สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้าที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

MAGNETIC FIELD-EFFECT TRANSISTOR (MAGFET)

T 050386

โดย

นายปรีชา ธีระวงศ์

นายฤทัย ภูสีเขียว

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 50386
วัน,เดือน,ปี 13 พ.ค. 2547

b.....
i.....

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้าที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก
MAGNETIC FIELD-EFFECT TRANSISTOR (MAGFET)

โดย

นายปรีชา ธีระวงศ์ 43015266

นายฤทัย ภูสีเขียว 43015273

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้าที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ผู้จัดทำ

1. นายปรีชา ธีระวงศ์ 43015266
2. นายฤทัย ภูสีเขียว 43015273

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้าที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

MAGNETIC FIELD-EFFECT TRANSISTOR (MAGFET)

นายปรีชา ธีระวงศ์ 43015266

นายฤทัย ภูสีเขียว 43015273

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมที่จะทำการสอบได้

.....

(ผศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้าที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก
MAGNETIC FIELD-EFFECT TRANSISTOR (MAGFET)

นายปรีชา ธีระวงศ์
นายฤทัย ภูสีเขียว
ผศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานด้านการตรวจจับหรืออุปกรณ์ที่เรียกว่า “Sensor Device” มีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด ซึ่งในแต่ละชนิดก็มีความเหมาะสมกับงานในประเภทที่แตกต่างกันออกไป อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Field Sensor Devices) ก็เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการของ Hall effect และโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ก็จะเป็นโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์เพียงแต่ใช้หลักการแยกส่วนเดรน (Drain) ออกเป็นสองส่วน หรือที่เรียกว่า “Split-Drain” แล้วใช้หลักการที่ว่าเกิดความไม่สมมาตรของกระแสเดรนทั้งสองเนื่องจากมีสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับแชลแนล (channel) ของตัวอุปกรณ์ แล้ววัดผลที่ได้ออกมาในรูปแบบของผลต่างของกระแสเดรน

รายงานฉบับนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ หลักการของฮอลล์ (Hall effect) การออกแบบและขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความกว้าง ความยาวของแชลแนล และระยะห่างระหว่างส่วนเดรนทั้งสอง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาให้อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความไวในการตรวจจับที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และจากการการศึกษาจะทำให้สามารถนำความรู้ที่ได้รู้ไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ได้ต่อไปอีกมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC FIELD-EFFECT TRANSISTOR (MAGFET)

Mr. Preecha Teerawong

Mr. Ruetai Phoseekhiaw

Assist. Prof. Dr. Toermpong Phetchakul

Academic Year 2002

Abstract

Today, there are many type of sensor devices that each type are used to appropriate way. Magnetic field sensor devices is one of sensor devices that use the knowledge of Hall effect. The structure of sensor devices is MOS transistor but use the knowledge of split-drain and asymmetry of both drain due to magnetic field perpendicular the channel of devices.

In this report described about basic theory of MOS transistor, Hall effect, design and the process of magnetic field sensor devices fabrication. Now, many of parameters are adapted such as width and length of channel and the displacement between both drain. These knowledge will be the way to develop more magnetic field sensor devices efficiency and can apply to other devices too.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในความเป็นจริงแล้วปริมาณที่ได้จากสิ่งแวดล้อมโดยตรงเป็นการยากที่จะนำมาวิเคราะห์ให้เห็นเป็นรูปร่างและยากต่อการทำความเข้าใจถึงปริมาณนั้นๆ ซึ่งอาจจะเป็นปริมาณในรูปแบบที่เป็น magnetic field ,light , pressure ,temperature และรูปแบบอื่นๆอีกได้ ฉะนั้นจึงได้มีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล่านั้นเป็นปริมาณทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ว่านี้ก็คือ Sensor Devices ที่จะต้องทำให้มีความถูกต้องสูงที่สุด และมีความผิดพลาดน้อยที่สุด เพราะเหตุนี้ Sensor Devices จึงมีบทบาทที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Magnetic field sensors) เป็นตัวแปลงสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor magnetic field sensors) ใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกแนติก (Galvanomagnetic effect) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ที่กระทำต่อประจุพาหะ ลักษณะเด่นของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สร้างจากซิลิกอน (Silicon magnetic field sensors) คือ สามารถสร้างได้ง่ายโดยใช้เทคโนโลยีเดียวกันกับการสร้างวงจรรวม (Integrated circuit technologies) ได้โดยไม่มีการเพิ่มขั้นตอนในการสร้างเลย

Split-drain magnetic field-effect transistor (MAGFET) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งของ Magnetic field sensors ซึ่งสามารถที่จะตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ และเมื่อมีสนามแม่เหล็กการเปลี่ยนก็ยังจะทำให้พารามิเตอร์อื่นๆที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งอาจจะเป็น voltage , current , frequency หรืออื่นๆเปลี่ยนแปลงได้ หลักการทาง physics ของMAGFET ซึ่งมีโครงสร้างที่เรียกว่า “split-drain structure” ซึ่งจะทำการแยกส่วนเดรน (drain) ออกเป็นสองส่วน MAGFET สามารถที่จะตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะต้องตั้งฉากกับ channel ของ อุปกรณ์ซึ่งจะเป็นหลักการของ Hall effect และโดยปกติแล้วการประยุกต์ใช้งานมักจะใช้ Hall sensors มากกว่า MAGFET ก็เนื่องจากว่า MAGFET จะมีค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมากกว่า และมีสัญญาณรบกวน (noise) มากกว่าด้วย ถึงแม้ว่าลักษณะทาง physics ของทั้งสองอย่างจะมีความคล้ายคลึงกันแต่สัญญาณทางเอาท์พุทจะแตกต่างกันมากซึ่ง Hall sensors จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสนามแม่เล็กไฟฟ้าให้เป็น Hall voltage ที่เป็นผลเนื่องมาจากปรากฏการณ์ของฮอลล์เอง ส่วนลักษณะการทำงานของ MAGFET หลักการทำงานก็จะอยู่บนพื้นฐานของ Hall effect และจากความไม่สมมาตรของกระแสเดรนเองที่เกิดเนื่องมาจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าหากว่าเรานำ MAGFET ไปใช้งานในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กอยู่ผลที่ได้ก็ไม่ต่างเลยกับ MOSFETทั่วๆไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1-2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง	3-34
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานการทำงานของทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้าชนิด Induce-channel MOSFET	3
2.2 ปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติกพื้นฐาน (Basic Galvanomagnetic Effect)	12
2.3 แฟคเตอร์ G (Geometry Factor)	20
2.4 คุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์	25
2.5 Split-drain magnetic field-effect transistor (MAGFET)	28
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	35-40
3.1 หลักการออกแบบ	35
3.2 กระบวนการสร้าง MAGFET Sensors	36
บทที่ 4 กระบวนการสร้าง MAGFET	41-67
4.1 การเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน	41
4.2 กระบวนการออกซิเดชั่น (Oxidation Process)	46
4.3 กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี (Photo Lithography)	52
4.4 ขบวนการแพร่สารเจือ	63
4.5 ขบวนการเมตัลไลเซชั่น	64
4.6 การตัดแยกอุปกรณ์	67
บทที่ 5 การวัดและทดสอบคุณสมบัติอุปกรณ์	68-94
5.1 การวัดคุณสมบัติพื้นฐานการทำงานของ MAGFET	68
5.2 การวัดคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET	79
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
6.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองขณะที่ MAGFET ยังไม่ได้รับสนามแม่เหล็ก	95
6.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองขณะที่ MAGFET ได้รับสนามแม่เหล็ก	96
6.3 เปรียบเทียบผลของ *W/L* ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง	99
ภาคผนวก	ก-ถ
ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์ ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ และคุณสมบัติของซิลิกอนคุณสมบัติของซิลิกอน	ก-ง
ภาคผนวก ข. ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง	จ-ด
ภาคผนวก ค. กราฟคุณสมบัติของ MAGFET ที่จุดต่าง ๆ	ต-ถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

เรื่อง		หน้า
รูป 2.1	MOSFET (n – channel) ภายใต้เงื่อนไขการไบอัสในช่วงต่าง ๆ	3
รูป 2.2	เส้นกราฟ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{ds}	6
รูป 2.3	การเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามแนวช่องทางเดินกระแส	7
รูป 2.4	แสดงคุณสมบัติของ Induced - channel MOSFET	10
รูป 2.5	ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำ	16
รูป 2.6	การเบี่ยงเบนของพาหะจากแรงลอเรนซ์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำ	18
รูป 2.7	(ก) การทำงานในโหมดแรงดันฮอลล์ (Hall voltage mode) (ข) การทำงานในโหมดกระแสลอเรนซ์ (Lorentz current mode)	19
รูป 2.8	ฮอลล์เพลทรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	21
รูป 2.9	แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	23
	ความเป็นเชิงเส้นของ Ideal sensor	26
รูป 2.11	ฮีสเตอร์รีซีส	27
รูป 2.12	แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของเส้นกระแส และเส้นแรงดันสมมูล ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแชนแนล	29
รูป 2.13	แสดงการกระจายตัวของเส้นศักย์ดาสมมูลและความหนาแน่นของเส้น กระแส ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับระนาบของภาพ	30
รูป2.14	แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมการเบี่ยงเบนของเส้นกระแส(มุมลอเรนซ์) เมื่อ มีเปลี่ยนแปลงความยาวของแชนแนล (L)	31
รูป 2.15	เปรียบเทียบความแตกต่างของระยะห่างระหว่างเดรน(d) เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น	32
รูป 2.16	แสดงโครงสร้างของ แมกเฟท	33
รูป 2.17	แบบจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กในทิศต่าง	34
รูป 3.1	แสดง Top view ของมาส์กรวม	37
รูป 3.2	mask#1 (Body mask)	38
รูป 3.3	mask#2 (Source , Drain Mask)	38
รูป 3.4	mask#3 (Gate Mask)	39
รูป 3.5	mask#4 (Contact Mask)	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
รูป 3.6 mask#5 (Metal Mask)	40
รูป 4.1 แสดงแผนผังของลำดับขั้นตอนการเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์	42
รูป 4.2 แสดงลักษณะของผลึกสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการตัดแท่งผลึก	43
รูป 4.3 VR-70 Resistivity Test System	44
รูป 4.4 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทาน(Resistivity)โดยวิธี Four Point Probe	44
รูป 4.5 แสดงแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ผ่านขบวนการออกซิเดชั่นแล้ว	46
รูป 4.6 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการแพร่สารเจือและการสร้างชั้นออกไซด์	47
รูป 4.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำ Dry Oxidation	47
รูป 4.8 แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิคอนในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนแห้งในกระบวนการออกซิเดชั่นแบบแห้ง	48
รูป 4.9 แสดงอุปกรณ์ระบบไอน้ำของขบวนการออกซิเดชั่นแบบชื้น	49
รูป 4.10 แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิกอนใน บรรยากาศของ ก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำในกระบวนการออกซิเดชั่นแบบชื้น	50
รูป 4.11 Automatic Thin Film Measurement system model.TFM-120	51
รูป 4.12 แสดงแผนผังขั้นตอนของกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีทั่ว ๆ ไป	52
รูป 4.13 .แสดงโต๊ะที่ใช้สำหรับตัดแบบ	55
รูป 4.14 mask#1 (Body mask)	55
รูป 4.15 mask#2 (Source, Drain mask)	56
รูป 4.16 mask#3 (Gate mask)	56
รูป4.17 mask#4 (Contact mask)	57
รูป 4.18 mask#5 (Metal mask)	57
รูป 4.19 แสดงลักษณะการติดแผ่นไมล่าร์ลามิเนตบนตัวยึดสำหรับถ่ายแบบย่อส่วน	58
รูป 4.20 แสดงแผนผังของอุปกรณ์เครื่อง “ตัวปรับซ้อนมาส์ก”	61
รูป 4.21 Mask Alignment	62
รูป 4.22 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในขบวนการเมตัลไลเซชั่น	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
รูป 4.23 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบสูญญากาศวิธี Filament evaporation	66
รูป 4.24 แสดงเครื่องมือที่ใช้ตัดแยกตัวอุปกรณ์	67
รูป 5.1 แสดงระบบ GPIB ที่ใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์	68
รูป 5.2 วงจรวัดลักษณะเฉพาะ I_D-V_{GS} ของแมกเฟทชนิดพี	69
รูป 5.3 กราฟแสดงค่าแรงดันขีดเริ่มของ MAGFET ตัวที่ 2	69
รูป 5.4 กราฟแสดงค่าแรงดันขีดเริ่มของ MAGFET ตัวที่ 3	70
รูป 5.5 วงจรการให้ bias เพียง เดรนใดเดรนหนึ่ง	70
รูป 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 1 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm	71
รูป 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm	71
รูป 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 1 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm	72
รูป 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm	72
รูป 5.10 วงจรการให้ bias กับเดรนทั้งสอง เพื่อวัดหาค่ากระแส ของแต่ละเดรน	73
รูป 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 1 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm	73
รูป 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
รูป 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 1 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm	74
รูป 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm	75
รูป 5.15 วงจรการให้ bias กับเดรนทั้งสอง เพื่อวัดหาค่ากระแสรวม	75
รูป 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ โดยที่กระแส $I_D = I_{D1}+I_{D2}$ ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm	76
รูป 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ โดยที่กระแส $I_D = I_{D1}+I_{D2}$ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm	76
รูป 5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสเดรน 1(I_{D1}) เดรน 2 (I_{D2}) ขณะที่ได้รับ(MAGFET ตัวที่ 2)	77
รูป 5.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสเดรน 1(I_{D1}) เดรน 2 (I_{D2}) ขณะที่ได้รับbias เพียงเดรนเดียว (MAGFET ตัวที่ 3)	77
รูป 5.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสเดรน 1(I_{D1}) เดรน 2 (I_{D2}) ขณะที่จ่ายbiasให้กับเดรนทั้งสอง (MAGFETตัวที่ 2)]	78
รูป 5.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสเดรน 1(I_{D1}) เดรน 2 (I_{D2}) ขณะที่จ่ายbiasให้กับเดรนทั้งสอง (MAGFETตัวที่ 3)	78
รูป 5.22 วงจรวัดคุณสมบัติการตรวจจับสนามแม่เหล็ก	79
รูป 5.23 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{DS}=-1V	81
รูป 5.24 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{DS}=-3V	82
รูป 5.25 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{DS}=-1V	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
รูป 5.26 กราฟ แสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-3V	84
รูป 5.27 กราฟ แสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-6V	85
รูป 5.28 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ขณะที่ V_{DS}=-12V	86
รูป 5.29 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-6V	88
รูป 5.30 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-12V	89
รูป 5.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ V_{DS} ค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{GS} =-12V ของ MAGFET ตัวที่ 2	89
รูป 5.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ V_{DS} ค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{GS} =-13V ของ MAGFET ตัวที่ 2	90
รูป 5.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ V_{DS} ค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{GS} =-14V ของ MAGFET ตัวที่ 2	90
รูป 5.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ V_{DS} ค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{GS} =-12V ของ MAGFET ตัวที่ 3	91
รูป 5.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ V_{DS} ค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{GS} =-13V ของ MAGFET ตัวที่ 3	91
รูป 5.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ V_{DS} ค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{GS} =-14V ของ MAGFET ตัวที่ 3	92
รูป 5.37 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างMAGFETตัวที่ 2 กับ 3 ที่ V_{GS} =-13V, V_{DS}=-1V	92
รูป 5.38 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างMAGFETตัวที่ 2 กับ3 ที่ V_{GS} =-13V, V_{DS}=-3V	93
รูป 5.39 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างMAGFETตัวที่ 2 กับ3 ที่ V_{GS} =-13V, V_{DS}=-6V	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
รูป 5.40 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างMAGFETตัวที่ 2 กับ3 ที่V_{GS} =-13V, V_{DS}=-12V	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 5.1 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ เมื่อ V_{DS} = -1 V	80
ตารางที่ 5.2 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ เมื่อ V_{DS} = -3 V	81
ตารางที่ 5.3 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 3 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ เมื่อ V_{DS} = -1V	82
ตารางที่ 5.4 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 3 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ เมื่อ V_{DS} = -3 V	83
ตารางที่ 5.5 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ เมื่อ V_{DS} = -6 V	85
ตารางที่ 5.6 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ เมื่อ V_{DS} = -12 V	86
ตารางที่ 5.7 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 3 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ เมื่อ V_{DS} = -6 V	87
ตารางที่ 5.8 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 3 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ เมื่อ V_{DS} = -12V	88
ตารางที่ 6.1 แสดงค่าแรงดันออฟเซ็ทของ MAGFET ตัวที่ 2	95
ตารางที่ 6.2 แสดงค่าแรงดันออฟเซ็ทของ MAGFET ตัวที่ 3	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

(Introduction)

วัตถุประสงค์

1. สามารถที่จะเข้าใจในกระบวนการออกแบบและการสร้าง Split-drain magnetic field-effect transistor (MAGFET) ได้
2. สามารถเข้าใจและใช้เครื่องมือที่เกี่ยวกับกระบวนการออกแบบและสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้อย่างถูกต้อง
3. สามารถเข้าใจวิธีการวัดและทดสอบ Devices ที่สร้างขึ้นมาได้
4. มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ที่จะนำ Devices ที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้งานได้
5. เข้าใจถึงการปรับปรุงparameterต่างๆของอุปกรณ์เพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

รายงานฉบับนี้จะกล่าวถึง

ในความเป็นจริงแล้วปริมาณที่ได้จากสิ่งแวดล้อมโดยตรงเป็นการยากที่จะนำมาวิเคราะห์ให้เห็นเป็นรูปร่างและยากต่อการทำความเข้าใจถึงปริมาณนั้นๆ ซึ่งอาจจะเป็นปริมาณในรูปแบบที่เป็น magnetic field ,light , pressure ,temperature และรูปแบบอื่นๆอีกได้ ฉนั้นจึงได้มีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล่านั้นเป็นปริมาณทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ว่านี้ก็คือ Sensor Devices ที่จะต้องทำให้มีความถูกต้องสูงที่สุด และมีความผิดพลาดน้อยที่สุด เพราะเหตุนี้ Sensor Devices จึงมีบทบาทที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง

Split-drain magnetic field-effect transistor (MAGFET) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งของ Magnetic field sensors ซึ่งสามารถที่จะตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ และเมื่อมีสนามแม่เหล็กการเปลี่ยนก็ยังจะทำให้พารามิเตอร์อื่นๆที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งอาจจะเป็น voltage , current , frequency หรืออื่นๆเปลี่ยนแปลงได้ หลักการทาง physics ของ MAGFET ซึ่งมีโครงสร้างที่เรียกว่า “split-drain structure” ซึ่งจะทำการแยกส่วน drain ออกเป็นสองส่วน MAGFET สามารถที่จะตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะต้องตั้งฉากกับ channel ของอุปกรณ์ ซึ่งจะเป็นหลักการของ Hall effect และโดยปกติแล้วการประยุกต์ใช้งานมักจะใช้ Hall sensors มากกว่า MAGFET ก็เนื่องจากว่า MAGFET จะมีค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมากกว่า และมีสัญญาณรบกวน มากกว่าด้วย ถึงแม้ว่าลักษณะทาง physics ของทั้งสองอย่างจะมีความคล้ายคลึงกันแต่สัญญาณทางเอาท์พุทจะแตกต่างกันมากซึ่ง Hall sensors จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสนามแม่เล็กไฟฟ้าให้เป็น Hall voltage ที่เป็นผลเนื่องมาจากปรากฏการณ์ของฮอลล์เอง ส่วนลักษณะการทำงานของ MAGFET หลักการทำงานก็จะอยู่บนพื้นฐานของ Hall effect และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความไม่สมมาตรของกระแสเดรนเองที่เกิดเนื่องมาจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าหากว่าเรานำ MAGFET ไปใช้งานในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กอยู่ผลที่ได้ก็ไม่ต่างเลยกับ MOSFET ทั่วๆ ไป และจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป

ประโยชน์ของการนำ MAGFET ไปใช้งาน

1. Non-contact switching
2. Current measurement
3. Magnetic memory readout

และในรายงานฉบับนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีของMOSFET , Hall effect ,split-drain, ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการ split-drain ที่มีต่อการนำไปใช้งานทางด้าน sensors ตลอดจนการออกแบบการสร้าง MAGFET ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่แตกต่างกันออกไปเพื่อที่จะวัดความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเปรียบเทียบกัน และการทดสอบคุณสมบัติของ MAGFETที่ได้ทำการออกแบบและสร้าง

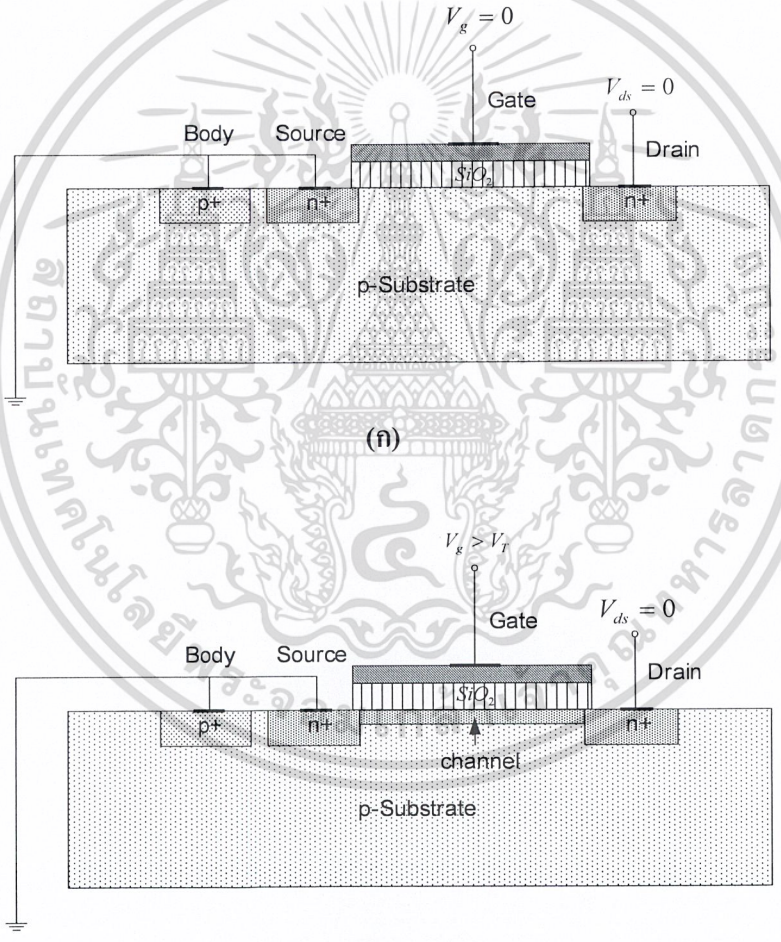
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานการทำงานของทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้าชนิด Induce-channel MOSFET

