะสมดุลย์

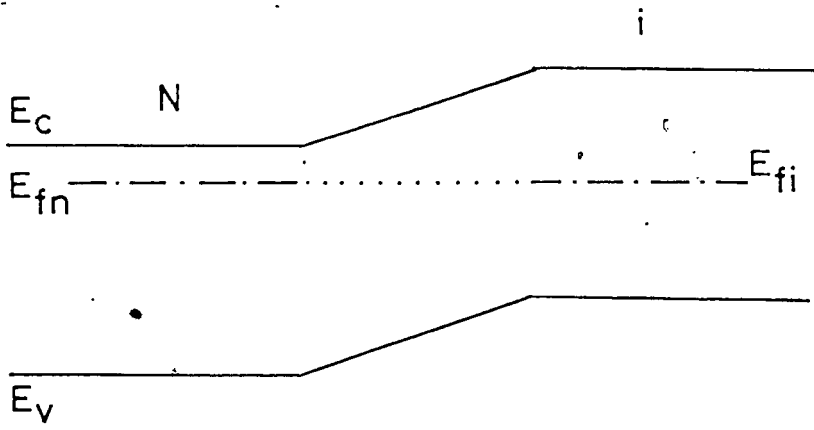
ในกรณีที่ได้รับ Forward bias ระดับพลังงานในส่วนของอินทรีนซิคจะถูกยกระดับขึ้นเท่ากับแรงดันที่ไบอัสทำให้เกิดมีกระแสไหลได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.2 เนื่องจากในส่วนของอินทรีนซิคมีความต้านทานสูงทำให้มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของอินทรีนซิค จึงทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น และสนามไฟฟ้านี้จะทำให้แถบพลังงานในส่วนนี้เกิดการโค้งลงตามทิศของสนามไฟฟ้า ทำให้ระดับพลังงานที่  $E_1$  น้อยกว่าที่  $E_2$  (เนื่องจากแกนตั้งเป็นแกนพลังงานของอิเล็กตรอน) ดังนั้นการที่ประจุไฮลจะเคลื่อนที่ไปได้จะต้องปรับระดับพลังงานให้สูงขึ้น และพลังงานของไฮลที่จะเพิ่มขึ้นจะได้อาจมาจากการได้รับแรงดันไบอัสจากภายนอก ทำให้กระแสไฮลที่ไหลในส่วนนี้มีค่าน้อยเนื่องจากไฮลต้องคอยปรับระดับพลังงานให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

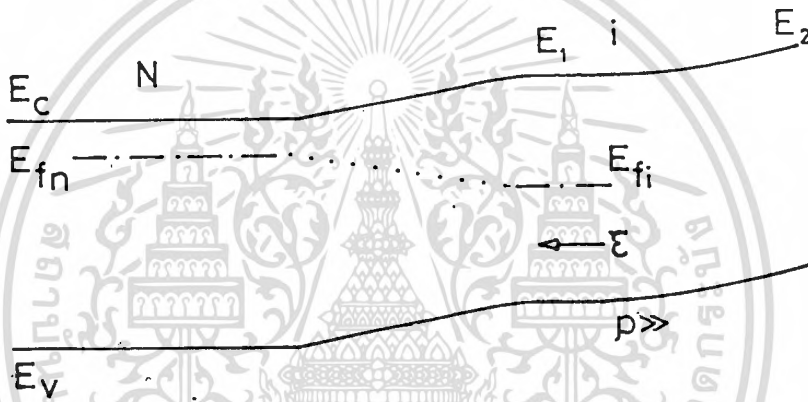


รูปที่ 6.2 แสดง Energy band diagram ระหว่างรอยต่อ p-i ในกรณีที่ได้รับ Forward bias