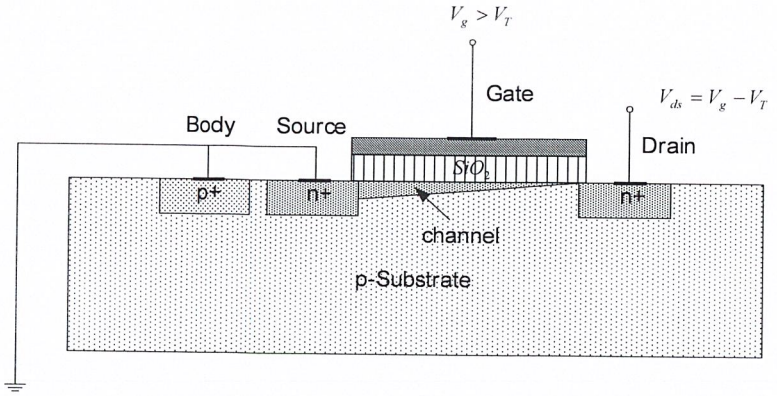
2.1.1 หลักการทำงานของ Induced – channel MOSFET

หลักการทำงานของ Induced – channel MOSFET หรือ Enhancement MOSFET สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจาก MOSFET ช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นแบบเอนฮานซ์เมนท์ ดังรูปที่ 2.1

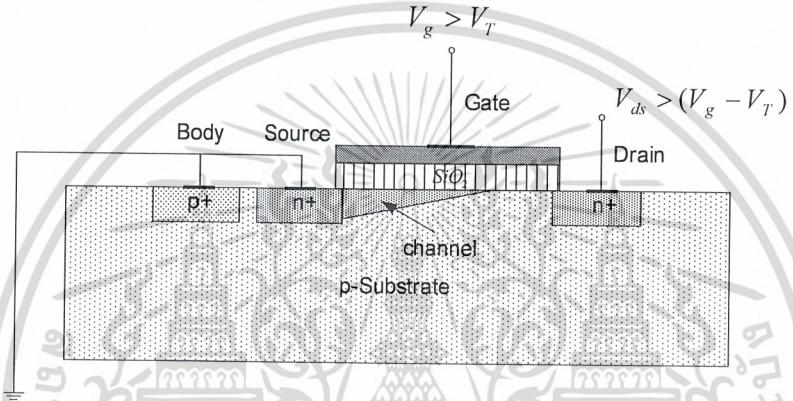


รูป 2.1 (ก)-(ข) MOSFET (n – channel) ภายใต้เงื่อนไขการไบอัสในช่วงต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูป 2.1 (ต่อ) (ค) - (ง) MOSFET (n – channel) ภายใต้เงื่อนไขการไบอัสในช่วงต่าง ๆ

ในรูปที่ 2.1 (ก) เมื่อแรงดันที่เกทเป็นศูนย์ ช่องทางเดินกระแสจะไม่เกิด ดังนั้นกระแส เดรนไม่สามารถไหลได้ แม้ว่าจะให้แรงดันระหว่างเดรนกับ ซอส (V_{gs}) ก็ตามรูปที่ 2.1 (ข) เมื่อแรงดันที่เกทมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage :V_T) จะเกิดช่องทางเดินกระแสขึ้นโดยมีบริเวณปลอดพาหะล้อมรอบ MOSFET พร้อมที่จะนำกระแสแต่แรงดันระหว่างเดรนกับซอสเป็นศูนย์ จึงยังไม่มีกระแสไหล กระแสเดรน (I_D) เป็นศูนย์

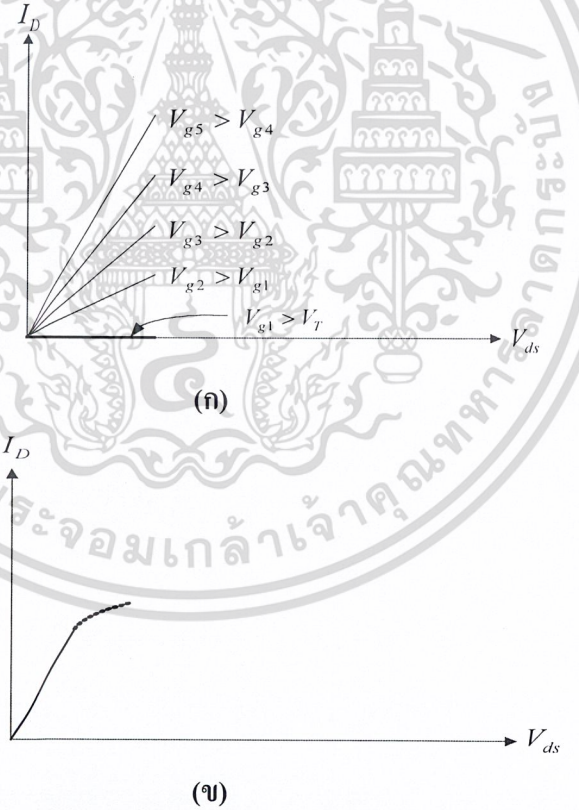
เมื่อให้แรงดันระหว่าง เดรนกับซอสมีค่ามากกว่าศูนย์ กระแสเดรน (I_D) จะไหลได้และเพิ่มขึ้นตามค่าของแรงดัน เดรน – ซอส ในช่วงแรงดัน เดรน ซอสมีค่าต่ำ ๆ กระแสเดรน I_D จะมีความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับแรงดัน เดรน – ซอส ซึ่งคุณสมบัติในช่วงนี้ถูกเรียกว่า “ย่านเชิงเส้น” (Linear region) และเมื่อแรงดัน เดรน – ซอส มีค่าต่ำ ๆ นี้ หากเพิ่มแรงดันเกทขึ้น ความหนาแน่นประจุชั้นกลับที่ช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้น ซึ่งความนำช่องทางเดินกระแสจะเพิ่มขึ้น ผลของการเพิ่มแรงดันที่เกทในย่านเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงดัน เดรน – ซอส (V_{ds}) เป็นมีค่าเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ด้านเดรน จะมีค่าน้อยกว่าด้านซอส ทำให้ประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำด้านเดรนมีความหนาแน่นน้อยลง ความนำไฟฟ้าของช่องทางเดินกระแสจึงมีค่าลดลงขณะที่แรงดัน เดรน – ซอส มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้ดังรูปที่ 2.2 (ข)

เมื่อแรงดัน เดรน – ซอส (V_{ds}) มีค่าเท่ากับ $V_g - V_T$ แล้วจะทำให้ช่องทางเดินกระแสขาดพอดี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) ภาวะนี้เรียกว่า "Pinch off" กระแสเดรน (I_D) จะมีค่าสูงสุด เมื่อแรงดัน เดรน – ซอส มีค่าสูงกว่า $V_g - V_T$ จุด Pinch off จะเคลื่อนเข้าใกล้ขั้ว ซอส ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ง) ช่องทางเดินกระแสจะหดสั้นลงกว่าเดิม โดยขาดออกจากเดรน และถูกกั้นด้วยบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) ซึ่งจะมีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ กระแสเดรนจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มขึ้นอีกแม้ว่าแรงดัน เดรน – ซอส จะเพิ่มขึ้นก็ตาม MOSFET จะอยู่ในสภาวะอิ่มตัว (saturation region) แสดงดังรูปที่ 2.1(ค)

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) กับแรงดัน เดรน – ซอส (V_{ds}) ได้ดังรูปที่ 2.2 (ง)

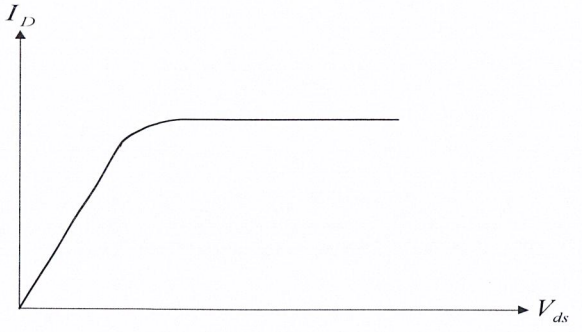


รูป 2.2 เส้นกราฟ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{ds}

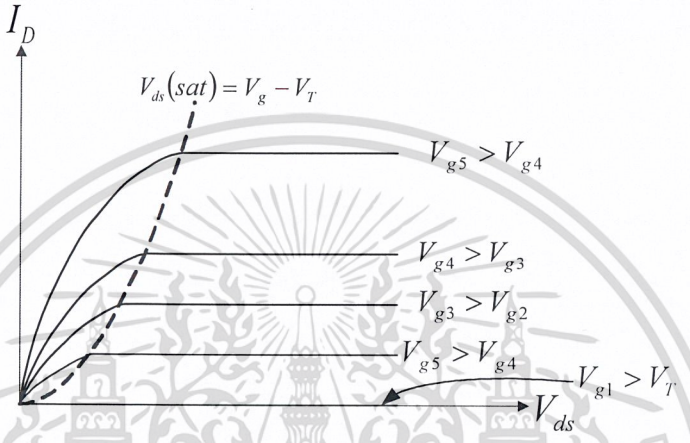
(ก) ย่านเชิงเส้น ค่า V_{ds} มีค่าน้อย ๆ

(ข) ค่า V_{ds} มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูป 2.2 (ต่อ) เส้นกราฟ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{ds}

(ค) ค่า $V_{ds} \geq V_{ds}$ (sat)

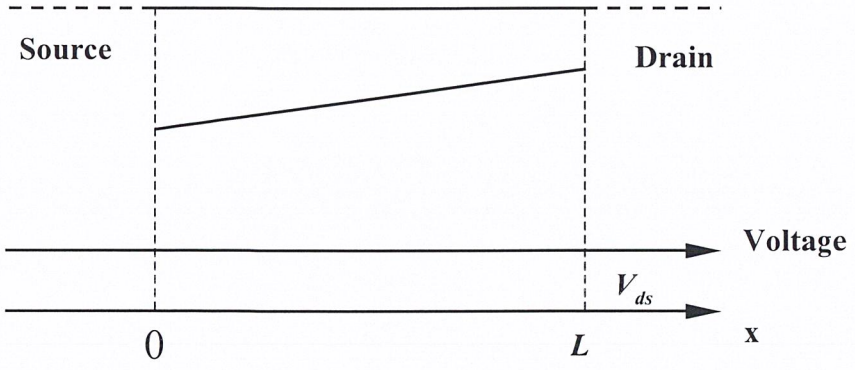
(ง) ความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{ds}

2.1.2 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดัน

จากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์นี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยการพิจารณาว่า ที่ตำแหน่ง x บนแนวของช่องทางเดินกระแสสมมติให้มีแรงดันเป็น $V(x)$ ซึ่งก็คือแรงดัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามแกน x แสดงดังรูปที่ 2.3 แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่จุด x ขณะที่ $V_d < (V_g - V_T)$ ก็คือ $V_g - V(x)$ ถ้าเราสมมติว่าชั้นของออกไซด์หนา t_{OX} และหนามากกว่าความลึกของแชนแนลมาก ดังนั้นสนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ก็คือ

$$E(x) = \frac{V_g - V(x)}{t_{OX}} \qquad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามแนวช่องทางเดินกระแส

ความหนาแน่นของประจุที่ผิว (surface charge) ρ_i ซึ่งถูกเหนี่ยวนำในแชนแนลที่จุด x มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าด้วยกฎของเกาส์โดย

$$\rho_{i(x)} = \varepsilon.\mathrm{d}_{(x)} = \varepsilon_o \varepsilon_r \left(\frac{V_g - V(x)}{t_{OX}} \right) \quad \mathrm{c/m^2} \tag{2.2}$$

โดยที่

ε_r คือ ค่า relative permittivity ของชั้นออกไซด์

แต่ไม่ใช่ว่าประจุทั้งหมดนี้จะสามารถนำไฟฟ้าได้ในแชนแนลทั้งนี้เนื่องจากขณะที่แรงดันเกทมีค่าเล็กน้อย ที่บริเวณผิวสัมผัสจะเกิดเฉพาะบริเวณปลอดพาหะขึ้นส่วนชั้นกลับยังไม่เกิดขึ้น อย่างไรก็ดีถ้าหากว่าแรงดัน V_T หรือที่เรียกว่า แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) ถูกนิยามว่า คือ แรงดันที่ตกคร่อมชั้นของออกไซด์ ซึ่งพอดีทำให้ความหนาแน่นของประจุในแชนแนลมีค่าเป็นศูนย์ แล้วดังนั้นแรงดันซึ่งมีค่ามากกว่า V_T จะเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับขึ้น ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ ความหนาแน่นของประจุพาหะที่เพิ่มขึ้นในแชนแนลซึ่งเป็นชั้นกลับคือ Δn สามารถแสดงความสัมพันธ์กับแรงดันที่ตกคร่อมชั้นของออกไซด์ $\left(V_g - V_{(x)}\right) - V_T$ ได้โดย

$$q.\Delta n(x) = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{V_g - V(x) - V_T}{t_{OX}} \quad \mathrm{c/m^2} \tag{2.3}$$

แล้วจะเห็นว่าโครงสร้างที่เกทมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ ซึ่งมีค่าความจุ C_g โดยเราอาจประมาณว่าเป็นแผ่นโลหะสองแผ่นขนานกัน ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_g = \frac{\varepsilon_o.\varepsilon_r.L.W}{t_{OX}} \tag{2.4}$$

โดยที่ W คือ ความกว้างของเกท และสมการ (2.3) อาจเขียนใหม่ในเทอมของ C_g ได้โดย

$$q.\Delta n(x) = \frac{C_g}{L.W}\left(V_g - V(x) - V_T\right) \quad \text{เมื่อ} \quad \left(V_g - V(x)\right) > V_T \tag{2.5}$$

และ

$$= 0 \qquad \text{เมื่อ} \quad \left(V_g - V(x)\right) < V_T \tag{2.6}$$

ทีนี้เรามาพิจารณาส่วนเล็ก ๆ ของแชนเนลซึ่งบางในช่วงความยาว dx และกว้าง W ดังนั้นจะหาค่าความนำของส่วนเล็ก ๆ $G(x)$ นี้ได้โดย

$$G(x) = \sigma(x).\frac{W}{dx} \tag{2.7}$$

โดยที่ $\sigma(x)$ คือ ค่าความนำที่ผิวต่อหนึ่งตารางเมตรของแชนเนล ดังนั้นค่าความนำของส่วนเล็ก ๆ ดังกล่าวนี้ก็คือ

$$G(x) = q.\Delta n(x).\mu_e \frac{W}{dx}$$

$$= \frac{C_g}{L.W}\left(V_g - V(x) - V_T\right).\mu_e \frac{W}{dx}$$

$$= \frac{\mu_e.C_g}{L.dx}\left(V_g - V(x) - V_T\right) \tag{2.8}$$

ซึ่ง μ_e คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในแชนเนล กระแสเดรน I_D หาได้จากกฎของโอห์มโดย

$$I_D = G(x).dV$$

ซึ่ง dV คือแรงดันที่ตกคร่อมส่วนเล็ก ๆ ในแชนเนลซึ่งยาว dx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ (2.8) ลงในสมการของ I_D ซึ่งเป็นกระแสในส่วนความยาว dx ซึ่งมีแรงดันตกคร่อม dV จะได้ว่า

$$I_D = \frac{\mu_e . C_g}{L.dx}.\left(V_g - V(x) - V_T\right)dV \tag{2.9}$$

เมื่อทำการอินติเกรตตลอดแนวแท่งผลึกซึ่งยาว L และมีแรงดันคร่อมรวมทั้งหมด V_d จะได้ว่า

$$\int_0^L I_D dx = \frac{\mu_e C_g}{L} \int_0^{V_d} \left(V_g - V(x) - V_T\right)dV \tag{2.10}$$

เพื่อให้ง่ายขึ้น เราจะสมมติว่า ค่าความต้านทานที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วของซอส และเดรน มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นสมการที่ (2.10) จะกลายเป็น

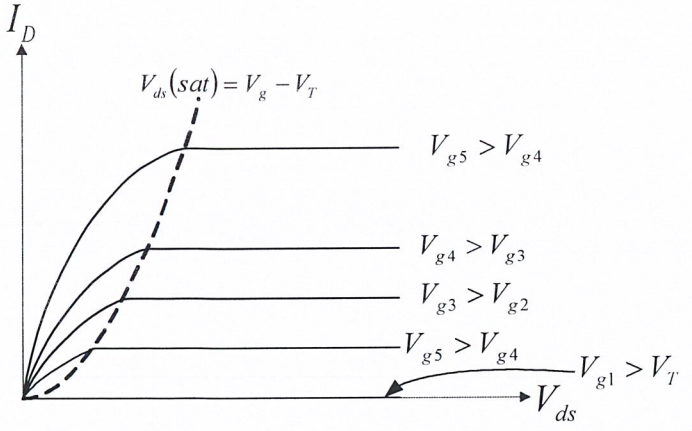
$$I_D = \frac{\mu_e . C_g}{L^2}\left(V_g - V_T - \frac{V_d}{2}\right).V_d \tag{2.11}$$

อย่างไรก็ดีสมการนี้ใช้ได้สำหรับกรณีที่แรงดันสุทธิที่ตกคร่อมชั้นของออกไซด์ที่จุดต่าง ๆ มีค่ามากกว่าแรงดันวิกฤตเท่านั้น กล่าวคือ $(V_g - V_{(x)}) > V_T$ ดังนั้น ค่าของแรงดันเกท V_g ค่าหนึ่งคือ V_{gl} สมการนี้ใช้ได้สำหรับกรณีที่แรงดันเดรน V_d อยู่ในช่วง $0 \leq V_d \leq (V_{gl} - V_T)$ ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่าที่ค่า V_d ต้องน้อยกว่า $V_g - V_T$ นั้นก็เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดมีชั้นกลับขึ้นที่ปลายของเดรน กล่าวคือเมื่อแรงดันเดรน V_d มีค่าสูงขึ้น กระทั่งถึงค่าสูงสุดนี้แล้ว กระแสเดรนจะอิ่มตัวอยู่ที่ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นค่าสูงสุด $I_D(sat)$ ซึ่งเราสามารถหาได้โดยการแทนค่า $V_d = V_g - V_T$ ลงในสมการที่ (2.11) จะได้ว่า

$$I_D(sat) = \frac{\mu_e . C_g}{2L^2}\left(V_g - V_T\right)^2 \tag{2.12}$$

คุณสมบัติของ Induced – channel MOSFET แสดงได้ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.4 แสดงคุณสมบัติของ Induced - channel MOSFET

2.1.3 ทรานส์คอนดัคแตนซ์ (Transcoundctance)

ทรานส์คอนดัคแตนซ์ของ MOSFET ถูกนิยามว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนเทียบกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกท หรือ

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_g} \tag{2.13}$$

ทรานส์คอนดัคแตนซ์บางทีก็เรียกว่าอัตราขยายทรานซิสเตอร์

ถ้าเราพิจารณาการทำงานของ MOSFET ช่องทางเดินกระแสในบริเวณไม่อิ่มตัว แล้วใช้สมการ (2.11) เราจะได้

$$g_{mL} = \frac{\partial I_D}{\partial V_g} = \frac{W\mu_e C_{OX}}{L} V_d \tag{2.14}$$

เมื่อ

$$C_{OX} = \frac{\varepsilon_o . \varepsilon_x}{t_{ox}}$$

ทรานส์คอนดัคแตนซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับ V_d แต่จะอิสระจาก V_g ในบริเวณไม่อิ่มตัว

คุณสมบัติ I – V ของ MOSFET ช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นในบริเวณอิ่มตัวหาได้จากสมการ(2.12) ทรานส์คอนดัคแตนซ์ในการทำงานบริเวณนี้ คือ

$$g_{mL} = \frac{\partial I_D(sat)}{\partial V_g} = \frac{W\mu_e C_{OX}}{L}\left(V_g - V_T\right) \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณอิ่มตัวทรานส์คอนดัคแตนส์จะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ V_g และจะเป็นอิสระจาก V_d

ทรานส์คอนดัคแตนซ์เป็นความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์พอ ๆ กับความคล่องตัวของพาหะและแรงดันขีดเริ่ม ทรานส์คอนดัคแตนซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวและความหนาของอกไซด์เพิ่มขึ้นด้วยในการออกแบบวงจร MOSFET ขนาดของทรานซิสเตอร์โดยเฉพาะความกว้าง W จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการออกแบบ

2.1.4 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage : V_T)

แรงดันขีดเริ่มคือ แรงดันที่ให้ที่เกทที่ต้องการเกิดชั้นกลับ (inversion layer) โดยทีเงื่อนไขว่าเมื่อศักย์พื้นผิว $\varnothing_s = 2.\varnothing_f$ โดย $\varnothing_f$ เป็น work function ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรองซึ่งจากนิยามดังกล่าวอธิบายได้ว่า ชั้นกลับที่เกิดขึ้นนั้นต้องมีความหนาแน่นเท่ากับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของฐานรอง ดังนั้น พลังงานที่อยู่ในรูปของแรงดันที่ให้กับเกทจะต้องเป็นสองเท่าของผลต่างระหว่าง E_{Fi} กับ E_F ดังนั้นจะได้ว่า

$$q.V_S = 2.\left(\frac{E_g}{2} - E_{FS}\right) = E_g - 2E_{FS} \qquad (2.16)$$

และโดยการอินติเกรตสมการของ Poisson ตลอดชั้นของบริเวณปลอดพาหะจะได้

$$d_P = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_S}{q.N_a}} \qquad (2.17)$$