ในการศึกษาคุณสมบัติของเฮเทอโรสตรักเจอร์เฟอโรแมกเนติก ในกระบวนการสร้างต้องเพิ่มขึ้นตอนการแพร่สารเจือชนิด p เข้าไปที่บริเวณช่องทางเดินกระแส เพื่อปรับค่าพิกัดความต้านทานในส่วนช่องทางเดินกระแส เนื่องจากฐานรองเดิมเป็นฐานรองชนิด n เมื่อทำการแพร่อะตอมของค่าเข้าไปที่องค์จะไปจับตัวกับอิเล็กตรอน ซึ่งอาจจะมีอิเล็กตรอนหลงเหลืออยู่บ้าง ฐานรองตอนนั้นจึงมีสภาพเป็น  $n^-$  ดังนั้นจึงต้องเติมอะตอมสารเจือชนิด p ในบริเวณช่องทางเดินกระแสเพื่อให้เกิดการชดเชยกับอิเล็กตรอน ทำให้บริเวณช่องทางเดินกระแสมีสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p เมื่อนำเฮเทอโรสตรักเจอร์ที่สร้างขึ้น มาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ก็จะได้ลักษณะของกราฟเช่นเดียวกับกราฟ I-V char. ของเฮเทอโรสตรักเจอร์ทั่วไป และมีโหมดการทำงานแบบเฮเทอโรสตรักเจอร์โหมดใหม่ ในการวัดหารอยต่อระหว่างส่วนเดรนกับฐานรองชนิดอินทรีนซิก (n-i junction) นั้น พบว่าเกิดมีรอยต่อระหว่างสารเจือชนิด n กับฐานรองชนิดอินทรีนซิก โดยในส่วนของ Reverse bias จะเห็นกราฟมีลักษณะนอนในช่วงแรกและเริ่มมีกระแสไหลมากขึ้นในจุดที่เกิด Reverse breakdown ส่วนทางด้าน Forward bias จะเห็นเส้นกราฟมีลักษณะนอนโดยมีค่าความชันมาก ซึ่งเกิดจากส่วนของฐานรองชนิดอินทรีนซิกมีค่าความต้านทานสูง จึงทำให้กระแสไหลได้น้อย โดยจะอธิบายได้ด้วย Energy band diagram ของรอยต่อ n-i ดังรูป 6.3 และ 6.4



รูปที่ 6.3 แสดง Energy band diagram ของรอยต่อ n-i ในสภาวะสมดุลย์



รูปที่ 6.4 แสดง Energy band diagram ของรอยต่อ n-i ในกรณีที่ได้รับ Forward bias

ในกรณีที่ ได้รับ Forward bias ระดับพลังงานในส่วนของอินทรีนซิคจะถูกลดระดับลงเท่ากับแรงดันที่ไบอัสทำให้เกิดมีกระแสอิเล็กตรอนไหลได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.4 เนื่องจากในส่วนของอินทรีนซิคมีค่าความต้านทานสูงทำให้มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของอินทรีนซิค จึงทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นและสนามไฟฟ้านี้จะทำให้แถบพลังงานในส่วนนี้เกิดการโค้งขึ้นตามทิศของสนามไฟฟ้า ทำให้ระดับพลังงานที่  $E_1$  น้อยกว่าที่  $E_2$  ดังนั้นการที่ประจุอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปได้ จะต้องปรับระดับพลังงานให้สูงขึ้น และพลังงานของอิเล็กตรอนที่จะเพิ่มขึ้นจะ ได้มาจากการ ได้รับแรงดัน ไบอัสจากภายนอก ดังนั้นกระแสที่ไหลในส่วนนี้จึงมีค่าน้อยเนื่องจากอิเล็กตรอนต้องมีการปรับระดับพลังงานก่อนจึงจะเคลื่อนที่ได้

หลังจากที่มีการสร้างมอซซีเฟดตัวเดียว ๆ สำเร็จและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีแล้ว พบว่า

เราสามารถสร้างมอซซีเฟดทั้งเอ็นมอซซีหรือพีมอซซีบนฐานรองชนิดอินทรีนซิคได้ ดังนั้นจึงได้นำเอ็นมอซซีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟตและเอ็มมอยซ์เฟตมาทำการสร้างเป็นวงจรรวม โดยมีโครงสร้างเป็นแบบคอมพลีเมนทารี ซึ่งเรียกว่า CMOIS จะเห็นว่าโครงสร้างแบบ CMOIS นี้สามารถสร้างได้ง่ายกว่า CMOS เนื่องจากไม่ต้องมีบ่อแยก ระหว่างส่วนเอ็มมอยซ์กับฐานรอง วงจรรวมที่ใช้เป็นตัวอย่างในการพัฒนาโครงสร้างมอยซ์ไปเป็นโครงสร้างแบบ CMOIS คือวงจรรวมอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นในการทดสอบโครงสร้างแบบ CMOIS นี้จึงได้ออกแบบให้เอ็มมอยซ์เฟตเป็นมอยซ์ตัวโหลด และเอ็มมอยซ์เฟตเป็นมอยซ์ตัวขับ เมื่อนำมาทดลองวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อความถี่พบว่า CMOIS อินเวอร์เตอร์สามารถให้สัญญาณเอาต์พุทกลับเฟสกับสัญญาณอินพุท 180 องศาแสดงว่า CMOIS อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ นอกจากนี้ยังให้แรงดันเอาต์พุทมีค่าสูงใกล้เคียงกับ  $V_{DD}$  ที่สถานะ high และที่สถานะ low มีค่าเท่ากับกราวด์ ความเร็วในการสวิทช์ของ CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่มีค่า  $\sigma_n = 1$  มีค่าเท่ากับ 40 kHz การวัดการตอบสนองต่อการส่งผ่านสัญญาณ จะให้เอาต์พุทที่สถานะ high มีค่าใกล้เคียงกับ  $V_{DD}$  และมีสถานะ low มีค่าใกล้เคียงกับกราวด์ จุดเปลี่ยนสถานะของสัญญาณจะเลื่อนจากจุด  $V_{DD}/2$  หรือจุดที่แรงดันอินพุทมีค่าเป็น 50% ของ  $V_{DD}$  ไปทางขวา เล็กน้อย และลักษณะการเปลี่ยนสถานะของ CMOIS อินเวอร์เตอร์ต่อการส่งผ่านสัญญาณอยู่ในขั้นดี นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่า  $\sigma_n$  ให้มีค่าเพิ่มขึ้น ปรากฏว่าจุดเปลี่ยนสถานะของ CMOIS อินเวอร์เตอร์จะเลื่อนไปทางซ้ายโดยที่ค่า  $\sigma_n = 1$  จุดเปลี่ยนสัญญาณจะอยู่ทางขวาสุด ซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับ CMOS อินเวอร์เตอร์ทั่วไป

จากโครงสร้างของ CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่ไม่ต้องมีบ่อแยกนี้จะพบว่าระยะห่างระหว่างพีมอยซ์และเอ็มมอยซ์ (d) ที่ประกอบกันอยู่ในวงจรรวม สามารถที่จะเลื่อนเข้ามาชิดกันได้ โดยทำการทดลองออกแบบให้ CMOIS อินเวอร์เตอร์มีค่า  $\sigma_n = 1$  และมีค่า d ต่าง ๆ กันตั้งแต่ 80, 60, 40, 20 และ 0  $\mu\text{m}$  คือพีมอยซ์กับเอ็มมอยซ์อยู่ติดกันเลย ผลปรากฏว่า CMOIS อินเวอร์เตอร์ที่มีค่าของระยะ d ต่าง ๆ กันจนถึงชิดกันก็ยังสามารถทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ได้ โดยพิจารณาจากผลของกราฟการตอบสนองการส่งผ่านสัญญาณที่มีการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณใกล้เคียงกันทุกตัว และยังมีระดับของสัญญาณเอาต์พุทยังอยู่ในระดับใกล้เคียงกันด้วย แสดงให้เห็นว่าเราสามารถลดระยะห่างระหว่างพีมอยซ์และเอ็มมอยซ์ ในวงจรรวมมาให้ชิดกันได้โดยไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของวงจรรวม ซึ่งจุดนี้เป็นข้อดีของโครงสร้างแบบคอมพลีเมนทารีมอยซ์ (CMOIS) ซึ่งจะทำให้เราสามารถเพิ่มจำนวนมอยซ์เฟตได้มากขึ้นในพื้นที่ที่เท่าเดิม นั่นคือทำให้ความหนาแน่นของอุปกรณ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพัฒนาโมยซ์เฟตส์โครงสร้างของวงจรรวมแบบ CMOIS ที่มีระยะห่างระหว่างพีมอยซ์และเอ็นมอยซ์เป็นศูนย์นั้น ได้ใช้วงจรรินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นวงจรถูกพิจารณาเป็นวงจรวางอย่าง ดังนั้นจึงได้มีการทดลองประยุกต์วงจร CMOIS อินเวอร์เตอร์ ในรูปของวงจรรวม โดยที่มีระยะ  $d$  ของมอยซ์เฟตเป็นศูนย์ วงจรแรกที่ทดลองสร้างขึ้นคือวงจร NOR Gate และ OR Gate จากผลการทดลองพบว่าวงจร CMOIS NOR Gate และ OR Gate สามารถทำงานได้ และให้ลอจิกเอาต์พุตตรงกับตารางความจริง แต่ระดับของสัญญาณเอาต์พุตยังต้องมีการปรับปรุงอัตราส่วนของขนาดโครงสร้างให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ระดับของสัญญาณเอาต์พุตที่ต่อเนื่อง นอกจากนั้นยังได้ทำการทดลองสร้างวงจร CMOIS Ring Oscillator ที่มีจำนวน stages เท่ากับ 5 stages และ 9 stages จากผลการทดลองปรากฏว่าวงจร CMOIS Ring Oscillator ทั้ง 5 และ 9 stages สามารถทำงานเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตความถี่ได้ โดยจำนวนความถี่ที่เอาต์พุตจะขึ้นกับขนาดของแรงดัน  $V_{DD}$  ที่ป้อนให้กับวงจร