และเมื่อสมมติว่าไม่มีแรงดันสัมผัส (contact voltage) ที่บริเวณสัมผัสระหว่างออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำแล้วจะเห็นว่า V_T ก็คือผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมออกไซด์กับแรงดันที่ตกคร่อมชั้นของบริเวณปลอดพาหะนั่นคือ

$$V_T = V_{OX} + V_S \qquad (2.18)$$

โดยที่ V_{OX} คือแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์

V_S คือแรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งไปกว่านี้ ถ้าหากสมมติว่า ชั้นของบริเวณปลอดพาหะมีความหนาน้อยกว่าชั้นของออกไซด์มาก ๆ จนกระทั่งเราสามารถคิดได้ว่าประจุในชั้นนี้เป็นประจุที่ผิว (surface charge) ดังนั้น

$$Q = C_{OX}.V_{OX} = q.N_a.d_P$$
$$= \frac{\varepsilon_{OX}}{t_{OX}}.V_{OX} = q.N_a.d_P$$

หรือ

$$V_{OX} = \frac{W.L}{C_g}.q.N_a.d_P \tag{2.19}$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.16) , (2.17) และ (2.19) ลงในสมการ (2.18) จะได้ว่า

$$V_T = \frac{W.L}{C_g}.\sqrt{2\varepsilon_S.N_a.(E_g - 2E_{FS})} + \frac{E_g - 2E_{FS}}{q} \tag{2.20}$$

2.2 ปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติก พื้นฐาน (Basic Galvanomagnetic Effect)

ในสารกึ่งตัวนำจะเกิดปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติก(galvanomagnetic effect) เช่นแรงดันฮอลล์(Hall voltage) การเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection) หรือความต้านทานแม่เหล็ก เป็นต้น เหล่านี้เนื่องมาจากการกระทำของแรงลอเรนซ์บนประจุพาหะ (อิเล็กตรอน หรือ โฮล)

การกระทำของแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ตามสมการที่ (2.21) แสดงให้เห็นถึง การส่งผ่านพาหะ (carrier transport) ด้วยแรงดังกล่าว สมมติว่า วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (n-type) แบบนอนดีเจนเนอเรท (non-degenerate) ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (zero temperature gradient) แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอน (electron current density) เมื่อสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำมีค่าเป็น ศูนย์ ($\vec{B} = o$) ด้วย $\vec{J}_n(0)$ จากการประมาณค่ากระแสดริฟท์และกระแสจากการแพร่ของสมการโบลทซ์มันท์ทรานสปอร์ท (Boltzmann transport) ทำให้ได้สมการความหนาแน่นกระแส (current density) ตามสมการที่ (2.22)

$$\vec{F} = -q\vec{v} \times \vec{B} \tag{2.21}$$
$$\vec{J}_n(0) = \sigma_n \vec{E} + qD\nabla n \tag{2.22}$$

โดยที่ $\sigma_n = q\mu_n n$ คือ ค่า electronic conductivity สำหรับ $\vec{B} = 0$

$\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D_n = \dfrac{\mu_n kT}{q}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$\mu_n = \dfrac{v_n}{|\vec{E}|}$ คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอน (electron drift mobility)

และ ∇ คือ เกรเดียน (gradient)

ในการอธิบายการกระทำของแรงลอเรนซ์ ในสมการที่ (2.21) กล่าวโดยสรุปแล้ว เราจะประมาณว่าอิเล็กตรอนทุกตัวมีเพียงแค่ ความเร็วเฉลี่ยของการดริฟท์ (average drift-diffusion velocity: $\vec{v}_n$) และการแพร่ แล้วแทน $\vec{v}_n$ ในสมการที่ (2.22) ด้วย $\vec{v}_n = \vec{v}_n \times \left(\mu_n \vec{B}\right)$ ดังนั้น จะได้ว่า

$$\vec{J}_n\left(\vec{B}\right) \approx \vec{J}_n(0) - \mu_n \vec{J}_n\left(\vec{B}\right) \times \vec{B} \tag{2.23}$$

สำหรับความหนาแน่นกระแส $\vec{J}_n\left(\vec{B}\right)$ ที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ แล้วแก้สมการที่ (2.23) จะได้ว่า

$$\vec{J}_n\left(\vec{B}\right) \approx \left[\vec{J}_n(0) + \mu_n \vec{B} \times \vec{J}_n(0) + \left(\mu_n\right)^2 \vec{B} \bullet \vec{J}_n(0)\vec{B}\right]\left[1 + \left(\mu_n \vec{B}\right)^2\right]^{-1} \tag{2.24}$$

ซึ่ง $\bullet$ คือ scalar product

สำหรับสารกึ่งตัวนำนอนดีเจนเนอเรท (non-degenerate) การกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นขึ้นอยู่กับกลไกการชน (scattering mechanisms) ซึ่งไม่สามารถที่จะละทิ้งได้ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ในเทอมของแฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor: r_n) ของอิเล็กตรอน

$$r_n = \frac{\left\langle \tau^2 \right\rangle}{\left\langle \tau \right\rangle^2} \tag{2.25}$$

โดยที่ τ คือ เวลาผ่อนคลาย (relaxation time) หรือ เวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันในแต่ละครั้ง

$\langle\ \rangle$ คือ การกระจายพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน

จากทฤษฎี ค่า $r_n = 1.18$ สำหรับ photon scattering

$r_n = 1.93$ สำหรับ การกระเจิงเนื่องจากสารเจือ (Impurity scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถหาที่มาจากการกระจายแบบโบลทซ์มันท์ (Boltzmann's distribution) สำหรับสารกึ่งตัวนำแบบนอนดีเจนเนอเรทด้วยพื้นผิวทรงกลมที่มีระดับพลังงานคงที่ สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็น (n-type silicon) ค่าของ r_n จะประมาณ 1.15 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (donor concentration) สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ $\vec{B}$ การกระเจิงที่ขึ้นอยู่กับพลังงานอธิบายได้โดยการแทนสภาพคล่องในการดริฟท์ (drift mobility: μ_n) ด้วยฮอลล์โมบิลิตี้ (Hall mobility)

$$\mu_n^* = r_n \mu_n \tag{2.26}$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่า μ_n^* ลงในสมการที่ (2.24) ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน $\vec{J}_n(\vec{B})$ ในสารกึ่งตัวนำแบบนอนดีเจนเนอเรทชนิดเอ็น ที่ประสบกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จะประมาณได้จากสมการดังนี้

$$\vec{J}_n(\vec{B}) = \left[\vec{J}_n(0) + \mu_n^* \vec{B} \times \vec{J}_n(0) + K(\mu_n^*)^2 \vec{B} \bullet \vec{J}_n(0)\vec{B}\right]\left[1 + (\mu_n^* \vec{B})^2\right]^{-1} \tag{2.27}$$

แฟคเตอร์ K คือ ปรากฏการณ์ของค่าเฉลี่ยของกำลังที่อยู่ในระดับสูง เช่น $\langle \tau^3 \rangle$ ในเทอมที่ 3 ของสมการที่ (2.27) ในสมการที่ (2.27) อธิบายถึงเฉพาะปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติก ที่อุณหภูมิคงที่ $(\nabla T = 0)$ ถ้าความหนาแน่นของพาหะมีค่าสม่ำเสมอ นั้นคือ ∇n สามารถตัดออกไปได้ สามารถแทนสมการที่ (2.27) ได้ด้วย

$$\vec{J}_n(\vec{B}) = \sigma_{nB}\left[\vec{E} + \mu_n^* \vec{B} \times \vec{E} + K(\mu_n^*)^2 (\vec{B} \bullet \vec{E})\vec{B}\right] \tag{2.28}$$

ซึ่งสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับสภาพนำ (conductivity)

$$\sigma_{nB} = \sigma_n\left[1 + (\mu_n^* \vec{B})^2\right]\vec{E} \tag{2.29}$$

ถ้า $\vec{B}$ ขนานกับ $\vec{E}$ ดังนั้น $(\vec{B} \times \vec{E} = 0)$ และความหนาแน่นของกระแสจะกลายเป็น

$$\vec{J}_n(\vec{B}) = \sigma_{nB}\left[1 + K(\mu_n^* \vec{B})^2\right]\vec{E}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก(magnetoresistance)ในแนวยาว ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบนอนดีเจนเนอเรท แต่จะไม่เกิดในโลหะที่มี $K = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณากรณีที่สำคัญ คือ เมื่อสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ $(\vec{B})$ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า$(\vec{E})$ ในกรณีนี้จะได้ $(\vec{B} \bullet \vec{E} = 0)$ ดังนั้นความหนาแน่นของกระแส จะเท่ากับ

$$\vec{J}_n(\vec{B}) = \sigma_{nB}\left[\vec{E} + \mu_n{}^* \vec{B} \times \vec{E}\right] \tag{2.30}$$

สมการที่ (2.30) นี้ อธิบายปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติกตามขวาง (transverse galvanomagnetic) ของอิเล็กตรอนในกรณีที่ตัดการแพร่ออกไป ในเทอม $\mu_n{}^*(\vec{B} \times \vec{E}) = -(\vec{v}_n \times \vec{B})$ โดยทั่วไปหมายความว่า สนามไฟฟ้าตามขวางจะสมดุลกับการเบี่ยงเบนของเส้นทางเดินของพาหะภายใต้แรงลอเรนซ์ตามแนวความยาว สมมติว่า เวกเตอร์ $\vec{E}$ และ $\vec{J}_n(\vec{B})$ อยู่ในระนาบ x-y และสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ $\vec{B}$ ขนานกับทิศทางแกน z ดังนั้นในเทอมของ $\vec{E}$ คือ

$$\vec{E} = (E_x, E_y, 0)$$

$$\vec{J}_n(\vec{B}) = (J_{nx}, J_{ny}, 0)$$

และ $$\vec{B} = (0,0,B)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.43) จะได้ว่า

$$\left.\begin{aligned} J_{nx} &= \sigma_{nB}\left(E_x - \mu_n{}^* B E_y\right) \\ J_{ny} &= \sigma_{nB}\left(E_y + \mu_n{}^* B E_x\right) \end{aligned}\right\} \tag{2.31}$$

จากสมการที่ (2.31) เราจะนำไปอธิบายถึงขีดจำกัดของ แผ่นสารกึ่งตัวนำที่ยาวมาก ๆ และที่กว้างมาก ๆ ต่อไป

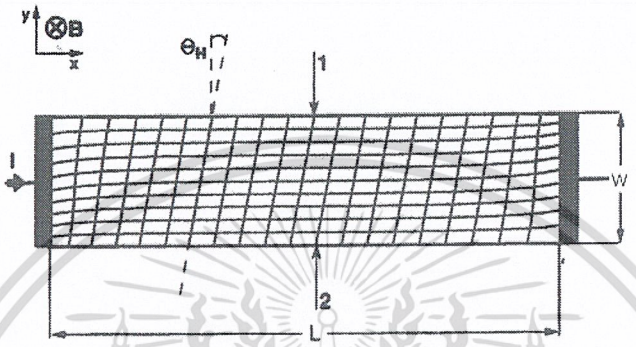
สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field) สมมติว่าความหนาแน่นของกระแสที่มีเฉพาะส่วนประกอบตามแนวแกน x (x-component) โดยที่ $J_{ny} = 0$ เงื่อนไขนี้สามารถประมาณได้โดยแผ่นสารกึ่งตัวนำยาว L ซึ่งมีความกว้าง W แคบ ๆ ($W << L$) และจ่ายกระแสเข้าที่ด้านหน้าที่มีความกว้าง W แคบ ๆ (ดังรูปที่ 2.5) ดังนั้น สนามไฟฟ้าของฮอลล์ (Hall field) ทำให้เกิดผลซึ่งจากสมการที่ (2.31) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_y = -\mu_n^* B E_x = R_H J_{nx} B \tag{2.32}$$

เมื่อ

$$R_H = \frac{-\mu_n^*}{\sigma_n} = \frac{-r_n}{qn} \tag{2.33}$$



รูป 2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความยาว $L = 4W$ เส้นกระแส (current line) จะเชื่อมต่อกับจุดสัมพันธ์แบบโอห์มมิก (ohmic contacts) เส้นศักย์ดาสมมูล (equipotential lines) จะเบี่ยงเบนไปจากแนวดิ่งไปเป็นมุม θ_H (Hall angle) แรงดันของฮอลล์ (Hall voltage) จะปรากฏให้เห็นระหว่างตำแหน่ง 1 และ 2 เส้นกราฟในรูปเกิดจากแบบจำลองทางตัวเลข (numerical modeling) ที่มีค่าของ $\mu_n^* B = 0.21$

จากสมการที่ (2.33) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการโด๊ป (doping) วัสดุสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เห็นว่า สนามไฟฟ้าของฮอลล์ มีผลทำให้เกิดการเบนของเส้นศักย์ดาสมศักดิ์ ไปเป็นมุม θ_H (Hall angle) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\tan\theta_H = \frac{E_y}{E_x} = -\mu_n^* B = \sigma_n R_H B \tag{2.34}$$

จากสมการที่ (2.33) ทำให้รู้ว่า ความหนาแน่นของประจุพาหะ (n) ที่มีค่าต่ำ ๆ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) มีค่ามาก ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้เห็นว่า สารกึ่งตัวนำถูกนำมาใช้มากกว่าโลหะ จากสมการที่ (2.34) เราจะสังเกตเห็นว่า ค่าสภาพคล่องสูง ๆ จะทำให้ค่ามุมของฮอลล์ θ_H และสนามไฟฟ้าของฮอลล์ E_y มีค่าสูงตามไปด้วย แผ่นสารกึ่งตัวนำบาง ๆ ที่มีความหนา t มีกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ไหลผ่าน I และมีสนามไฟฟ้าของฮอลล์ ตามสมการที่ (2.32) จะทำให้เกิดแรงดันของฮอลล์ต่อกระแสและสนามแม่เหล็ก คือ

$$\frac{V_H}{IB} = \frac{R_H}{t} = \frac{-r_n}{qnt} \tag{2.35}$$

จากความสัมพันธ์ที่ได้นี้ ถ้าต้องการให้ค่าสูง ๆ ก็ต้องให้ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะและความหนาของแผ่นสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อย ๆ

การเบี่ยงเบนของพาหะและค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Carrier Deflection and Magnetoresistance) สมมติว่า สนามไฟฟ้าของฮอลล์มีค่าเป็น ศูนย์ $\left(E_y = 0\right)$ เงื่อนไขนี้จะใช้ประมาณได้เมื่อ ค่า $L<<W$ และจากกระแสที่เข้าไปด้านหน้า (ดูรูปที่ 2.7) ภายใต้เงื่อนไขนี้ ค่า J_{nx} จากสมการที่ (2.31) จะทำให้เกิดการเบนของเส้นกระแส อธิบายได้ด้วยอัตราส่วนของ

$$\frac{-J_{ny}}{J_{nx}} = \tan\theta_L = \mu_n{}^* B \tag{2.36}$$

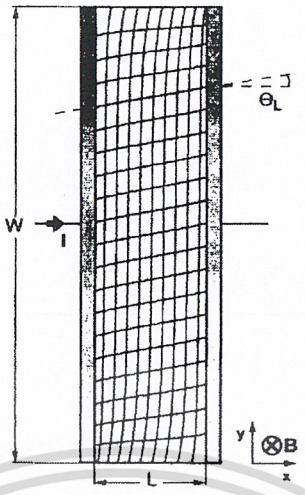
นี่คือการเบี่ยงเบนของพาหะ กระแส หรือแรงลอเรนซ์ มุมการเบี่ยงเบนของเส้นกระแสหรือที่เรียกว่า "มุมลอเรนซ์" (Lorentz angle) คือ $\theta_L = \arctan\left(\mu_n{}^* B\right)$

รูปที่ 2.7 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการทำงานในโหมดแรงดันฮอลล์ (Hall mode) และโหมดกระแสลอเรนซ์ (Lorentz mode) ของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ในกรณีที่แผ่นสารกึ่งตัวนำกว้าง ๆ ซึ่งมีการแยกขั้วสัมผัส (split contact) มีกระแสรวม I การเบี่ยงเบนของพาหะจะทำให้เกิดกระแสที่ไม่สมดุล I_L ระหว่างด้านซ้ายและด้านขวาของขั้วสัมผัส ดังนั้นแต่ละข้างจะมีกระแส $\frac{\left(I + I_L\right)}{2}$ หรือ $\frac{\left(I - I_L\right)}{2}$ ผลของกระแสลอเรนซ์ (Lorentz current) I_L อธิบายได้โดย

$$I_L = \mu_n{}^* \left(\frac{L}{W}\right) IB \tag{2.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50386



รูป 2.6 การเบี่ยงเบนของพาหะจากแรงลอเรนซ์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำ กว้าง $(W = 4L)$ เส้นกระแสเชื่อมกับจุดสัมผัส และถูกเบี่ยงเบนไปจากแนวนอนไปเป็นมุม θ_L เส้นศักย์ดาสมมูลขนานกับเส้นตามแนวสัมผัส ซึ่งรูปที่ได้นี้มาจากแบบจำลองที่มีค่าของ $\mu_n^* B = 0.21$

เมื่อแยกขั้วสัมผัสออกเป็นสองส่วนและมีระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองไม่มาก ความไวที่เปรียบเทียบกับกระแส คือ I_L / IB ซึ่งจะแปรผันตรงกับสภาพคล่องของพาหะ

ถ้าเส้นทางเดินของกระแสยาวมากขึ้น จะให้เกิดการเบี่ยงเบนนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานแม่เหล็กของรูปทรงตามขวาง (geometric magnetoresistance effect)

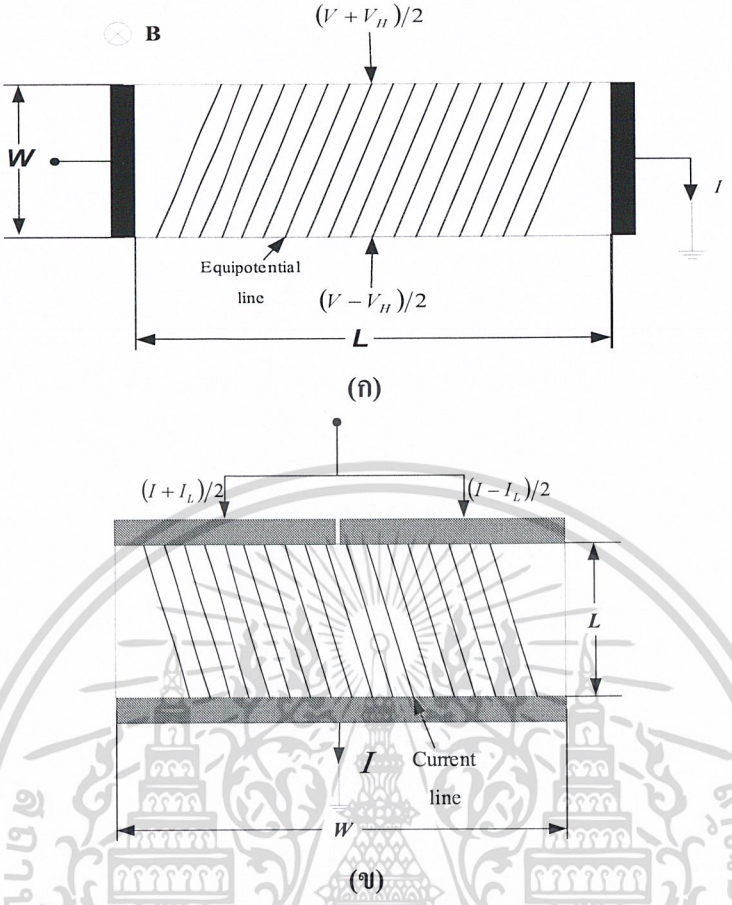
$$\frac{(\rho_{nB} - \rho_n)}{\rho_n} = (\mu_n^* B)^2 \tag{2.38}$$

โดยที่

$\rho_n = \dfrac{1}{\sigma_n}$ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) เมื่อ $\vec{B} = 0$

$\rho_{nB} = \dfrac{E_x}{J_{nx}} = \dfrac{1}{\sigma_{nB}}$ คือ สภาพต้านทานที่จะมีค่ามากขึ้นด้วยสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.7 (ก) การทำงานในโหมดแรงดันฮอลล์ (Hall voltage mode)
(ข) การทำงานในโหมดกระแสลอเรนซ์ (Lorentz current mode)

สำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด พี (p-type semiconductor material) ที่มีดริฟท์และฮอลล์โมบิลิตี้ μ_p และ $\mu_p{}^* = r_p\mu_p$ สิ่งในการวิเคราะห์นั้นคือ แรงลอเรนซ์มีเครื่องหมายตรงกันข้ามแทนในสมการที่ (2.30) ความหนาแน่นกระแสโฮล (Hole current density: $\vec{J}_p(B)$) สำหรับ $\vec{B}$ ตั้งฉากกับ $\vec{E}$ คือ

$$\left.\begin{aligned}\vec{J}_p(\vec{B}) &= \sigma_{pB}\left(\vec{E}-\mu_p{}^*\vec{B}\times\vec{E}\right)\\ \text{เมื่อ}\qquad \sigma_{pB} &= \sigma_p\left[1+\left(\mu_p{}^*B\right)^2\right]^{-1}\end{aligned}\right\} \qquad (2.39)$$