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าและการทำงานของมอยซ์เฟต

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าและการทำงานของพีมอยซ์เฟตนั้น จะพิจารณาคงสมบัติการทำงานจากสมการกระแส  $I_{DS}$  โดยอ้างอิงจากสมการกระแส  $I_{DS}$  ของพีมอสเฟต ซึ่งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความคล่องตัวของโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก โดยให้มีค่าเป็น  $\mu_{pAu}$  ดังนั้นสมการกระแส  $I_{DS}$  ของพีมอยซ์เฟตในช่วงกระแสอิ่มตัวจะเขียนเป็น

$$I_{DS} = \mu_{pAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T)^2 / 2] \quad (6.1)$$

โดยที่  $\mu_{pAu}$  เป็นค่าความคล่องตัวของโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก และกำหนดให้

$$\mu_{pAu} = \alpha_{pAu} \mu_p$$

โดย  $\alpha_{pAu}$  : Proportional constant ในกรณีโฮล

และในกรณีของสมการกระแส  $I_{DS}$  ในช่วงเชิงเส้นจะเขียนได้เป็น

$$I_{DS} = \mu_{pAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS}] \quad (6.2)$$

ในการพิจารณาคงสมบัติทางไฟฟ้า เราจะพิจารณาจากสมการกระแส  $I_{DS}$  ที่ 6.1 และ 6.2 เป็นหลัก และจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของพีมอยซ์เฟต ที่มีขนาดของความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) เท่ากับ  $200 \mu m$  และมีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) เท่ากับ  $20 \mu m$  สามารถนำมาคำนวณหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้ เช่น ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( $g_m$ ) ค่าชอส์-เดรนคอนดักแตนซ์ ( $g_{m,d}$ ) และค่าความคล่องตัวของโฮล ( $\mu_{pAu}$ ) นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของพีเอ็มออสเฟต โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(I_{DS})^{1/2}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  จากกราฟอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มของพีเอ็มออสเฟตได้เท่ากับ -2.1 โวลต์ ในการวัดการตอบสนองความถี่ของพีเอ็มออสเฟต ได้ค่าการตอบสนองต่อสัญญาณความถี่เท่ากับ 28 kHz

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าและการทำงานของเอ็นเมออสเฟตนั้น จะพิจารณาคงสมบัติการทำงานจากสมการกระแส  $I_{DS}$  โดยอ้างอิงจากสมการกระแส  $I_{DS}$  ของเอ็นเมอสเฟต โดยพิจารณาเปลี่ยนแปลงค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิค โดยให้มีค่าเป็น  $\mu_{nAu}$  ดังนั้นสมการกระแส  $I_{DS}$  ของเอ็นเมออสเฟตในช่วงกระแสอิ่มตัวจะเขียนเป็น

$$I_{DS} = \mu_{nAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T)^2 / 2] \quad (6.3)$$

โดยที่  $\mu_{nAu}$  เป็นค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิค กำหนดให้

$$\mu_{nAu} = \alpha_{nAu} \mu_n \quad \text{โดย } \alpha_{nAu} : \text{Proportional constant ในกรณีอิเล็กตรอน}$$

และในกรณีของสมการกระแส  $I_{DS}$  ในช่วงเชิงเส้นจะเขียนได้เป็น

$$I_{DS} = \mu_{nAu} (\epsilon_0 \epsilon_{ox} / T_{ox}) (w/L) [(V_G - V_T) V_{DS}] \quad (6.4)$$


ในการพิจารณาคงสมบัติทางไฟฟ้า เราจะพิจารณาจากสมการกระแส  $I_{DS}$  ที่ 6.3 และ 6.4 เป็นหลัก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเอ็นเมออสเฟต ที่มีขนาดของความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $w$ ) เท่ากับ 200  $\mu m$  และมีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) เท่ากับ 20  $\mu m$  สามารถนำมาคำนวณหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้ เช่น ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) ค่าชอส์-เดรนคอนดักแตนซ์ ( $g_{m,d}$ ) และค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน ( $\mu_{nAu}$ ) นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม โดยพิจารณา กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(I_{DS})^{1/2}$  กับแรงดัน  $V_{GS}$  จากกราฟอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นเมออสเฟตได้เท่ากับ 0.2 โวลต์ ในการวัดการตอบสนองความถี่ของเอ็นเมออสเฟตได้ค่าการตอบสนองต่อ สัญญาณความถี่ของเอ็นเมออสเฟตเท่ากับ 26 kHz

จากการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างใหม่แบบ MOIS นี้ยังต้องมีการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนรายละเอียดต่าง ๆ เพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่สำคัญของมออสเฟตสำหรับใช้ในการกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อการพัฒนาไปสู่วงจรรวมที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

## กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช และ อาจารย์ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำผู้เขียนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณนายจิรวุฒน์ ปานกลาง นักศึกษาปริญญาโทของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีส่วนช่วยในกระบวนการสร้าง การเก็บข้อมูล ขอขอบคุณ คุณบุษกร ก้อนนิล คุณประภา พ่วงเขียว เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และ คุณประภาวดี ส่งศิริ ที่ได้ช่วยจัดพิมพ์และตรวจทานต้นฉบับ และ ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือทุก ๆ ท่าน  
ไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้การสนับสนุนการเรียนมาโดยตลอด



(นายสัจจา ส่งศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. วิสุมย์ จิตรุ่งเรือง และ สมเกียรติ ศุภเดช, อุปกรณ์ส่งผ่านสภาพความนำแบบพลาสมาาร์  $p^+ - i - n^+$ , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 8, เล่มที่ 1, หน้า 1.141 - 1.164, ธันวาคม 2528.
2. สมเกียรติ ศุภเดช, สมชัย วงษ์เมตตา, วิสุมย์ จิตรุ่งเรือง และ จินดารัตน์ สุนันต์เวช, การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ กับ ขนาดทางเรขาคณิตของซิลิกอนไดโอด แบบ IG  $p^+ - i - n^+$ , วิศวกรรมลาดกระบัง, มิถุนายน 2529.
3. วิสุมย์ จิตรุ่งเรือง, สัจจา ส่งศิริ และ สมเกียรติ ศุภเดช, ทราานซิสเตอร์ชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างแบบ MOIS, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 10, เล่มที่ 1, หน้า 1-205 - 1-215, พฤศจิกายน 2530.
4. สัจจา ส่งศิริ, วิสุมย์ จิตรุ่งเรือง และ สมเกียรติ ศุภเดช, โครงสร้าง " คอมพลีเมนต์ารี มอยซ์ ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 11, เล่มที่ 2, หน้า 5-5-1 - 5-5-11, ธันวาคม 2531.
5. สัจจา ส่งศิริ, วิสุมย์ จิตรุ่งเรือง, จิรวัดน์ ปานกลาง และ สมเกียรติ ศุภเดช, " การศึกษาผลของโครงสร้างทางเรขาคณิตของวงจรรวม CMOS อินเวอร์เตอร์ ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 12, หน้า 583-592, พฤศจิกายน 2532.
6. วิสุมย์ จิตรุ่งเรือง, สัจจา ส่งศิริ และ สมเกียรติ ศุภเดช, ผลกระทบระหว่างมอสเฟตสองตัวที่อยู่ใกล้กันในช่วงรวมชนิดโมโนลิธิค, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 9, เล่มพิเศษ 1, หน้า 1-35-1 - 1-35-20, ธันวาคม 2529.
7. Oliver J. McCarthy, MOS Devices and Circuit Design, John Wiley & Sons, Inc., 1982.
8. William C. Till, James T. Luxon, Integrated Circuit: Materials, Devices and Fabrication, Prentice-Hall, Inc., 1982.
9. E.H. Nicollian, I.R. Brews, MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 1982.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. A.G. Milnes, Deep Impurities in Semiconductor, John Wiley & Sons, Inc., 1973.
11. Richard S. Muller, Device Electronics for Integrated circuits, John Wiley & Sons, Inc., 1977.
12. William M. Penney and Lillian Lau, MOS Integrated Circuits, VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY, 1967.
13. Murray A. Lampert and Peter Mark, Current Injection in Solids, Academic Press, New York, 1970.
14. Neil H.E. Weste and Kamran Eshraghian, Principles of CMOS - VLSI Design, Addison - Wesley Publishing Company, 1985.
15. A.S. Grove, Physics and Technology of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, Inc., 1967.
16. S.M.Sze, Semiconductor Devices Physics and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 1985.
17. Robert E. Sawyer and John R. Miller, MOS / LSI Design and Application, Mc Graw-Hill Book Company, 1972.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## Conversion table