โดยที่ $\sigma_p = q\mu_p p$ เป็นสภาพนำของโฮล ขณะที่ $\vec{B}=0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สำหรับโฮล คือ

$$R_H = \frac{\mu_p^*}{\sigma_p} = \frac{r_p}{qp} \tag{2.40}$$

มุมของฮอลล์ สำหรับโฮล คือ

$$\tan\theta_H = \mu_p^* B \tag{2.41}$$

ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistance effect) ของโฮล อธิบายได้ด้วย

$$\frac{\rho_{pB}}{\rho_p} = 1 + \left(\mu_p^* B\right)^2 \tag{2.42}$$

เมื่อ $\rho_p = \frac{1}{\sigma_p}$

เมื่อรวมความนำทั้ง n-type และ p-type เข้าด้วยกันจะทำให้ได้ R_H คือ

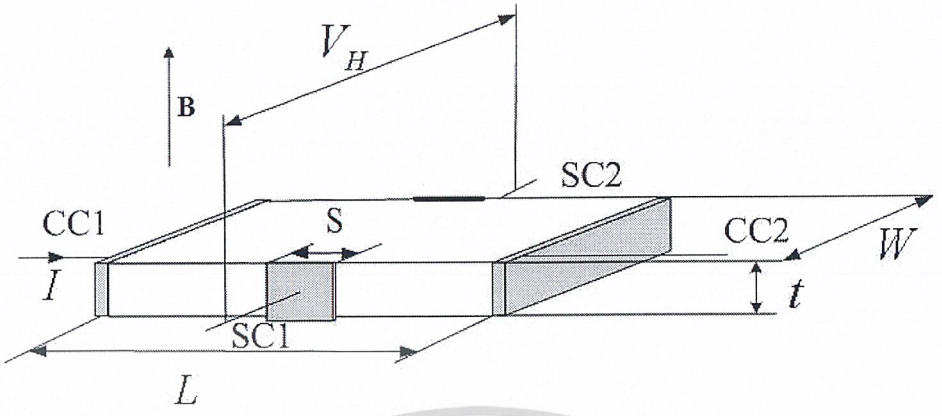
$$R_H = -\frac{\left[r_n\left(\mu_n/\mu_p\right)^2 n - r_p p\right]}{q\left[\left(\mu_n/\mu_p\right)n + p\right]^2} \tag{2.43}$$

2.3 แฟคเตอร์ G (Geometry Factor)

ฮอลล์เพลท (Hall plate) โดยปกติแล้วจะถูกสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความหนาน้อยๆ วัสดุที่นำมาสร้างจะต้องมีความหนาแน่นของประจุพาหะต่ำ ซึ่งจากรูป 2.8 จะเห็นว่าลักษณะโครงสร้างมี4ขั้ว และรอยต่อระหว่างขั้วเป็นแบบโอห์มมิค แรงดันฮอลล์จะวัดได้จากขั้ว SC1 และ SC2 จากสมการ(2.35)จะสามารถหาแรงดันฮอลล์ได้ แต่ในฮอลล์เพลทที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะขึ้นอยู่กับค่าแฟคเตอร์ G ด้วยซึ่งแรงดันฮอลล์จะได้จาก

$$V_H = \frac{R_H GIB}{t} = -\frac{GIBr_n}{qnt} \tag{2.44}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.8 ฮอลล์เพลทรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

แฟคเตอร์ G เป็นค่าเนื่องจากรูปทรงเรขาคณิตของฮอลล์เพลท โดยขึ้นอยู่กับความยาว L ความกว้าง W ขนาดของขั้วสัมผัส (SC1, SC2) และมุมฮอลล์ θ_H

ค่าแฟคเตอร์ G มีค่าประมาณเข้าใกล้ 1 ถ้าความยาวของฮอลล์เพลท L มีค่ามากๆ โดยอธิบายได้ว่ากระแสที่ไหลระหว่างขั้วทั้งสองจะประมาณเป็นแนวเส้นตรง ทำให้ไม่มีผลต่อแรงดันฮอลล์ หรืออาจมีแต่น้อยมากซึ่งสามารถหาได้จาก

$$G = \left[1 - \left(\frac{16}{\pi^2}\right)\exp\left(\frac{-\pi L}{2W}\right)\frac{\theta_H}{\tan\theta_H}\right]\left(1 - \frac{2s\theta_H}{\pi W \tan\theta_H}\right) \qquad (2.45)$$

สำหรับค่ามุมฮอลล์ ที่มีค่าน้อยๆ เทอมแรกในวงเล็บ[ ] จะแสดงผลของระยะห่างระหว่างขั้วเดอร์เรนท์คอนแทค หรือความยาว L ขณะที่เทอมที่ 2 จะจำกัดขนาดขั้วของเซ็นเซอร์คอมแทค หรือ ขนาด s และค่าที่คำนวนได้จะใกล้เคียงมากกว่า 4% ค่า G จะประมาณเข้าใกล้ 1 ถ้า $\frac{L}{W} > 3$ และ $\frac{S}{W} < \frac{1}{2}$ และในทางตรงกันข้ามถ้า $L < W$ และจุดขั้วต่อของเซ็นเซอร์ SC1, SC2 อยู่ที่ตำแหน่ง $Y = \frac{L}{2}$ ค่า G จะประมาณได้

$$G \approx 0.74\frac{L}{W} \qquad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบสมการที่ (2.44) ดูเหมือนจะบอกเป็นนัยว่า ฮอลล์เพลทจะต้องยาวและบาง และมีความหนาแน่นของพาหะต่ำ ซึ่งเป็นไปได้ สำหรับประสิทธิภาพในการใช้เมื่อมีการไบอัสด้วยกระแสซึ่งจะมีแรงดันตกคร่อม คือ

$$V = \frac{I}{qn\mu_n^*}\left(\frac{L}{Wt}\right) \tag{2.47}$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.46) ลงในสมการที่ (2.44) จะได้ แรงดันฮอลล์ ในเทอมของแหล่งจากแรงดัน V คือ

$$V_H = \mu_n^*\left(G\frac{W}{L}\right)BV \tag{2.61}$$

ข้อเปรียบเทียบของสมการที่ (2.35) ความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นค่า สภาพคล่องของพาหะสูง ๆ สำหรับสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เพลท ดังนั้น จากสมการที่ (2.48) แรงดันฮอลล์ของเพลท เมื่อให้ไบอัสด้วยแรงดัน ดูเหมือนว่าจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ W/L ดังนั้นอย่างไรก็ตาม ค่าที่จำกัดแสดงให้เห็นโดยการรวมสมการที่ (2.46) และสมการที่ (2.48) จะให้แรงดันฮอลล์สูงสุด สำหรับเพลทที่มีความยาว L สั้น ๆ ภายใต้การให้ไบอัสด้วยแรงดัน คือ

$$V_H \approx 0.74\mu_n^* BV \tag{2.49}$$

ในฮอลล์เพลทที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เราสามารถประมาณค่า แฟคเตอร์ G ได้ดังนี้

กรณี $\frac{L}{W} > 3$ ค่า $G \approx 1$

$\frac{L}{W} < 1$ ค่า $G < 0.7$

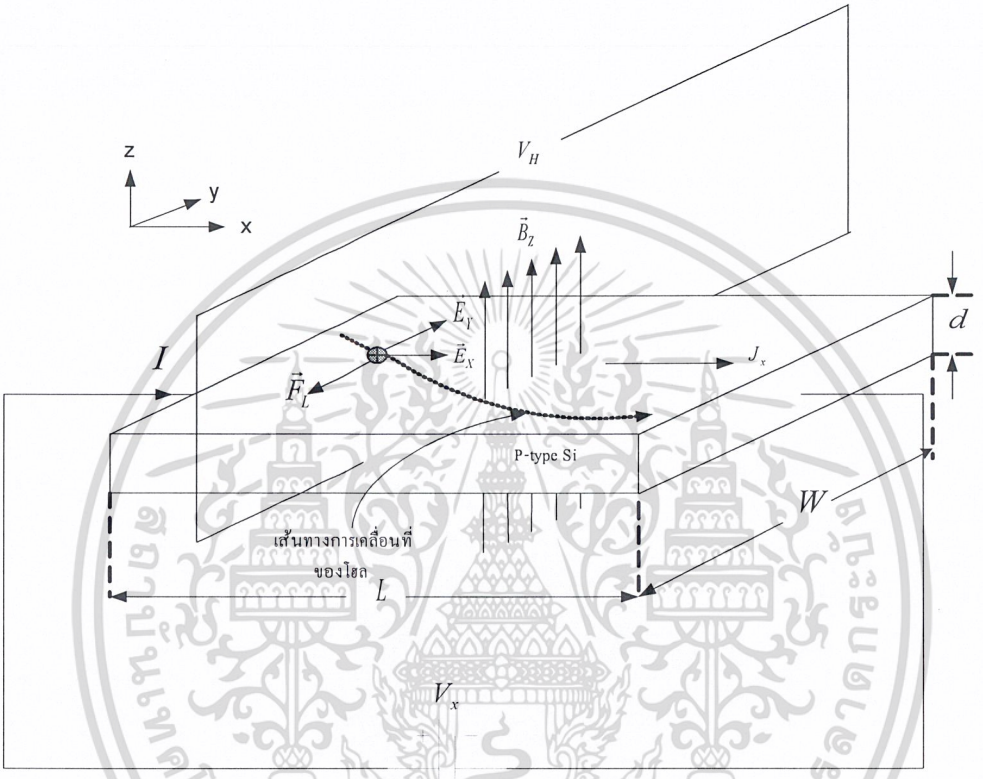
$\frac{L}{W} \approx 1.35$ ค่า $G \approx 0.7$

เราสามารถนำเอาปรากฏกรณ์กัลป์วานอแมกเนติกมาใช้เพื่อวัดค่าความหนาแน่นของพาหะชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะเป็นวิธีที่นิยมกันมาก หลักการของการทดลองคือขณะที่มีกระแส J_x ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทางหนึ่ง (+X) เมื่อให้สนามแม่เหล็ก B_Z ตัดผ่านในทิศ Z โดยตั้งฉากกับทิศของกระแสจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยมีทิศทาง Y ตั้งฉากกับทิศของกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ถูกเรียกว่า "ปรากฏการณ์ของฮอลล์" (Hall Effect) ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าในสารกึ่งตัวนำมีพาหะนำประจุอยู่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดที่แตกต่างกันคือ อิเล็กตรอนและโฮล นอกจากนี้ผลการทดลองทำให้สามารถวัดและคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อื่นๆได้อีกด้วย

เราพิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีแท่งหนึ่ง ซึ่งยาว L กว้าง W และหนา d ถูกนำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันความต่างศักย์ V_X โวลต์ ทำให้เกิดกระแส J_X ไหลในทิศ +X และให้สนามไฟฟ้า B_Z ตัดผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศ Z โดยตั้งฉากกับทิศของกระแสดังรูปที่ 2.9



รูป 2.9 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

โฮลพาหะส่วนมาก ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าบวกในแท่งสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า E_X จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_X ในทิศทาง +X และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_Z ตัดผ่านโดยมีทิศตั้งฉากกับกระแส จะเกิดมีแรงลอเรนซ์(Lorentz force) กระทำต่อโฮลโดย

$$\overrightarrow{F_L} = q\vec{v} \times \vec{B} \tag{2.50}$$

ซึ่ง $\overrightarrow{F_L}$ คือแรงลอเรนซ์และมีขนาดเป็น

$$|F| = qv_X B_Z \tag{2.51}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศของแรงลอเรนซ์คือ –y ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาทางแกน –y และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำด้านตรงข้ามจึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้นทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน E_y มีทิศ +y สนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในสภาวะสมดุลและ Steady state ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศทาง +x ได้ แสดงว่าแรงลอเรนซ์(F_Y) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน qE_y มีค่าเท่ากัน หรือ

$$F = qE_y = F_L = qv_X B_Z \qquad (2.52)$$

หรือ $$qE_y = qv_X B_Z \qquad (2.53)$$

จาก $J_X = pqv_X$ หรือ $v_X = \frac{J_X}{pq}$

เมื่อแทนค่า V_X ลงในสมการที่ (2.4) จะได้ว่า

$$E_Y = \frac{J_X B_Z}{pq} \qquad (2.54)$$

ดังนั้น $$\frac{E_y}{J_X B_Z} = \frac{1}{pq} = R_H \qquad (2.55)$$

โดย R_H คือ “สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)”

จาก $$V_y = V_H = E_y.W \qquad (2.56)$$

โดย V_H คือ “แรงดันฮอลล์ (Hall voltage)” หรือ คือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำเมื่อแทนค่า $J_X = \frac{I}{Wd}$ และ $E_y = \frac{V_H}{W}$ ลงในลงสมการที่ (2.55) จะทำให้ได้

$$R_H = \frac{V_H.d}{I.B_Z} = \frac{1}{pq} \qquad (2.57)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = p_0 = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_X B_Z}{qd.V_H} \qquad (2.58)$$

และ

สภาพต้านทานไฟฟ้า $$\rho = R\frac{Wd}{L} = \frac{V \times Wd}{I_X L} \qquad (2.59)$$

โดย R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสาร(โอห์ม)

และ $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{pq\mu_p}$ ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_p = \frac{1}{\rho.p.q} = \frac{1}{\rho} R_H \qquad (2.60)$$

จากสมการที่ (2.58), (2.59)และ (2.60) จะเห็นได้ว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้เราวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำคือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) และสภาพคล่อง (μ_p)ของพาหะได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้แล้วจากสมการที่ (2.60) โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) และสภาพต้านทานที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพคล่องและค่าความหนาแน่นของพาหะที่อุณหภูมิต่างๆได้ซึ่งข้อมูลนี้มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆของสารกึ่งตัวนำ

ในทำนองเดียวกันในกรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์จะมีค่าเป็นลบ (-) คือ $R_{H(electron)} = -\frac{1}{nq}$ โดยเฉพาะแรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารชนิดพีคือมีค่าเป็นลบด้วย ดังนั้นการวัดแรงดันของฮอลล์ทำให้เราสามารถบ่งชี้ชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้อีกด้วย

นอกจากนี้แล้วในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้มีการพิจารณาผลของการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะ หรือ พาหะกับแลททีส ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงไม่ถูกต้องค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะจะได้ว่า

$$R_{H(bump)} = 1.18 R_H \qquad (2.61)$$

และ

$$\mu_{P(bump)} = 1.18 \mu_P \qquad (2.62)$$

2.4 คุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์

การนำอุปกรณ์เซนเซอร์ไปใช้งานโดยทั่ว ๆ ไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติ (Ambient Condition Allowed) เช่น ใช้ที่อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดันเท่าไร เพื่อทำให้เราสามารถนำเซนเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซ็นเซอร์ทั่ว ๆ ไป ค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

1. ย่านวัด (Range) เป็นการจำกัดค่าอินพุทและเอาท์ของเซ็นเซอร์ในการใช้งาน เช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้กับความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสด้านเอาท์พุท อยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

2. ความผิดพลาด (Error) เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติ ดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัดและค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า "ความผิดพลาด" ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าความผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (Uncertainly) รวมอยู่ด้วยเสมอ

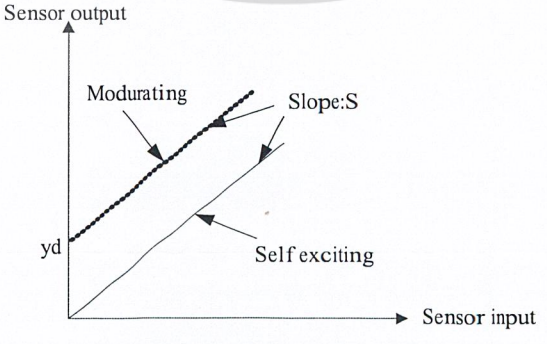
3. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ในการวัดค่าความแม่นยำและค่าความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรงจะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึง สามารถวัดได้ละเอียด (Sharp definition) อุปกรณ์ในการวัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง มันมีสเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้เราสามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือมีความตรงกันของค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึงความคงเส้นคงวา (Consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (Repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงสูง หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงต่ำ

4. ความไว (Sensitivity) หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาท์พุทหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุทหรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น $0.5\Omega/^{\circ}C$ เป็นต้น

ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ค่าความไวที่มีการไบอัสด้วยกระแสสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$S = \frac{V_H}{IB} = \frac{R_H G}{t} = \frac{GR}{qnt}$$

5. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) บ่อยครั้งที่เราถือว่า ความแม่นยำ ก็คือความเป็นเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงค่าที่วัดได้ว่ามีการวางตัวเป็นอย่างไรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้นและเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมากแต่มีความเอียง (Bias) มีความชัน (Slope) หรือ ออฟเซ็ท (Offset) จากค่าที่ถูกกำหนด

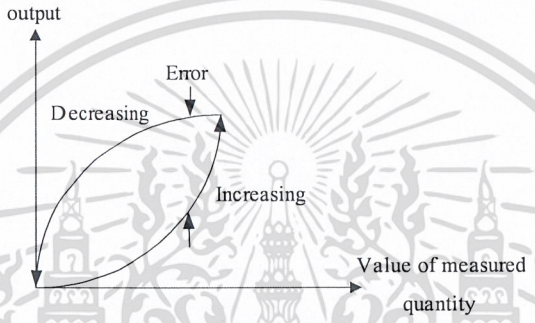


รูป 2.10 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของ Ideal sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ความมีเสถียรภาพ (Stability) ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณอินพุทเดิม เมื่อใช้สัญญาณอินพุทที่คงที่แม้ว่าเวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า "การลื่นไหล (drift)" มักจะถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การลื่นไหลอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การลื่นไหลเป็นศูนย์ (Zero drift) จะถูกนำมาใช้กับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาท์พุท เมื่ออินพุทมีค่าเป็น ศูนย์

7. ฮิสเตอร์รีซีส (Hysteresis) การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮีสเตอร์รีซีส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด



รูป 2.11 ฮีสเตอร์รีซีส

8. การแยกชัด (Resolution or Discrimination) บอกถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็ก ๆ ของปริมาณที่ถูกวัด

9. ออฟเซ็ท (Offset) เป็นค่าเอาท์พุทของเซ็นเซอร์ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้องหรือที่สัญญาณอินพุทเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ ค่าออฟเซ็ทจะหมายถึงค่าแรงดันฮออล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Split-drain magnetic field-effect transistor (MAGFET)

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กส่วนมากใช้หลักการจากผลของแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ต่อพาหะในโลหะ สารกึ่งตัวนำ ฉนวน หรือในสารประเภทอื่นๆ

ซึ่งในสารกึ่งตัวนำจะเกิดปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติก (galvanomagnetic effect) เช่น แรงดันฮอลล์ (Hall voltage) การเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) หรือความต้านทานแม่เหล็ก เป็นต้น เหล่านี้เนื่องมาจากการกระทำของแรงลอเรนซ์บนประจุพาหะ (อิเล็กตรอน หรือ โฮล) เช่นในวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขนาดของ sensor effect ถูกควบคุมโดยผลคูณของสภาพคล่องของอิเล็กตรอน (electron mobility) และขนาดของสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำผ่าน ซึ่งถ้าสภาพคล่องสูงก็จะทำให้ความไว (sensitivity) สูงไปด้วยถ้าเปรียบเทียบระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับ วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพีแล้ว ค่าสภาพคล่องของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีค่ามากกว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กมากกว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพี

จากปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติก (galvanomagnetic effect) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ มอสเฟท (MOSFET) เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (magnetic field sensor)ได้เนื่องจากว่าเมื่อจ่ายไบแอสให้มอสเฟทให้เกิดช่องทางเดินกระแส(channel) ช่องทางเดินของกระแสนี้เองที่สามารถเปรียบได้กับแผ่นสารกึ่งตัวนำบางๆ เช่น ถ้าเป็นมอสเฟทแบบเอ็นแชนแนล ก็จะเปรียบได้กับแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เมื่อเราต้องการผลจากการตรวจจับสนามแม่เหล็กออกมาในรูปของกระแสโดยใช้มอสเฟทก็สามารถทำได้โดยการแยกส่วนเดรน (split-drain) ของมอสเฟทออกเป็น2ส่วนที่สมมาตรกัน ซึ่งถูกเรียกว่า “ Split-drain magnetic field effect transistor (MAGFET) ”

2.5.1 หลักการทำงาน

เมื่อเดรนของมอสเฟทถูกแยกออกเป็นสองส่วนที่สมมาตรกันแล้ว เมื่อมีสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับชั้นการกลับ (inversion layer) ของแมกเฟท (MAGFET) จะทำให้เกิดความไม่สมดุลกันของกระแสระหว่างเดรนทั้งสองโดยแรงลอเรนซ์ (lorentz force) จะไปรบกวนการกระจายตัวของประจุค้างเหนี่ยวนำ (inversion charge) ตามแนวแชนแนลประจุจะถูกกวาดไปด้านข้างตามทิศทางของแรงลอเรนซ์ความแตกต่างระหว่างกระแสเดรนทั้งสองคือ $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ความไวของแมกเฟท (sensitivity) ถูกนิยามโดยอัตราส่วนของความแตกต่างของกระแสเดรนทั้งสอง ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \left| \frac{\Delta I_D}{I_D B} \right| \tag{2.63}$$

เมื่อ

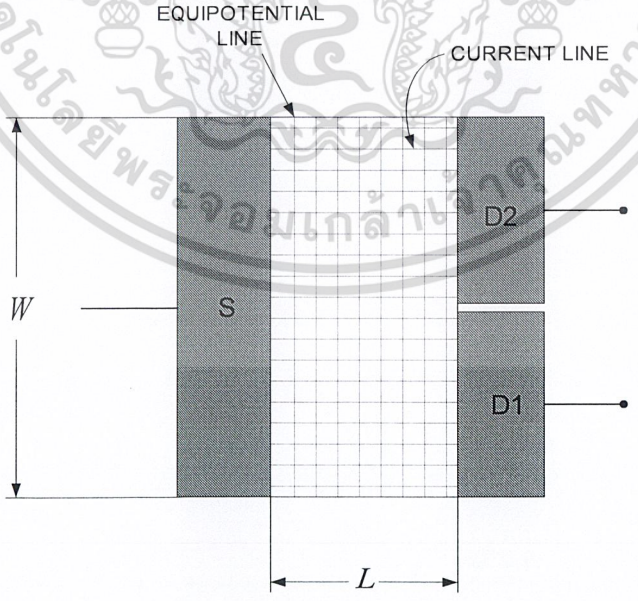
ΔI_D คือ ความแตกต่างของกระแสระหว่างเดรนทั้ง 2

I_D คือ กระแสรวมระหว่างเดรนทั้ง 2 ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก

B คือ สนามแม่เหล็ก

เนื่องจากผลที่ได้จากการตรวจจับอยู่ในรูปของกระแส ดังนั้นการประยุกต์ปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติก เพื่อที่จะให้เกิดผลต่างของกระแสระหว่างเดรนมีค่าเปลี่ยนแปลงมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก หรือมีความไวมากนั่นเอง ซึ่งการที่จะทำให้เห็นผลความแตกต่างของกระแสได้ชัดขึ้น ก็ต้องทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะมากพอ ดังนั้นจากการประยุกต์ปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติก จะเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะได้ดีก็ต่อเมื่อเส้นทางเดินของกระแสหรือแชนแนล ของมอสเฟทมีค่าสั้นๆ จึงสามารถใช้หลักการของปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติกำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำบางๆที่กว้างมากๆมาอธิบายได้ดังนี้

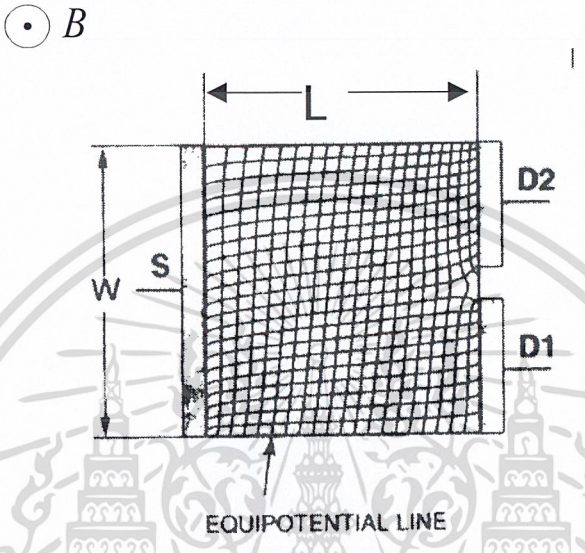
ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแชนแนล แสดงดังรูปที่1 แมกเฟทก็จะทำงานเป็น มอสเฟทธรรมดาๆตัวหนึ่ง โดยที่กระแสระหว่างเดรนทั้งสองจะมีค่าเท่ากันจะได้ $\Delta I_D = 0$ ในรูปที่2.12 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของเส้นกระแส และเส้นแรงดันสมมูล



รูป 2.12 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของเส้นกระแส และเส้นแรงดันสมมูล ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแชนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้สนามแม่เหล็ก $\bar{B}$ ตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับแชนแนลของมอสเฟท ที่มีความกว้างของแชนแนล (W) มีค่ามากกว่าความยาวของแชนแนล (L) จะมีผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของเส้นกระแสซึ่งเป็นผลมาจากประจุได้รับแรงกระทำจากแรงลอเรนซ์ สามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่2.13



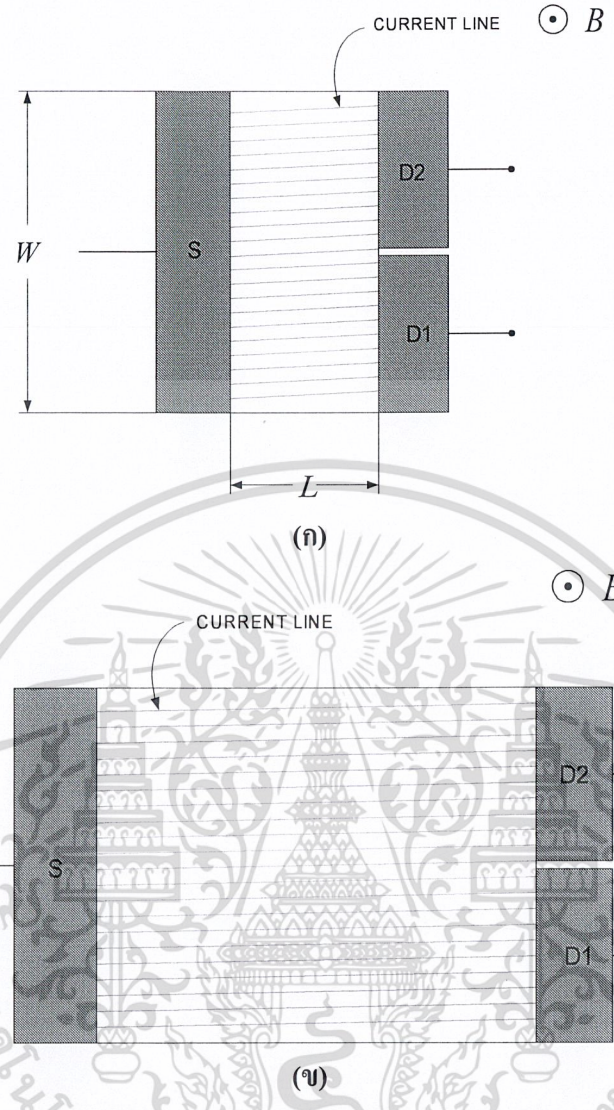
รูป 2.13 แสดงการกระจายตัวของเส้นศักย์ดาสมมูลและความหนาแน่นของเส้นกระแส ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับระนาบของภาพ

เมื่อความกว้างของแชนแนลมีค่ามากๆ จะประมาณได้ว่าสนามไฟฟ้าของฮอลล์มีค่าเป็นศูนย์ $(E_y = 0)$ ภายใต้กรณีดังกล่าวนี้ค่า J_{nx} จากสมการ(2.31) จะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของเส้นกระแสเป็นไปตามอัตราส่วนของ

$$\frac{-J_{ny}}{J_{nx}} = \tan\theta_L = \mu_n{}^* B \qquad (2.64)$$

โดย θ_L คือ มุมการเบี่ยงเบนของเส้นกระแส เรียกว่า “มุมลอเรนซ์” (Lorentz angle) การเปลี่ยนแปลงความยาวของแชนแนล (L) จะมีผลต่อมุมการเบี่ยงเบนของเส้นกระแส ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

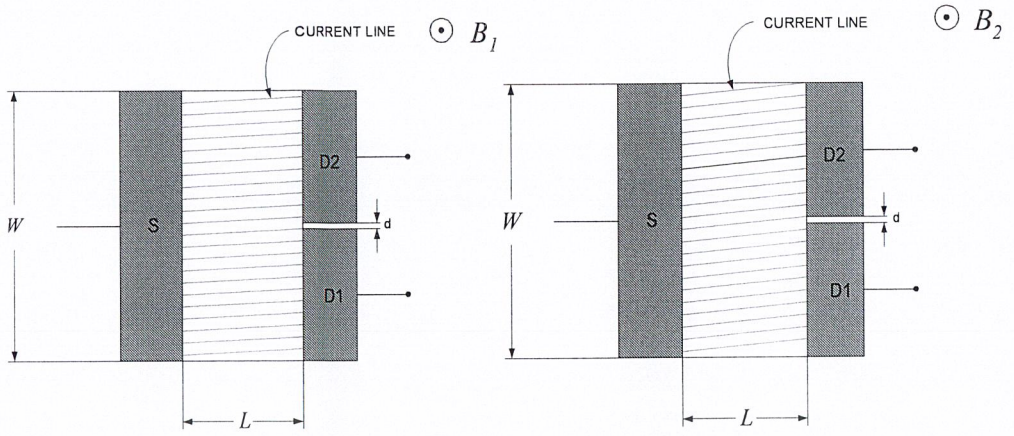


รูป2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมการเบี่ยงเบนของเส้นกระแส(มุมลอเรนซ์) เมื่อมีเปลี่ยนแปลงความยาวของแชนแนล (L)

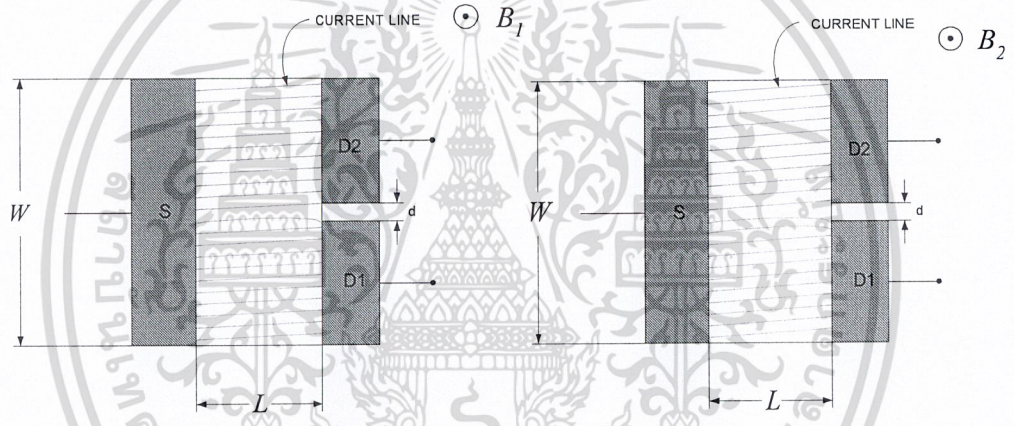
จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ถ้าความยาวของแชนแนลมีค่ามากๆ มุมลอเรนซ์จะแคบลง นั่นก็คือการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นน้อย ซึ่งถ้าความยาวของแชนแนลมีค่ามากๆ จะประมาณได้ว่าเส้นกระแสเป็นเส้นตรง ขนานกับแนวยาวของแชนแนล

ในการแยกส่วนเดรนออกเป็น2ส่วนที่สมมาตรกันนั้นจะมีระยะห่างระหว่างเดรนทั้งสองคือ d เกิดขึ้นซึ่งค่า d ที่มีค่าต่างกันจะมีผลต่อความไวของแมกเฟท แสดงให้เห็นดังรูปที่2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูป 2.15 เปรียบเทียบความแตกต่างของระยะห่างระหว่างเดรน(d) เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น

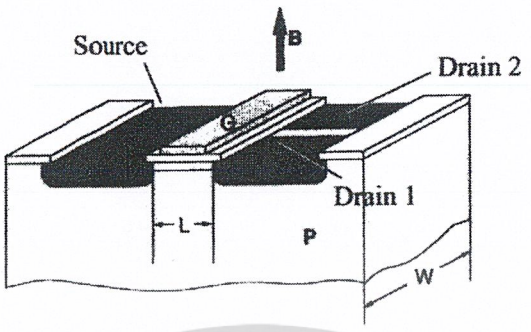
(ก) d แคบๆ และสนามแม่เหล็กของรูปด้านขวามีค่ามากกว่าด้านซ้าย

(ข) d กว้างขึ้นและสนามแม่เหล็กของรูปด้านขวามีค่ามากกว่าด้านซ้าย

เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเดรนทั้งสอง (d) แล้วจะเห็นว่า เมื่อ d แคบๆหากมีการเบี่ยงเบนของพาหะเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ ΔI_D เพิ่มขึ้น นั่นก็คือเมื่อ θ_L เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อันเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ ΔI_D เปลี่ยนแปลงไปแล้ว แต่ในขณะเดียวกันหาก d กว้างๆ เมื่อมีการเบี่ยงเบนของพาหะเท่ากันกับกรณี d แคบๆ แต่ผลที่ได้คือ ΔI_D ก็ยังไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าของ d ก็จะมีผลต่อความไวของแมกเฟทด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการที่กล่าวมาจะได้โครงสร้างของ แมกเฟท แสดงดังรูปที่2.16



รูป 2.16 แสดงโครงสร้างของ แมกเฟท

ความแตกต่างของกระแสระหว่างเดรนทั้งสอง $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$ วิเคราะห์ได้ด้วยสมการที่ (2.37) ในย่านลิเนียร์ของมอสเฟท แรงดันที่เดรนทั้ง 2 จะมีค่าเท่ากัน ความแตกต่างที่เดรนทั้งสองคือ

$$\Delta I_D = G\mu_{nch}{}^* \left(\frac{L}{W}\right) BI_D \tag{2.65}$$

เมื่อ

$\mu_{nch}{}^*$ คือ สภาพคล่องของฮอลล์ (Hall mobility)

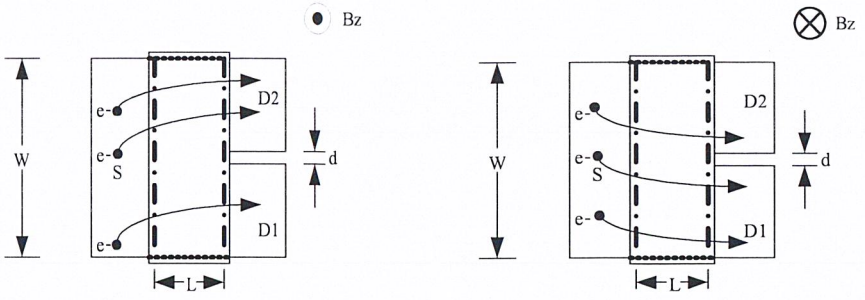
G เป็น geometric correction factor ของอุปกรณ์

ดังนั้นความไวของ แมกเฟทคือ

$$S = G\mu_{nch}{}^* \frac{L}{W} \tag{2.66}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับแชนแนล แต่มีทิศ +z และทิศ –z ผลที่ได้แสดงดัง รูปที่2.17



รูป 2.17 แบบจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กในทิศต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและการสร้าง

3.1 หลักการออกแบบ

หลักการของ split-drain MAGFET นั้น ได้นำเอาประโยชน์จากปรากฏการณ์กัลป์วานอแมกเนติก (galvanomagnetic effect) มาประยุกต์ใช้ คือ เมื่อเดรนของมอสเฟทถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน หากมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านมอสเฟทในแนวตั้งฉากกับระนาบของช่องทางเดินกระแส จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสระหว่างเดรนทั้งสอง ซึ่งก็ คือ เกิดการเบี่ยงเบนของทางเดินของพาหะนั่นเอง การเบี่ยงเบนนี้จะเกิดขึ้นได้ดีก็ต่อเมื่อความหนาแน่นกระแสในทิศทางตามขวางกับช่องทางเดินกระแส มีค่ามากกว่าความหนาแน่นกระแสในทิศทางตามช่องทางเดินกระแสซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ ความกว้าง W มีค่ามากว่าความยาว L ของช่องทางเดินกระแส การทำงานในเงื่อนไขนี้ คือ การทำงานในโหมดกระแสลอเรนซ์ (Lorentz current mode of operation)

การเบี่ยงเบนของพาหะ จะมีมุมการเบี่ยงเบนเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\theta_L = \arctan\left(\mu_{nch}{}^{*} B\right)$$

ซึ่งหากต้องการให้ θ_L มาก คือ มีการเบี่ยงเบนของแนวทางเดินของพาหะมากสามารถพิจารณาได้โดยค่า $\mu_{nch}{}^{*}$ โดยที่ $\mu_{nch}{}^{*} = r_{nch}\mu_{nch}$ ซึ่งก็จะต้องให้ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะมีค่าน้อย ๆ

ความไวของ split-drain MAGFET คือ อัตราส่วนของความแตกต่างของกระแสระหว่างเดรนภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังนี้

$$S = \frac{\left|\Delta I_D\right|}{\left|I_D B\right|}$$

เมื่อ

ΔI_D คือ ความแตกต่างของกระแสระหว่างเดรนทั้ง 2

I_D คือ กระแสรวมระหว่างเดรนทั้ง 2 ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก

B คือ สนามแม่เหล็ก

$$\Delta I_D = G\mu_{nch}{}^{*}\left(\frac{L}{W}\right)BI_D$$

เมื่อ

$\mu_{nch}{}^{*}$ คือ สภาพคล่องของฮอลล์ (Hall mobility)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G เป็น geometric correction factor ของอุปกรณ์

ดังนั้นจะได้

$$S = G\mu_{nch}{}^{*}\frac{L}{W}$$

ซึ่งในการใช้งาน split-drain MAGFET เมื่อพิจารณาถึงแฟคเตอร์ G แล้ว ในกรณีที่ L มีค่ามาก ๆ กระแสที่ไหลระหว่างขั้วเดรนและซอส จะประมาณเป็นแนวเส้นตรงทำให้ไม่มีผลต่อแรงดันฮอลล์หรืออาจมีผลน้อยมาก ดังนั้นหากเราออกแบบให้ความยาว L มีค่ามาก ๆ จะทำให้ไม่มีการเบี่ยงเบนของเส้นทางเดินของพาหะหรือมีการเบี่ยงเบนน้อยมาก ผลที่ตามมาก็คือ ΔI_D มีค่าน้อย ความไวก็จะต่ำตามไปด้วย

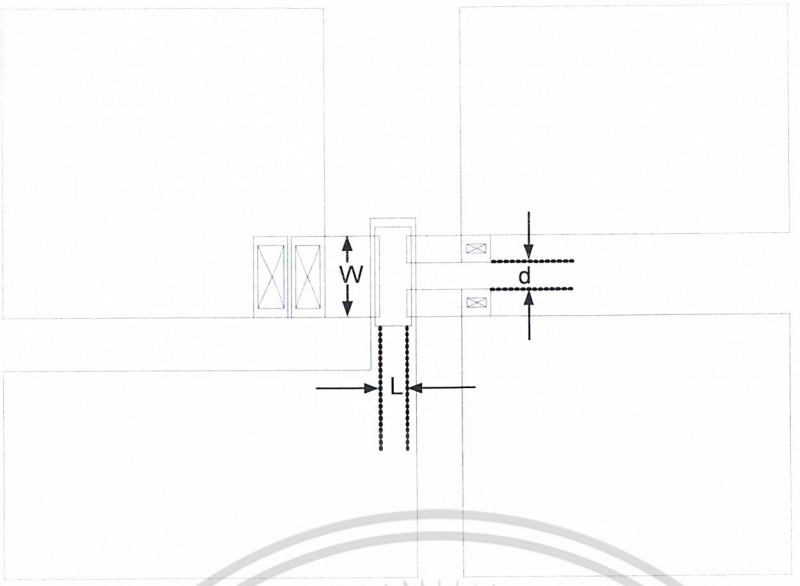
อีกอย่างหนึ่งก็คือ ระยะห่างระหว่างเดรน(d) เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีจะเห็นว่า เมื่อ d แคบๆ หากมีการเบี่ยงเบนของพาหะเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ ΔI_D เพิ่มขึ้น นั่นก็คือเมื่อ θ_L เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อันเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ ΔI_D เปลี่ยนแปลงไปแล้ว แต่ในขณะเดียวกันหาก d กว้างๆ เมื่อมีการเบี่ยงเบนของพาหะเท่ากันกับกรณี d แคบๆ แต่ผลที่ได้คือ ΔI_D ก็ยังไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าของ d ก็จะมีผลต่อความไวของแมกเฟทด้วย ดังนั้นค่า d ต้องแคบมาก จึงจะเห็นความแตกต่างของกระแสได้ดี

ดังนั้นในการออกแบบแมกเฟทเพื่อที่จะให้มีความไวสูง จะต้องพิจารณาถึงค่าของ W และค่าของ L ที่เหมาะสม เพื่อให้การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นได้ดี และค่าระยะห่างระหว่างเดรน (d) ต้องแคบๆเพื่อว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ เพียงเล็กน้อยก็ทำให้ ΔI_D เปลี่ยนแปลงได้แล้ว

3.2 กระบวนการสร้าง MAGFET Sensors

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบค่า parameter ต่างๆของตัวอุปกรณ์โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า parameter เช่น ความกว้าง(W) ความยาว(L) ของแชลแนล และ ค่าระยะห่างระหว่างเดรนทั้งสอง(d)ให้มีค่าต่างกันเพื่อจะทำการวัดถึงคุณสมบัติในการใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบกัน และได้ทำการเขียนแบบลงบนแผ่นไมล่าร์ลามิเนตตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ และทำการถ่ายแบบย่อลงบนกระจกต้นแบบ(Photo mask) ซึ่งได้กระจกต้นแบบทั้งหมดห้าชิ้นด้วยกันซึ่งเมื่อทำการถ่ายแบบลงบนชิ้นสารกึ่งตัวนำครบทั้งห้าชิ้นแล้วจะได้ภาพ Top view ดังรูปที่ 3.1 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.1 แสดง Top view ของมาส์กรวม

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสร้าง MAGFET 4 ตัวโดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่า parameter ต่าง ๆ ดังนี้

MAGFET ตัวที่ 1 $W = 110\ \mu m$, $L = 110\ \mu m$, $d = 10\ \mu m$

MAGFET ตัวที่ 2 $W = 190\ \mu m$, $L = 110\ \mu m$, $d = 10\ \mu m$

MAGFET ตัวที่ 3 $W = 190\ \mu m$, $L = 60\ \mu m$, $d = 10\ \mu m$

MAGFET ตัวที่ 4 $W = 190\ \mu m$, $L = 60\ \mu m$, $d = 30\ \mu m$

โดยอุปกรณ์ตัวที่ใช้เปรียบเทียบผลที่มีต่อการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้แก่

MAGFET ตัวที่ 3 กับ MAGFET ตัวที่ 4 จะใช้เปรียบเทียบผลของ d

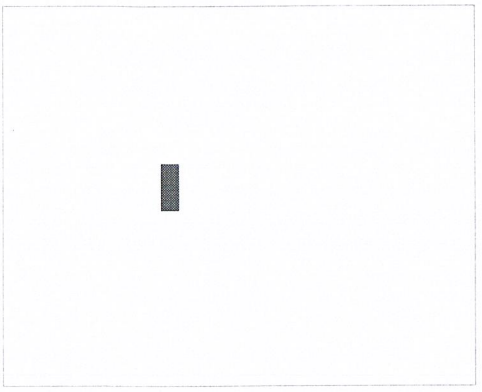
MAGFET ตัวที่ 1 กับ MAGFET ตัวที่ 2 จะใช้เปรียบเทียบผลของ W