1 angstrom ( $^{\circ}\text{A}$ )	=	$10^{-10}$	m
		= 0.1	nm
1 inch	=	1000	mil
		= 2.54	cm.
1 joule	=	$10^7$	erge
		= $6.424 \times 10^{12}$	MeV
1 eV	=	$1.6 \times 10^{-19}$	joule
		= 23.1	k.cal
1 watt	=	1	joule/sec
		= $2.389 \times 10^{-4}$	k.cal/sec
1 degree	=	0.01754	radian
$\pi$ radians	=	180	degree
$e = 1 + 1/2! + 1/3! + \dots + 1/n!$	=	2.71828	
$\ln x$	=	$2.3026 \log x$	
$\log e$	=	$0.43429 \ln e$	
$\ln 2$	=	0.693	
ความกดตัน 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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## Physical constants

Quantity	Symbol	Magnitude	
มวลอิสระของอิเล็กตรอน	$m_e$	$9.11 \times 10^{-31}$	kg.
มวลอิสระของโปรตอน	$m_p$	$1.673 \times 10^{-27}$	kg.
มวลอิสระของนิวตรอน	$m_n$	$1.675 \times 10^{-27}$	kg.
ประจุของอิเล็กตรอน	$q(e)$	$1.6 \times 10^{-19}$	Coulomb
อัตราส่วนระหว่างประจุและมวลอิสระ ของอิเล็กตรอน	$e/m_e$	$1.76 \times 10^{11}$	coul/kg.
ค่าคงที่ของพลังค์	$h$	$6.624 \times 10^{-34}$	Joule-sec
ค่าคงที่ของ โบสตันน์	$k$	$1.38 \times 10^{-23}$	Joule/°K
ค่าคงที่สเตฟาน-โบสตันน์	$\sigma$	$8.620 \times 10^{-5}$	eV/°K
จำนวนอะโวกาโดร	$N_{Avo}$	$5.670 \times 10^{-8}$	$W/m^2 \cdot ^\circ K^4$
ค่าคงที่ของก๊าซ	$R_o$	$8.02 \times 10^{28}$	$(K \text{ mole})^{-1}$
ความเร็วแสง	$c$	$8.317 \times 10^3$	Joule/K.
ค่าคงที่ของแรงคูลอมบ์	-		mole . K
อัตราส่วนของมวลระหว่างโปรตอน และอิเล็กตรอน	$m_p / m_e$	$2.998 \times 10^8$	m/s
Permittivity ของสุญญากาศ	$\epsilon_o$	$1/4\pi\epsilon_o = 9 \times 10^9$	$nt.m^2/Coul^2$
		$(10^9/4\pi c^2)$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dielectric constant ของ Si	$\epsilon_s$	12
Dielectric constant ของ SiO <sub>2</sub>	$\epsilon_{ox}$	4
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อซิลิกอน	$\mu_n$	1350 cm <sup>2</sup> /V-sec
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว ระนาบ <100>	$\mu_{ns} <100>$	400 cm <sup>2</sup> /V-sec
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว ระนาบ <111>	$\mu_{ns} <111>$	600 cm <sup>2</sup> /V-sec
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อซิลิกอน	$\mu_p$	480 cm <sup>2</sup> /V-sec
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวระนาบ <100>	$\mu_{ps} <100>$	130 cm <sup>2</sup> /V-sec
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวระนาบ <111>	$\mu_{ps} <111>$	190 cm <sup>2</sup> /V-sec
permeability ของสุญญากาศ	$\mu_0$	1.257 x 10 <sup>-8</sup> H/cm (4 $\pi$ x 10 <sup>-9</sup> )
ศักดาความร้อน (T = 300° K)	kT/q	0.0259 Volt
ความกว้างของระดับพลังงานในแถบ ต้องห้าม (T = 300° K)	E <sub>g</sub>	1.1 eV
จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น จากแถบวาเลนซ์เข้าไปในแถบความนำ ของซิลิกอน (T = 300° K)	n <sub>i</sub>	1.4 x 10 <sup>10</sup> cm <sup>-3</sup>