MAGFET ตัวที่ 2 กับ MAGFET ตัวที่ 3 จะใช้เปรียบเทียบผลของ L

และลวดลายของกระจกต้นแบบทั้งห้าชิ้นจะถูกนำมาใช้ในแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกันตามลำดับขั้นของกระบวนการสร้างดังนี้โดย

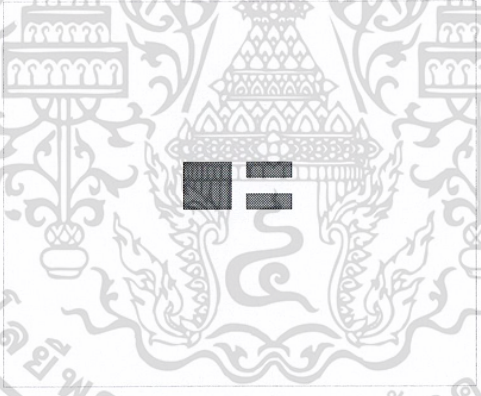
1. Body Mask เป็นกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นชิ้นแรกเพื่อทำการเปิดชั้นของออกไซด์ออกแล้วทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็น และ เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับส่วนซอสด้วยซึ่งได้รูปร่างของมาส์กชิ้นที่หนึ่งดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.2 mask#1 (Body mask)

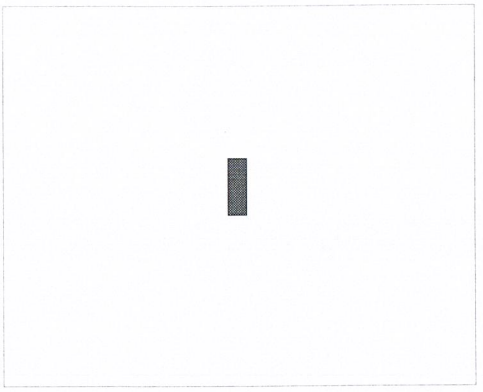
2. Source , Drain Maskเป็นกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นชิ้นที่สอง จะใช้เพื่อทำการเปิดชั้นของออกไซด์ออกแล้วทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิดพี ลงไปเพื่อสร้างเป็นส่วนซอส และเดรน จะเห็นได้ว่าจะมีส่วนของเดรนที่เป็นแยกออกสองส่วนเป็นเดรนหนึ่ง และเดรนสอง ซึ่งจะต่างกับมอสเฟททั่ว ๆ ไปนิดเดียวซึ่งได้รูปร่างของมาส์กชิ้นที่สองดังรูปที่ 3.3



รูป 3.3 mask#2 (Source , Drain Mask)

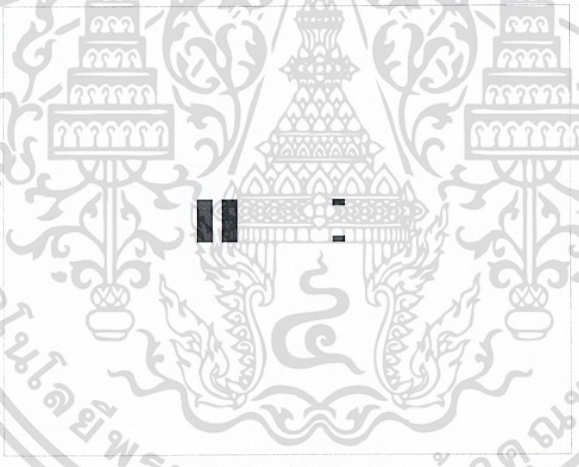
3. Gate Mask เป็นกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นชิ้นที่สาม จะใช้ในการเปิดชั้นออกไซด์เพื่อที่จะทำการสร้างส่วนที่เป็นเกทของตัวอุปกรณ์ซึ่งได้รูปร่างของมาส์กชิ้นที่สามดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.4 mask#3 (Gate Mask)

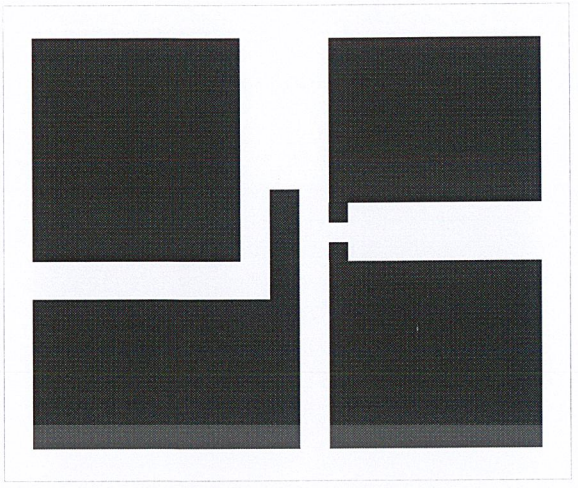
4. Contact Mask เป็นกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นชิ้นที่สี่จะใช้ในการเปิดชั้นออกไซด์เพื่อที่จะทำการสร้างขั้วสัมผัสโอห์มิกระหว่างโลหะ(อลูมิเนียม) กับสารกึ่งตัวนำ(ซิลิคอน) ต่อเป็นขั้วไฟฟ้าหรือจุดเชื่อมต่อระหว่างสิ่งประดิษฐ์ในวงจรรวม ซึ่งได้รูปร่างของมาร์คชิ้นที่สี่ดังรูปที่ 3.5



รูป 3.5 mask#4 (Contact Mask)

5. Metal Mask เป็นกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นชิ้นที่ห้าชิ้นสุดท้ายสำหรับกระบวนการเมตัลไลเซชั่น(Metallization)เพื่อสกัดชั้นของอลูมิเนียมบางส่วนที่เคลือบผิวหน้าของอุปกรณ์ให้เหลือเฉพาะส่วนที่จะเป็นขั้วไฟฟ้า หรือส่วนที่จะเป็นแถบตัวนำที่เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สร้างเสร็จแล้วเข้าด้วยกันเป็นวงจรไฟฟ้าที่สมบูรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งการเชื่อมต่อลักษณะนี้เรียกว่า “การเชื่อมต่อภายใน” หรือ Interconnection ซึ่งได้รูปร่างของมาส์กชิ้นที่ห้าดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.6 mask#5 (Metal Mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การสร้างตัวอุปกรณ์ MAGFET

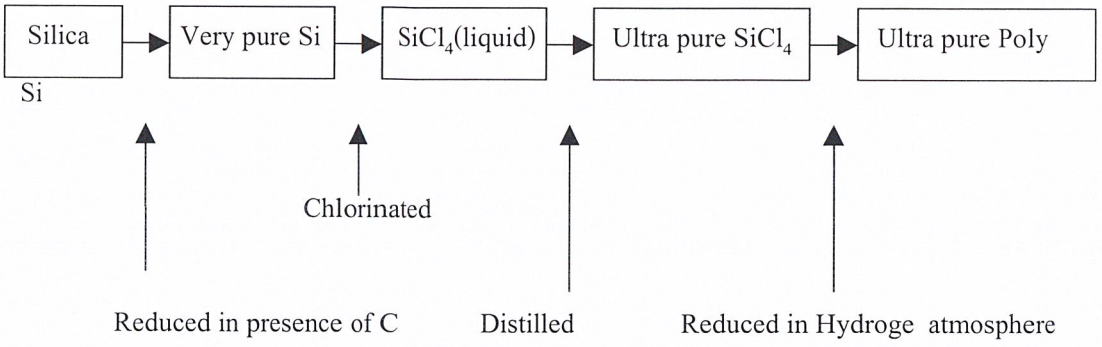
4.1 การเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน

4.1.1 แร่ซิลิคอนบริสุทธิ์

ธาตุซิลิคอนจัดไว้ว่าเป็นแร่ธาตุที่มีอยู่อย่างมากมาย และอุดมสมบูรณ์โดยเฉพาะบริเวณเปลือกโลก อย่างไรก็ดีมักจะไม่ปรากฏในลักษณะที่เป็นแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ แต่จะอยู่ในสภาพของสารประกอบ เช่น ซิลิก้า (Silica) หรือก็คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ไม่บริสุทธิ์นัก หรืออาจจะอยู่ในรูปของซิลิเกท (Silicate) ซึ่งหมายถึง สารประกอบของซิลิคอน ออกซิเจน และธาตุอื่น ๆ ปะปนอยู่ ซึ่งแร่ดังกล่าวนี้ก็คือ ทรายนั่นเอง ดังนั้นการเตรียมแร่ซิลิคอนจึงทำได้โดยการสกัดจากทรายเพื่อให้ได้แร่ซิลิคอนที่บริสุทธิ์ ก่อนที่จะนำไปปลูกให้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ต่อไป

การแยกแร่ซิลิคอนออกจากทรายหรือสารซิลิก้า ทำได้โดยการนำซิลิก้าไปเผารวมกับคาร์บอน (C) ที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาไฟฟ้า ธาตุคาร์บอนจะทำหน้าที่ดึงออกซิเจนออกจากสารซิลิก้า จึงทำให้ได้แร่ซิลิคอน แต่จะไม่บริสุทธิ์นัก ซึ่งเรียกว่า "Low Grade Silicon" หรือบางครั้งก็เรียกว่า "เฟอร์โรซิลิคอน" (Ferosilicon) ในกระบวนการนี้เราเรียกว่า กระบวนการ "Reduced Silicondioxide" จากนั้นจึงนำเอา Low Grade Silicon หรือ ซิลิคอนบริสุทธิ์ต่ำ นี้ไปรวมหรือทำปฏิกิริยากับคลอรีน ซึ่งในทางปฏิบัติทำได้โดยใช้กรดเกลือ (HCl) เป็นตัวละลายซิลิคอน และจะทำให้ได้สารละลายที่เรียกว่า "ซิลิคอนเตทตราคลอไรด์" (Silicon tetrachloride) $SiCl_4$ หรือ $SiHCl_3$ ในสารละลายนี้จะมีเพียงธาตุซิลิคอนเท่านั้นที่ละลายอยู่ ดังนั้นเมื่อนำสารละลายนี้ไปทำการกลั่นก็จะได้สารละลายของซิลิคอนเตทตราคลอไรด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนสุดท้ายคือการนำสารละลายนี้ไปทำการแยกธาตุซิลิคอนโดยทำให้สารละลาสยร้อนจัด ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน จะทำให้ได้แร่ซิลิคอนที่บริสุทธิ์สูงมีสภาพเป็นของแข็ง แต่จะอยู่ในสภาพที่เป็นผลึกไม่สมบูรณ์ที่เรียกว่า โพลีซิลิคอน (Poly crystalline silicon) จำเป็นที่จะต้องนำไปปลูกให้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ซึ่งเรียกว่า ผลึกรูปเดี่ยว หรือ Single Crystalline จึงจะสามารถนำไปใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ได้ ลำดับขั้นตอนของกระบวนการแยกแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ อาจแสดงไว้ดังในแผนผังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.1 แสดงแผนผังของลำดับขั้นตอนการเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์

ปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการแยกแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์สูงสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1) $SiO_2 + C \longrightarrow Si + CO_2$

2) $Si + 2\ HCl \longrightarrow SiHCl_2 + H_2$

3) $Si\ HCl_3 + H_2 \longrightarrow Si$ (บริสุทธิ์สูง) $+ 3\ HCl$

4.1.2 การปลูกผลึกรูปเดี่ยว

ถึงแม้ว่าแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์สูง (Ultra pure) จะถูกสกัดมาได้แล้วก็ตาม แต่จะมีสภาพที่ไม่เป็นผลึก หรือในบางครั้งอาจจะมีลักษณะเป็นผลึกหลายรูป (Poly crystalline) ซึ่งเป็นผลึกที่ยังไม่สมบูรณ์ จึงยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ต้องนำไปผ่านกระบวนการปลูกผลึกเพื่อทำให้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ที่เรียกว่า ผลึกรูปเดี่ยว (Single Crystalline) ซึ่งเทคนิคที่ใช้สำหรับการปลูกผลึกรูปเดี่ยวในปัจจุบันนี้มี 2 วิธี

1. วิธีโชคราสสกี้ (Czochralski) หรือวิธีการดึง หรือ Pulling (เขียนย่อ ๆ เป็น CZ)

2. วิธี โฟลทโซน หรือ Float Zone (เขียนย่อ ๆ เป็น FZ)

วิธีการปลูกฝึกรูปเดี่ยวที่นิยมใช้กันมากที่สุดก็คือ วิธีแบบโชคราสสกี้ เพราะสามารถปลูกผลึกที่มีขนาดใหญ่ได้ จึงทำให้มีราคาถูก และใช้ในงานอุตสาหกรรมการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

4.1.3 การตัดเป็นแผ่นผลึกและการทำความสะอาดแผ่นผลึก

เมื่อได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวแล้ว จึงนำแท่งนี้ไปตัดออกเป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยใบเลื่อยชนิดพิเศษ ซึ่งเรียกว่า “Diamond-edged Saw” จะได้แผ่นผลึกที่เรียกว่า “เวเฟอร์” (Wafer) ซึ่งแผ่นผลึกจะมีความหนาราว 0.3 ถึง 0.5 มิลลิเมตร หรือ 300 – 500 ไมโครเมตร แผ่นผลึกที่ตัดได้จะต้องถูกนำมาขัดให้ผิวเรียบปราศจากรอยคมเลื่อย โดยใช้ผงขัดของ ซิลิคอนคาร์ไบร์ด

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้ผู้ใดนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

(SiC) ที่มีขนาดของผงขัดต่าง ๆ กัน และในขั้นตอนสุดท้ายจะใช้ ผงอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีความละเอียดมากทำการขัดเพื่อให้ผิวของแผ่นผลึกมีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยผิวของแผ่นผลึกจะสะท้อนเงาได้คล้ายกระจกเงา

ขนาดของผงขัด SiC เบอร์ต่าง ๆ ที่ใช้มีดังนี้คือ

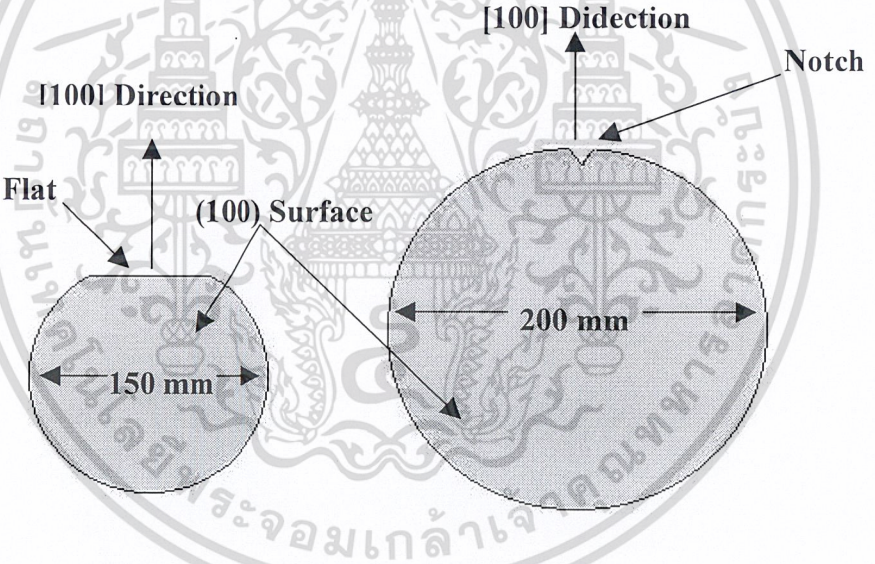
เบอร์ # 600 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 ไมโครเมตร

เบอร์ # 1000 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 ไมโครเมตร

เบอร์ # 2000 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.9 ไมโครเมตร

เบอร์ # 4000 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ไมโครเมตร

ขนาดของผงขัดอะลูมินา Alumina (Aluminum Oxide) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ ลักษณะของแผ่นผลึกซิลิคอนที่พร้อมจะนำไปใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะวงจรรวม แสดงได้ดังในรูปที่ 4.2



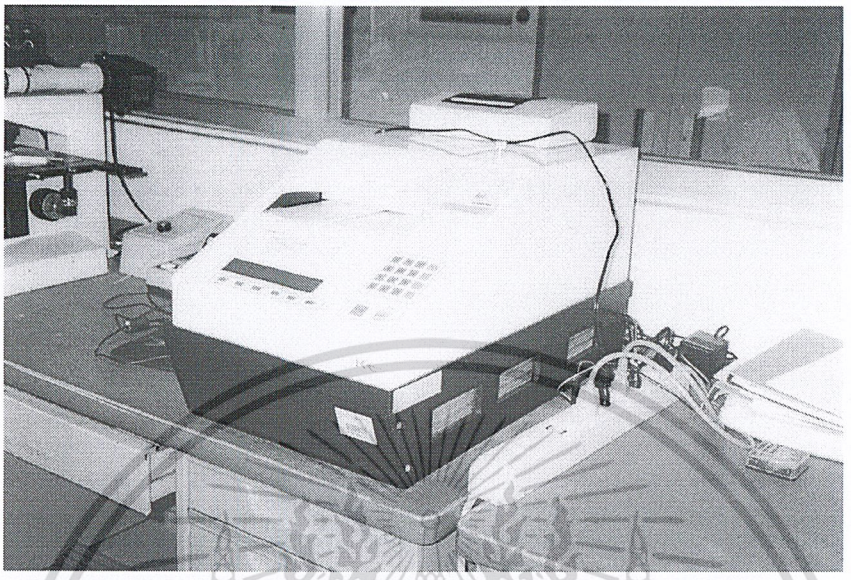
รูป 4.2 แสดงลักษณะของผลึกสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการตัดแท่งผลึก

4.1.4 การวัดค่าสภาพต้านทานหรือความต้านทานจำเพาะของผลึกสารกึ่งตัวนำ

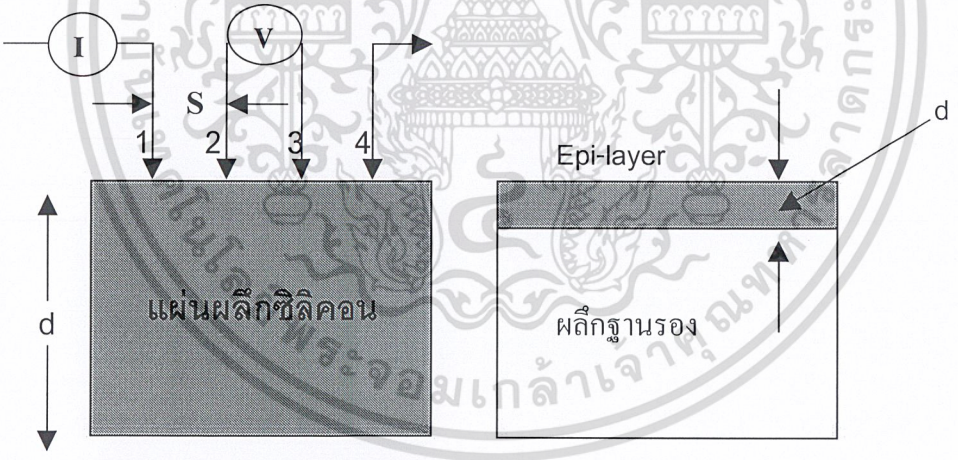
ในการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าหรือความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ของสารกึ่งตัวนำ นิยมใช้วิธีที่เรียกว่า Four Point Probe และรูป 4.3 แสดงรูปเครื่องมือที่อยู่ภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วัดหาค่าสภาพต้านทานของผลึกสารกึ่งตัวนำ สัญลักษณ์ของค่าสภาพต้านทานเขียนด้วย ρ (Rho) โดยการใช้เข็มโลหะที่มีปลายแหลม หรือที่เรียกว่า โพรบ (Probe) จำนวน 4 เข็มวางเรียงในแนวเดียวกัน และอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง S เท่าๆกันทำการกดลงไปบนแผ่นผลึกที่ต้องการวัด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และจ่ายค่ากระแสคงที่ I ให้กับเข็มโลหะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

1และ 4 แล้ววัดค่าของแรงดันที่ปรากฏ V ระหว่างเข็มที่ 1และ 2 นำค่าของกระแสและแรงดันที่วัดได้นี้ไปแทนในสมการที่ (4.1) เพื่อหาค่าสภาพต้านทานต่อไป



รูป 4.3 VR-70 Resistivity Test System



(ก) (ข)

รูป 4.4 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทาน(Resistivity)โดยวิธี Four Point Probe
(ก) กรณีที่แผ่นผลึกหนามาก (ข) กรณีการวัดชั้นผลึกบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$\rho = 2\pi S \frac{V}{I} \qquad (4.1)$$

ρ = ค่าสภาพต้านทาน (โอห์ม – เซนติเมตร)

S = ระยะห่างระหว่างเข็ม (เซนติเมตร)

V = แรงดันที่วัดได้ (โวลต์)

I = กระแสที่ป้อน (แอมแปร์)

ซึ่งสมการที่ (4.1)นี้สามารถใช้กับกรณีทั่วๆไปซึ่งแผ่นผลึกมีความหนา (d) มากกว่าระยะระหว่างเข็มโลหะ (S) แต่ในกรณีที่ความหนาของชั้นผลึกที่จะวัดมีค่าความหนา(d) น้อยกว่าระยะห่างระหว่างเข็มโลหะ (S) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) นิยมใช้สมการที่ 4.2 คือ

$$R_s = 4.53 \frac{V}{I} \qquad (4.2)$$

โดย R_s คือค่าแผ่นความต้านทาน หรือ Sheet resistance (Ω/พ.ท.)