## List of Symbols

Symbol	Name	Unit
$C_o$	ความจุไฟฟ้าที่เกทออกไซด์	F/cm <sup>2</sup>
$C_G$	ความจุไฟฟ้ารวมที่เกท	F/cm <sup>2</sup>
$C_L$	ความจุไฟฟ้าที่โหลด	F/cm <sup>2</sup>
$C_{\text{si}}$	ความจุไฟฟ้าในเนื้อซิลิกอน	F/cm <sup>2</sup>
$C_{\text{fis}}$	ความจุไฟฟ้าที่ผิว	F/cm <sup>2</sup>
$E_c$	ระดับพลังงานที่ส่วนล่างสุดของแถบความนำ	eV
$E_f$	ระดับพลังงานเฟอร์มิ	eV
$E_{\text{sh}}$	ความกว้างของระดับพลังงานในระดับต้องห้าม	eV
$E_i$	ระดับพลังงานอินทรวินชิต	eV
$E_v$	ระดับพลังงานส่วนบนสุดของแถบวาเลนซ์	eV
$f_o$	ความถี่ที่ตอบสนองสูงสุดของมอซซีเฟต	Hz
$f_{\text{sh}}$	ขีดจำกัดความถี่ของวงจรรวม	Hz
$g_m$	ทรานคอนดัคแตนซ์	mho
$g_{mD}$	ทรานคอนดัคแตนซ์ของมอซซีตัวขับ	mho
$g_{mL}$	ทรานคอนดัคแตนซ์ของมอซซีตัวโหลด	mho
$g_{m \text{ sat}}$	ทรานคอนดัคแตนซ์อิ่มตัว	mho
$g_{\text{sd}}$	ซอส-เดรน คอนดัคแตนซ์	mho
$g_{\text{sd sat}}$	ซอส-เดรน คอนดัคแตนซ์อิ่มตัว	mho
$I_D$	กระแสเดรน	A
$I_{\text{DSS}}$	กระแสเดรนอิ่มตัว	A
$K$	ค่าคงที่ของโบสต์มันน์	joule/°K

L	ความยาวแชนแนล	$\mu\text{m}$
n	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ	$\text{cm}^{-3}$
$n_1$	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในอินทรีนซิค	$\text{cm}^{-3}$
$N_A$	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ	$\text{cm}^{-3}$
$N_D$	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้	$\text{cm}^{-3}$
p	ความหนาแน่นของโฮลอิสระ	$\text{cm}^{-3}$
q	ประจุของอิเล็กตรอน	coulomb
$Q_B$	ความหนาแน่นประจุบริเวณปลดพาหะที่ผิวขณะได้รับแรงดันถึงจุดที่ทำให้เกิดชั้นกลับพอลิ	$\text{coulomb/cm}^2$
$Q_{ox}$	ความหนาแน่นของประจุในซิลิกอนไดออกไซด์	$\text{coulomb/cm}^2$
$Q_{ss}$	ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัสระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอน	$\text{coulomb/cm}^2$
$R_L$	ความต้านทานโหลด	ohm
$R_{nd}$	ความต้านทานแชนแนล	ohm
$R_{nd\ sat}$	ความต้านทานแชนแนลอิ่มตัว	ohm
t	เวลา	sec.
T	อุณหภูมิ	$^{\circ}\text{K}$
$T_{ox}$	ความหนาของชั้นเกตออกไซด์	$^{\circ}\text{A}$
$t_{pd}$	propagation delay time	sec
$t_r$	rise time	sec
$t_f$	fall time	sec
$t_{ps}$	propagation storage time	sec
$V_B$	แรงดันบังทลาย	V
$V_{B1}$	ศักดาที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อ พี-เอ็น	V
$V_{BG}$	แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ฐานรอง	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_D$	แรงดันไบอัสเดรนซอส	V
$V_G$	แรงดันไบอัสที่เกท	V
$V_P$	แรงดันพินท์ออฟ	V
$V_T$	แรงดันขีดเริ่ม	V
$w$	ความกว้างแชนแนล	$\mu\text{m}$
$X_j$	ความลึกของรอยต่อพีเอ็น	$\mu\text{m}$
$\beta$	อัตราส่วนเบต้า	
$\beta$	อัตราส่วนแกรมม่า	
$\epsilon_0$	ค่าเปอร์มิติวิตีของสุญญากาศ	F/cm
$\epsilon_{ox}$	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของซิลิกอนไดออกไซด์	
$\epsilon_s$	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของซิลิกอน	
$\mu_0$	ค่าเปอร์มิวบิลิตีของสุญญากาศ	H/cm
$\mu_n$	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในซิลิกอน	$\text{cm}^2/\text{v-sec.}$
$\mu_p$	ความคล่องตัวของโฮลในซิลิกอน	$\text{cm}^2/\text{v-sec.}$
$\rho$	พิกัดความต้านทาน	ohm-cm
$\sigma$	ความนำไฟฟ้า	$(\text{ohm-cm})^{-1}$
$\phi_f$	ความต่างศักศาระหว่างระดับพลังงานอินทรินซิกกับระดับพลังงานเฟอร์มิ	V
$\phi_s$	ความต่างศักศไฟฟ้าที่ผิวของซิลิกอน	V
$\phi_{so}$	ความต่างศักศไฟฟ้าระหว่างขอบของแถบความนำซิลิกอนไดออกไซด์กับขอบของแถบความนำซิลิกอน	V
$\phi_M$	ความต่างศักศไฟฟ้าระหว่างขอบของแถบความนำซิลิกอนไดออกไซด์กับระดับพลังงานเฟอร์มิของเกตโลหะ	V
$\phi_{MS}$	ฟังก์ชันของงานระหว่างเกตโลหะกับซิลิกอน	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๕	ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขบของแถบความนำ	V
	ซิลิกอน ไดออกไซด์กับระดับพลังงานเฟอร์มิซิลิกอน	
๖	โอห์ม	ohm
๗	โมห์	mho



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

การคำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำในฐานรองซิลิกอน

การคำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำในฐานรองซิลิกอน เราใช้แผ่นซิลิกอนชนิด  
 เอ็นขนาด  $0.2 * 0.2 \text{ cm}^2$  ที่มีความหนา  $440 \text{ }\mu\text{m}$  และมีค่ากีดความต้านทาน  $7.63 \text{ }\Omega\text{-cm}$ . ทำการ  
 แพร่อะตอมของทองคำเข้าทางด้านหลังแผ่น แล้วทำการเคลือบอลูมิเนียมทางด้านหน้าแผ่น จากนั้นนำมา  
 วัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำ ดังนี้

โดยการวัด I-V char. ของชิ้นงานเพื่อคำนวณหาความต้านทานของชิ้นงานหลังจากแพร่  
 อะตอมของทองคำเข้าไปแล้ว พบว่าที่ค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นงาน  $7 \text{ V}$  วัดค่ากระแสที่ไหลผ่านชิ้นงานได้  
 $0.1 \text{ mA}$  นั่นคือชิ้นงานมีค่าความต้านทานเป็น  $70 \text{ k}\Omega$  แต่ชิ้นงานเดิมเป็นชนิดเอ็นมี  $\rho_n = 7.63 \text{ }\Omega\text{-cm}$ .

ดังนั้น

$$\begin{aligned} n_{o0} &= 1/\rho_n q \mu_n \\ &= 1/(7.63 * 1.6 * 10^{-19} * 1350) \\ &= 6.0676 * 10^{14} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

หลังจากแพร่อะตอมของทองคำเข้าไปแล้ว ค่าความต้านทานของแผ่นที่วัดได้เปลี่ยนไปเป็น  $70 \text{ k}\Omega$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \rho_o &= R \cdot A/L \\ &= 70 * 10^3 * 0.04 / (440 * 10^{-4}) \\ &= 63.636 * 10^3 \text{ }\Omega\text{-cm}. \end{aligned}$$

จากสมการ  $n_o = 1/(2q\mu_n) \cdot [1/\rho_o + ((1/\rho_o)^2 - 4q^2 \mu_n \mu_p n_1^2)^{-2}]$

และ  $n_1^2 = N_c N_v e^{-E_g/KT}$

ดังนั้น  $n_1^2 = 3.23 * 10^{19} * 1.82 * 10^{19} \exp[-1.121 / (8.625 * 10^{-5} * 300)] \approx 9 * 10^{19} \text{ cm}^{-6}$

แทนค่า  $n_1^2$  และ  $\rho_o$  จะได้

$$n_o = 7.22685 * 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

จาก  $E_f = E_c - KT \ln(N_c/n_o)$

$$= 1.121 - 0.026 \ln(3.23 * 10^{19} / 7.22685 * 10^{10})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้  $E_F = 0.60314 \text{ eV}$

จาก  $E_1 = E_F - 0.54$   
 $= 1.121 - 0.54 = 0.581 \text{ eV}$

จาก  $N_{Au} = (n_{o0} - n_o + n_1^2/n_o) [1 + \exp((E_1 - E_F)/KT)]$   
 $= [6.0676 \times 10^{14} - 7.22685 \times 10^{10} + n_1^2/n_o] (1.42675)$   
 $= [6.0668 \times 10^{14} + 1.2453 \times 10^9] (1.42675)$

$$N_{Au} = 8.65582 \times 10^{14} \text{ atom.cm.}^{-3}$$

จากการคำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำในฐานรองซิลิกอน ดังแสดงข้างต้นนี้ ทำให้เราทราบว่าปริมาณอะตอมของทองคำอยู่ในฐานรองซิลิกอน ซึ่งจากผลการวัดหาค่าความต้านทานแล้วนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำจะได้ประมาณ  $8.65582 \times 10^{14} \text{ atom/cm.}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้