และ $\rho = R_s \times$ ความหนาของชั้นที่จะวัด (d)

ดังนั้น $$\rho = R_s \times d \qquad (4.3)$$

สำหรับการคำนวณหาค่าความหนาแน่น (Concentration) ของพาหะ สามารถทำได้โดย

จาก $\rho_n = n.q\mu_e$ กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n – type

$\rho_p = p.q\mu_h$ กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p – type

$\rho_s = n.q\mu_{e+} p.q\mu_p$

$= n_i.q (\mu_{e+} \mu_h)$ กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด i – type

ซึ่ง n และ p คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ

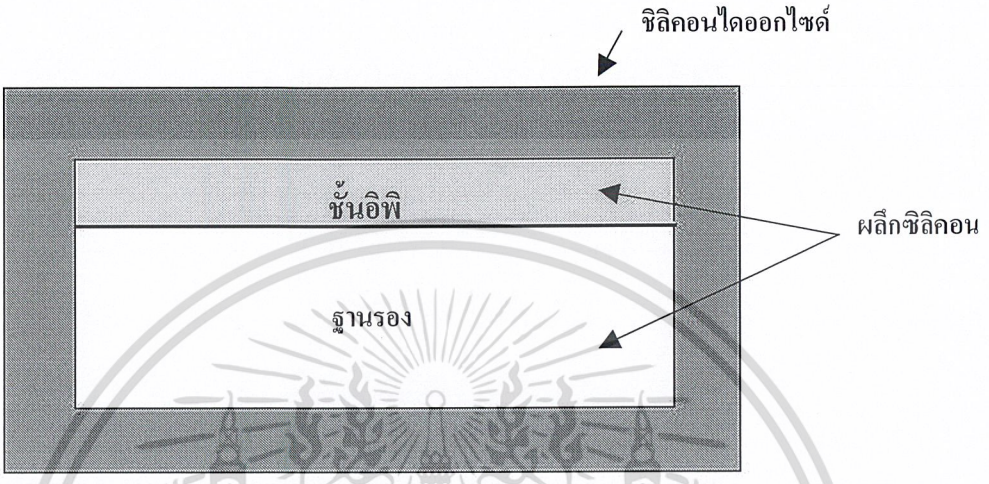
μ_e และ μ_h คือค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ

q คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กระบวนการออกซิเดชั่น (Oxidation Process)

หลังจากทำความสะอาดที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จึงนำแผ่นผลึกดังกล่าวมาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ขึ้นปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ดังรูปที่ 4.5



รูป 4.5 แสดงแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ผ่านขบวนการออกซิเดชั่นแล้ว

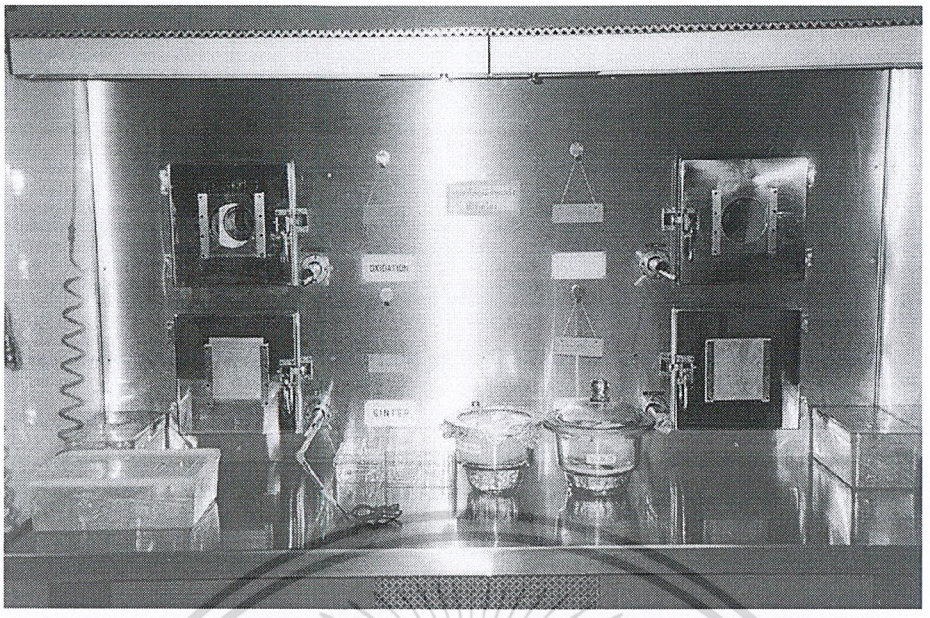
ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Sio_2) นี้จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี และยังใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยขบวนการ ออกซิเดชั่นด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำ ในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้

$$Si\ (\text{ของแข็ง}) + O_2\ (\text{แห้ง}) \xrightarrow{\text{อุณหภูมิ } 1100} SiO_2\ (\text{ของแข็ง}) \qquad (4.4)$$

$$Si + 2H_2O \xrightarrow{\text{อุณหภูมิ } 1100} SiO_2 + 2H_2 \qquad (4.5)$$

โดยเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชั่นแสดงได้ดังรูป 4.6 ซึ่งใช้ภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

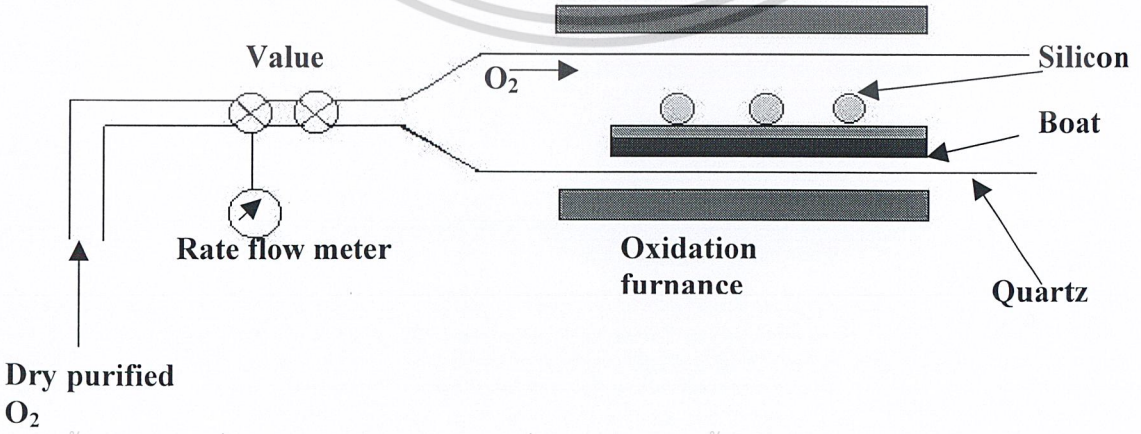


รูป 4.6 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการแพร่สารเจือและการสร้างชั้นออกไซด์

4.2.1 กระบวนการออกซิเดชั่นด้วยความร้อน (Thermal Oxidation)

การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยขบวนการดังกล่าวนี้ ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

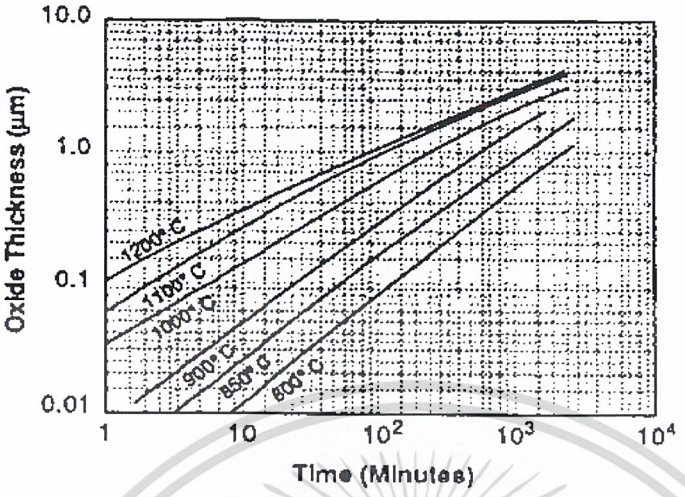
1. การออกซิเดชั่นแบบแห้ง (Dry Oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปน ที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 1100°C จะทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการ (4.4) ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกซิเดชั่นแบบนี้แสดงดังในรูปที่ 4.6 เตาที่ใช้ในการ Oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน (ผิดพลาด $\pm 0.5^{\circ}C$) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำ Dry Oxidation

ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้โดยวิธีดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีสำหรับความหนาของชั้น SiO_2 นี้สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.8



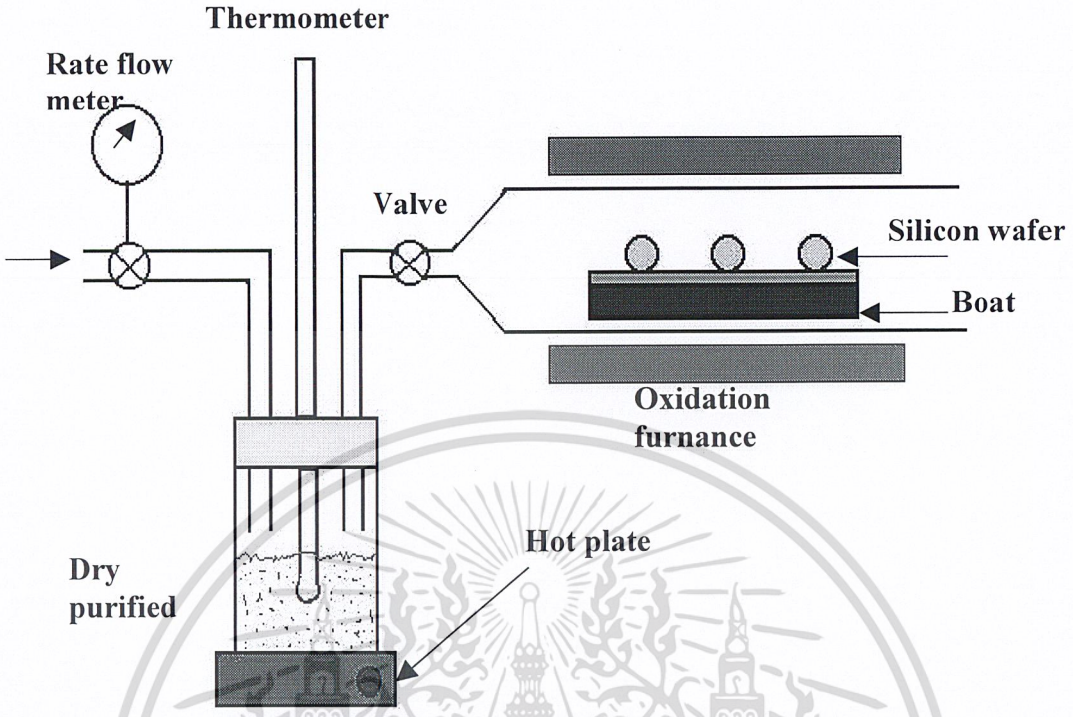
รูป 4.8 แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิคอนในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนแห้งในกระบวนการออกซิเดชั่นแบบแห้ง

2. การออกซิเดชั่นแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของ Si กับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้แสดงดังในสมการที่ (4.5) สำหรับการออกซิเดชั่นแบบชื้นนี้สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้คือ

1) ระบบไอน้ำ (Steam System) เป็นวิธีการปล่อยก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้ว (bubbler) ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนแต่มีค่าต่ำกว่าจุดเดือดราว 90-95^{o}C ท่อก๊าซออกซิเจนจะถูกจุ่มลงในน้ำบริสุทธิ์ซึ่งร้อน ทำให้เกิดฟองอากาศ ที่ผุดขึ้นมานี้ก็คือ ก๊าซออกซิเจนซึ่งอิ่มตัว (มีไอน้ำด้วย) และจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ ดังรูปที่ 4.9 ระยะห่างระหว่างทางออกของก๊าซในขวดแก้วและท่อควอทซ์ของเตาออกซิเดชั่นไม่ควรอยู่ไกลนัก เพราะอาจจะเกิดกรดกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำได้ ซึ่งควรหลีกเลี่ยงมิให้เกิดกรณีเช่นนี้ได้ วิธีการดังกล่าวนี้เป็นระบบที่ใช้ในศูนย์วิจัยอิเลคทรอนิคส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



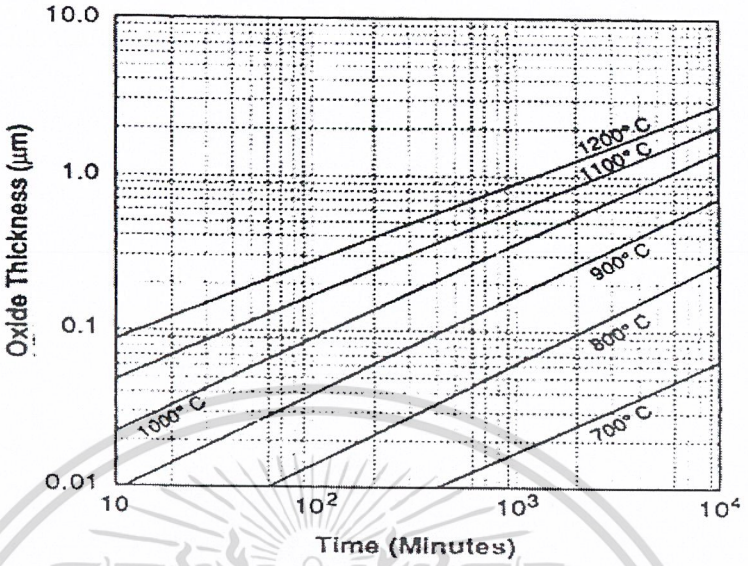
รูป 4.9 แสดงอุปกรณ์ระบบไอน้ำของขบวนการออกซิเดชั่นแบบชื้น

2) ระบบทอช (Torch System) เป็นวิธีการทำให้ก๊าซไฮโดรเจนสันดาปกับออกซิเจนอาจเรียกวิธีนี้ว่า การเผาไฮโดรเจน (burnt hydrogen) โดยไอน้ำจะเกิดขึ้นเมื่อไฮโดรเจนได้รับความร้อนในบรรยากาศซึ่งมีออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกปล่อยผ่านท่อเข้าไปในท่อควอทซ์ของเตา ข้อควรระมัดระวังก็คือ ต้องควบคุมปริมาณของไฮโดรเจนให้ถูกต้องเหมาะสม มิฉะนั้นอาจเกิดการระเบิดขึ้นได้ ถ้าหากปริมาณของไฮโดรเจนมากเกินไป

3) ระบบแฟลช (Flash system) เป็นวิธีการหยดน้ำบริสุทธิ์ลงไปในขวดแก้วซึ่งถูกทำให้ร้อน ทำให้น้ำกลายเป็นไอและถูกก๊าซออกซิเจน หรือไนโตรเจน ซึ่งไหลผ่านขวดแก้วนี้พัดพาออกไปจากขวดแก้ว ไหลเข้าไปยังท่อควอทซ์ของเตาออกซิเดชั่น

สำหรับความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากการออกซิเดชั่นแบบชื้น ซึ่งจะสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ แสดงดังในรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.10 แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิกอนในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำในกระบวนการออกซิเดชั่นแบบชื้น

ขบวนการออกซิเดชั่นแบบชื้นนี้ จะทำให้เกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้งทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชั่นแบบชื้นนี้ก็คือ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่เลวกว่าแบบแห้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ชั้น SiO_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบแห้งจะมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้น จึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือได้ดีกว่า แต่เนื่องจากการออกซิเดชั่นแบบชื้น จะทำให้สภาพผิวของผลึกไม่สมบูรณ์ คือ เกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) เกิดรูพรุนขึ้น

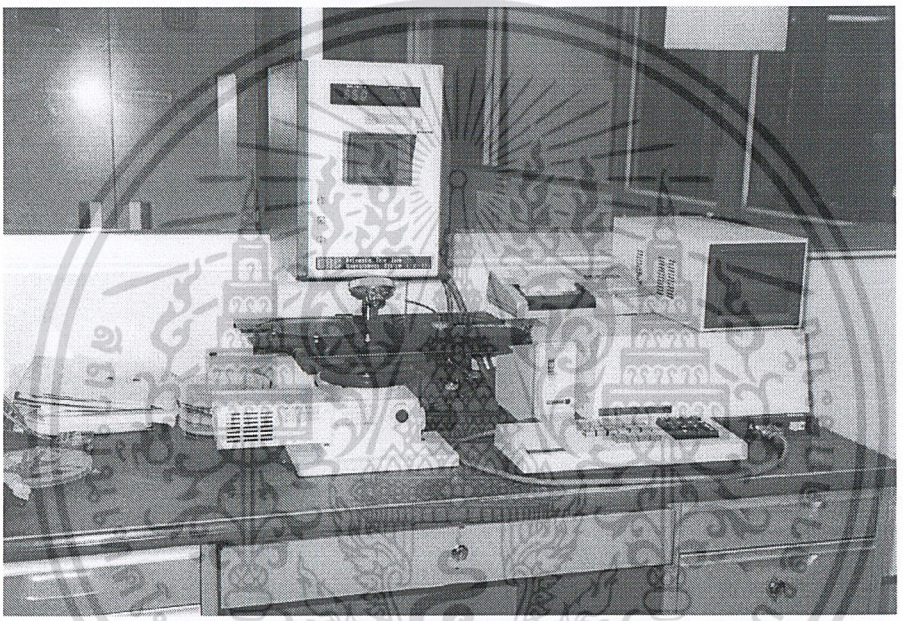
4.2.2 การหาความหนาของชั้นออกไซด์

เราสามารถคำนวณหาความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดจาก Thermal Oxidatio ได้จากกราฟรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 นอกจากนี้เรายังสามารถบอกกความหนาของชั้นออกไซด์นี้ได้โดยพิจารณาดูสีของชั้นออกไซด์จากการสะท้อนแสงฟลูออเรสเซต์ตรงๆซึ่ง ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและสีของ SiO_2 ที่ภาคผนวกเป็นตารางที่ใช้ในการเทียบสีความหนาของชั้นออกไซด์ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมโดยออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำจะมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน แต่อัตราการเกิดชั้นของออกไซด์โดยไอน้ำจะมีค่าสูงกว่านั่นคือ ที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเวลาเท่ากันชั้นออกไซด์จากไอน้ำจะหนากว่าชั้นออกไซด์จากออกซิเจนแห้ง ดังนั้นในการนำชั้นออกไซด์นี้ไปใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณา เพื่อให้เหมาะสมกับงานชั้นความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากขบวนการออกซิเดชั่น โดยเริ่มจากขณะที่ผิวแผ่นผลึกซิลิคอนไม่มีชั้นออกไซด์ใด ๆ เคลือบอยู่ก่อน

นอกจากนี้แล้ววิธีที่สะดวกอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาความหนาของชั้นออกไซด์ก็คือการใช้เครื่องมือวัดดังรูป 4.11 ซึ่งใช้ภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



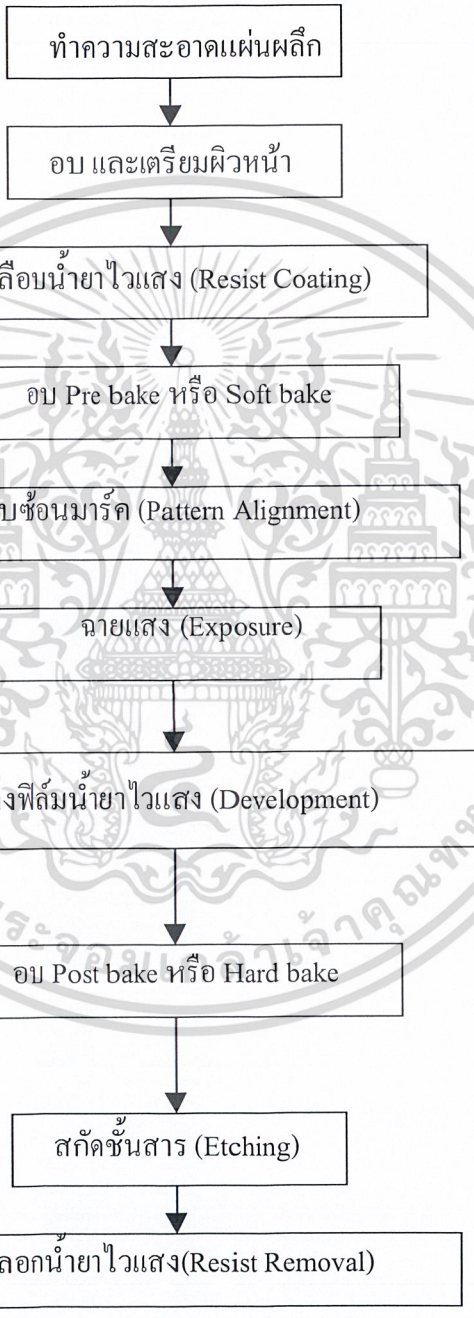
รูป 4.11 Automatic Thin Film Measurement system model.TFM-120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี (Photo Lithography)

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี

ลำดับขั้นตอน ของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี สามารถแสดงได้ด้วยแผนผัง ดังในรูปที่ 4.12



รูป 4.12 แสดงแผนผังขั้นตอนของกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีทั่ว ๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 สารไวแสงและเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี

4.3.1.1 ชนิดของสารไวแสง

น้ำยาไวแสง ที่นำมาใช้กับกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีโดยทั่ว ๆ ไป จะประกอบด้วยสิ่งสำคัญต่าง ๆ คือ วัสดุที่เป็นสารไวแสง (Photo sensitive material) ส่วนที่เป็นสารละลาย (Solvent) และส่วนที่เป็นสาร เพื่อช่วยในการยึดติดกับผิวใด ๆ (Epoxy) และโดยการพิจารณาปฏิกิริยาทางเคมีและแสง (Chemical – Photo reaction) ของวัสดุไวแสงที่อยู่ในน้ำยาไวแสง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญทำให้เราสามารถจำแนกน้ำยาไวแสง ออกเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 2 ชนิด คือ

(ก) น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photo resist)

หมายถึงน้ำยาไวแสง ที่เมื่อถูกฉายด้วยแสง และมีปฏิกิริยาเคมี – แสงเกิดขึ้นแล้ว จะทำให้คุณสมบัติของการละลายในสารตัวทำละลาย หรือที่เรียกง่าย ๆ ว่าน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) เปลี่ยนแปลงไปโดยขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับแสง จะสามารถละลายได้ดีในสารตัวทำละลาย แต่เมื่อถูกแสงแล้วจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลง คือไม่สามารถละลายได้ น้ำยาไวแสงชนิดลบนี้ จะเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ในฟิล์มถ่ายรูปทั่ว ๆ ไป ซึ่งภาพที่ปรากฏบนฟิล์ม จะมีลักษณะเป็น ภาพเนกาตีฟ (Negative Image) คือจะมีสภาพตรงข้ามกับ ภาพต้นแบบ (เช่น เปลี่ยนจากขาวเป็นดำ หรือดำเป็นขาว) ถ้าต้องการภาพที่เหมือนต้นแบบจริง จะต้องนำฟิล์มที่ได้ ไปพิมพ์ (Print) หรืออัดภาพลงบนกระดาษอัดภาพอีกครั้งหนึ่ง จึงจะได้ภาพที่เหมือนต้นแบบ ผลของปฏิกิริยาเคมี-แสง ของน้ำยาไวแสง ซึ่งจะให้ภาพเนกาตีฟดังกล่าวนี้ ทำให้ถูกเรียกว่า น้ำยาไวแสงชนิดลบ

(ข) น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photo resist)

น้ำยาไวแสงชนิดนี้ จะประกอบด้วยวัสดุสารไวแสง (Photo sensitive) ซึ่งมีคุณสมบัติปฏิกิริยาแสงเคมี-แสง ที่แตกต่างกับกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดลบโดยจะให้ผลตรงกันข้าม กล่าวคือ เมื่อยังไม่ถูกแสงหรือเมื่อไม่มีปฏิกิริยากับแสง จะมีคุณสมบัติไม่ละลาย หรือน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) แต่เมื่อถูกแสงหรือมีปฏิกิริยาแล้ว คุณสมบัติจะเปลี่ยนไปคือสามารถละลายได้ดีในน้ำยาล้าง น้ำยาไวแสงชนิดนี้ จะมีคุณสมบัติเหมือนกับฟิล์มสไลด์ (Slide film) หรือฟิล์มภาพยนตร์ ซึ่งจะให้ภาพบนฟิล์มมีลักษณะที่เป็น ภาพโพสิตีฟ (Positive image) ซึ่งเป็นภาพจริงเหมือนกับภาพต้นแบบ (คือขาว หรือดำ เหมือนต้นแบบ) ดังนั้นเราจึงเรียก น้ำยาไวแสงชนิดนี้ว่า น้ำยาไวแสงชนิดบวก

4.3.1.2 เทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟี ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม เพื่อการสกัด หรือเอตชิ่งค์ (Etching) ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วน ที่เคลือบอยู่บนผิวผลึกซิลิคอนออก เพื่อการแพร่อะตอมของสารเจือ (impurity atom) เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ทำ

เอกสาร... ไม่ว่า... ...

ให้เกิดส่วนต่าง ๆ ของตัวอุปกรณ์ เช่นไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

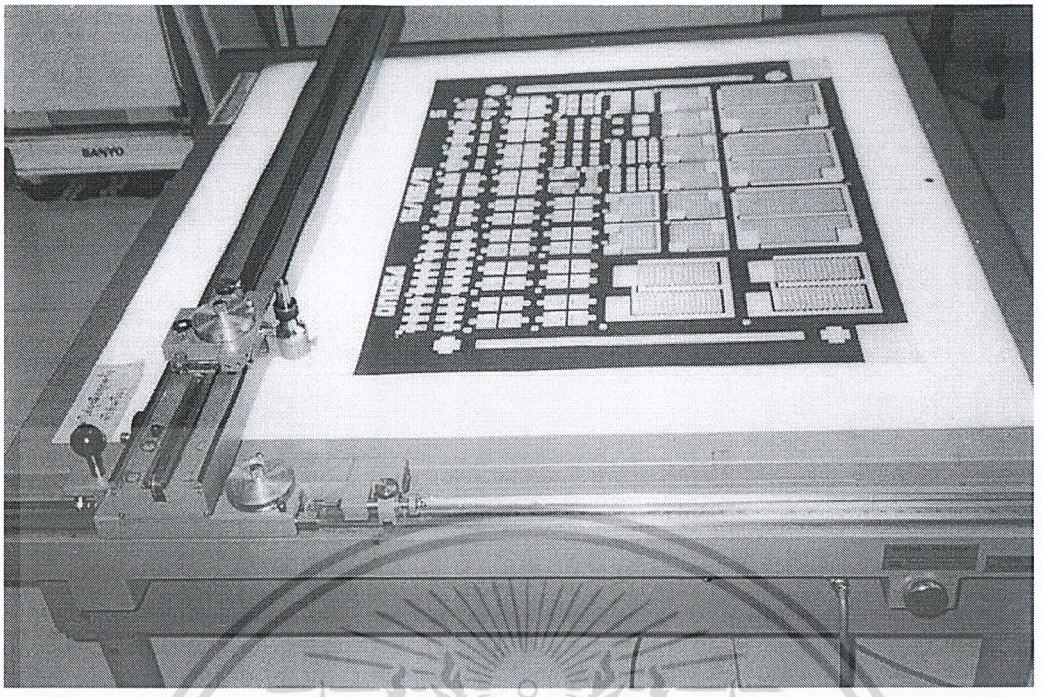
เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกลวดลายต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโต้มาส์ก (Photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก

ซึ่งได้มาจากการออกแบบ (Design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโต้มาส์ก จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผนึกนี้ไปบ้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้างอยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสง ชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลือปกคลุมอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกสกัดหรือเอตซิ่งค์ (Etching) ด้วย สารตัวสกัดหรือ เอ็ตแชนท์ (Etchant) เช่น กรดกัดแก้ว (HF) เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนของการเอตชิงค์แผ่นผลึกจะถูกนำไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีที่เป็นสารตัวสกัด หรือ เอ็ตแชนท์ (Etchant) ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถสกัดหรือละลายชั้นของออกไซด์ออกไปได้ ในที่สุดหลังจากนั้นเมื่อชั้นของน้ำยาไวแสงถูกลอดออกก็จะปรากฏภาพ หรือลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเป็นลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโต้มาส์ก การเกิดภาพลวดลายได้ ก็เพราะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกสกัดออกไปนั่นเอง คล้ายกับการสกัดหินลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีโดยทั่วไป

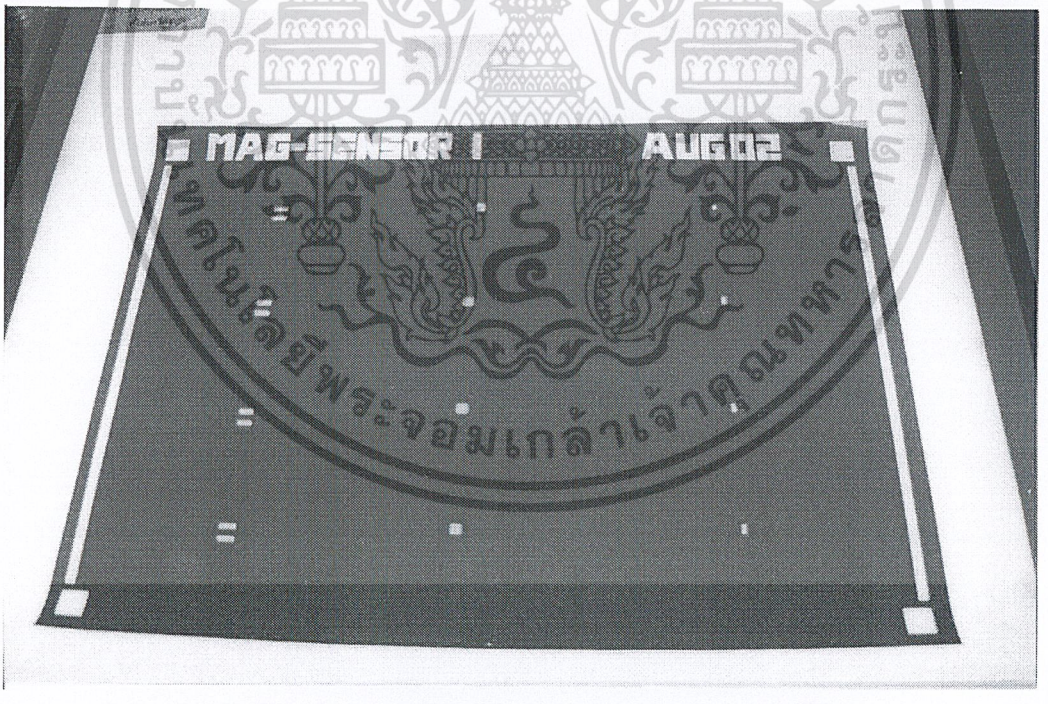
4.3.2 ขั้นตอนในการเตรียมสร้างกระจกต้นแบบ

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์(parameter) ต่างๆของตัวอุปกรณ์โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ เช่น ความกว้าง (W) ความยาว (L) ของแชลแนล และค่าระยะห่างระหว่างเดรนทั้งสอง(d) ให้มีค่าต่างกันเพื่อจะทำการวัดถึงคุณสมบัติในการใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบกัน และได้ทำการเขียนแบบลงบนแผ่นไมล่าร์ลามิเนตตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งรูปที่ 4.13 แสดงโต๊ะสำหรับตัดแบบ และรูปที่ 4.14 ถึง รูปที่ 4.18 แสดงลวดลายที่ได้จากการตัดแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

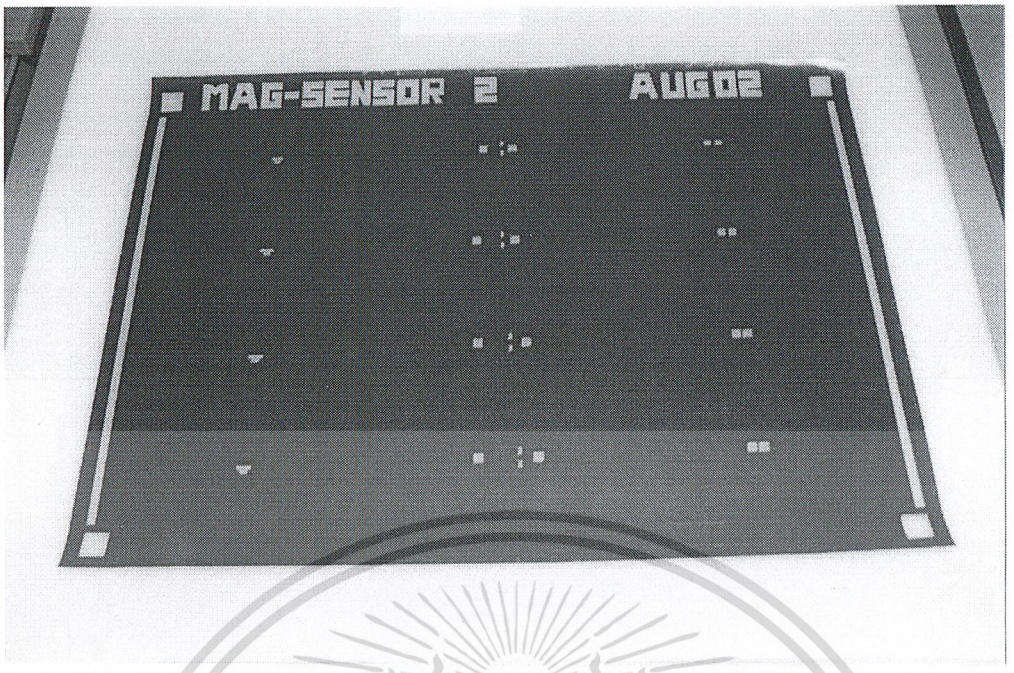


รูป 4.13 .แสดงโต๊ะที่ใช้สำหรับตัดแบบ

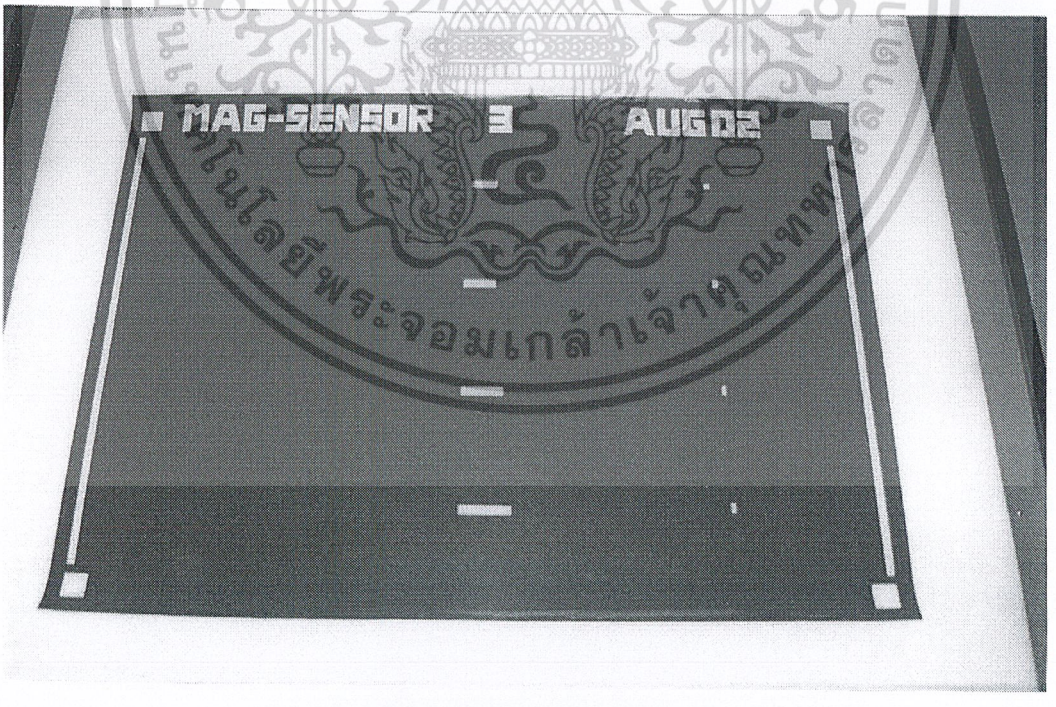


รูป 4.14 mask#1 (Body mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

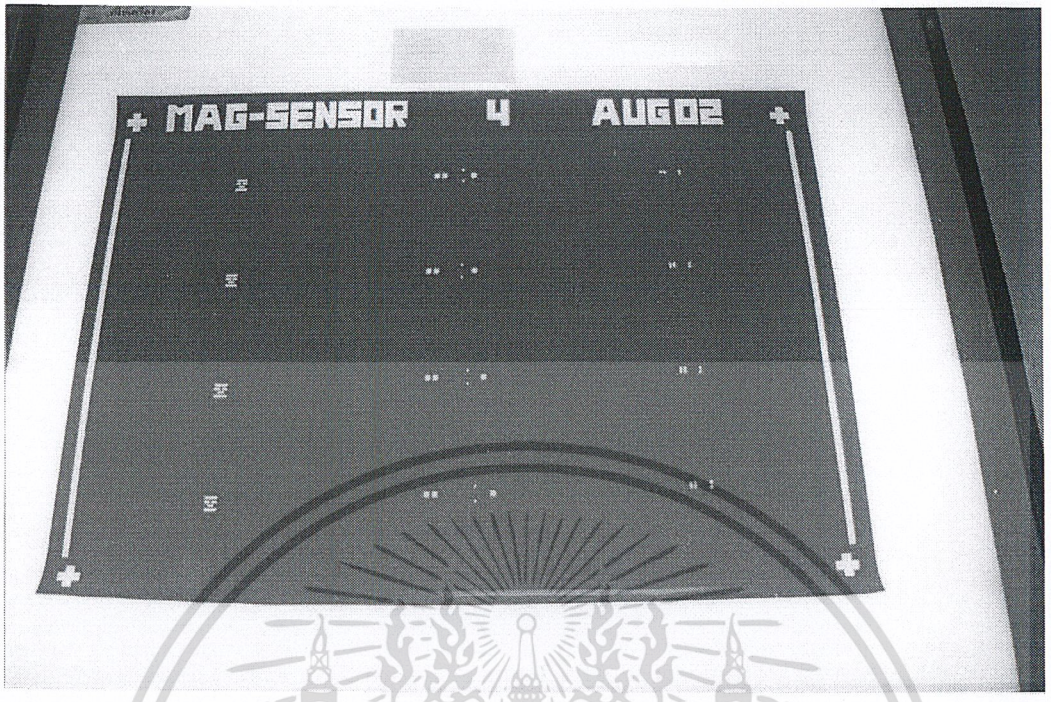


รูป 4.15 mask#2 (Source, Drain mask)



รูป 4.16 mask#3 (Gate mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

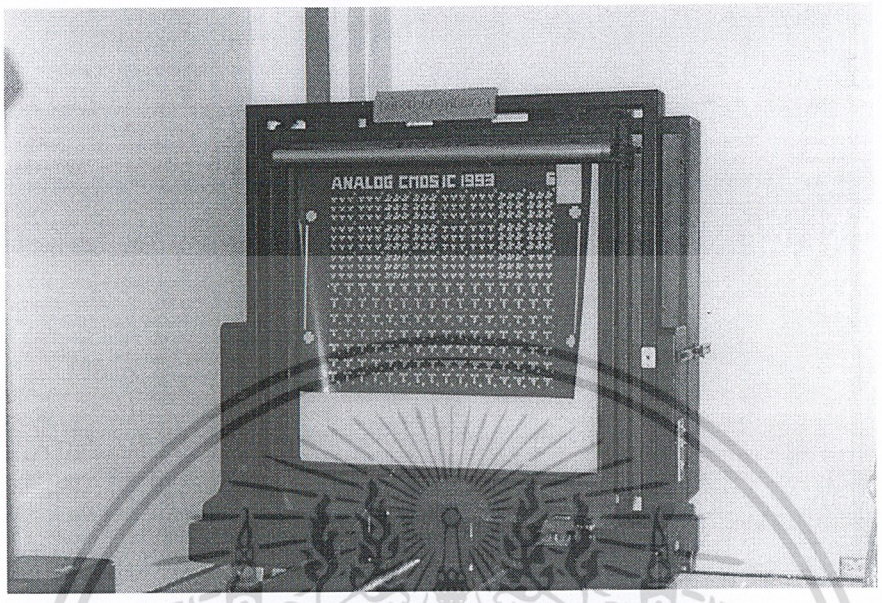


รูป 4.17 mask#4 (Contact mask)

รูป 4.18 mask#5 (Metal mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำการถ่ายแบบย่อลงบนกระจกต้นแบบโดยย่อลงไป 50 เท่า ซึ่งจะได้กระจกต้นแบบทั้งหมดห้าชิ้นด้วยกัน โดยจากภาพ 4.19 แสดงการติดแบบที่เขียนบนแผ่นไมล่าร์ลามิเนตกับตัวยึดเพื่อที่จะทำการถ่ายแบบด้วยกล้องถ่ายแบบย่อส่วนลง 50 เท่า



รูป 4.19 แสดงลักษณะการติดแผ่นไมล่าร์ลามิเนตบนตัวยึดสำหรับถ่ายแบบย่อส่วน

4.3.3 ชนิดของโฟโต้มาส์ก

จากเทคนิคของโฟโต้ลิโธกราฟี จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ดี ของกระจกโฟโต้มาส์กก็คือจะต้องสร้างจากวัสดุโปร่งแสง หรือวัสดุที่ยอมให้แสงหรือรังสีผ่านได้ดี และจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนค่าต่ำ ๆ นอกจากนี้จะต้องเป็นวัสดุที่แข็ง เรียบ และทนทานไม่เกิดความผิดเพี้ยน ของภาพลวดลายของวงจรรวม ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้และถูกนำมาใช้งาน ได้แก่ แก้วควอทซ์ (Quartz) หรือแก้วโบโรซิลิเกตชนิดพิเศษ (Borosilicate) สำหรับวัสดุที่เป็นภาพลวดลาย หรือส่วนดำทึบแสง บนแก้วควอทซ์หรือแผ่นกระจกควอทซ์ จะต้องมีคุณสมบัติป้องกันมิให้แสงผ่านไปได้ ซึ่งอาจจะเป็นวัสดุที่สามารถสะท้อนแสงได้ดี หรืออาจจะเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนแสงหรือรังสีได้ดี วัสดุที่นำมาใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ น้ำยาไวแสง (Photo resist) ซึ่งมีลักษณะสีดำ ทึบแสง และโลหะโครเมียม หรือเหล็กออกไซด์ก็ถูกนำมาใช้เช่นกัน เพราะสามารถสะท้อนแสงได้ดี และมีความทนทานสูง โดยเฉพาะในงานวงจรรวมที่มีภาพลวดลายละเอียดหรือเล็กมาก ๆ เช่น VLSI

จากการพิจารณาความแตกต่างของวัสดุที่นำมาใช้ป้องกันแสง เราอาจจัดแบ่งชนิดของโฟโตมาส์กได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. อีมูลชั่นมาส์ก (Emulsion mask) บางครั้งเรียกว่า ซอฟมาส์ก (Soft mask) หรือมาส์กอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เมตัลมาส์ก (Metal mask) บางครั้งเรียกว่า ฮาร์ดมาส์ก (Hard mask) หรือมาส์กแข็ง

อีมูลชั่นมาส์กเป็นโฟโต้มาส์ก ซึ่งบริเวณส่วนทึบแสงจะใช้น้ำยาไวแสง หรือฟิล์มไวแสงทำหน้าที่ดูดกลืนและบังแสงไม่ให้ผ่าน ปกตินิยมใช้ในงานการสร้างสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำทั่ว ๆ ไป รวมทั้งวงจรรวม และงานประเภทวิจัย เพราะมีราคาถูก และสามารถสร้างได้ง่าย แต่ข้อเสียก็คือเสียหาย หรือมีรอยขูดขีดง่าย มีความทนทานน้อยกว่าแบบเมตัลมาส์ก

สำหรับเมตัลมาส์ก เป็นมาส์กที่บริเวณทึบแสง จะใช้โหละซึ่งสามารถสะท้อนแสงได้ดี แสงจึงผ่านไปไม่ได้ วัดสุที่นิยมใช้ ได้แก่ โครเมียม (Cr) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fc_2O_3) ซึ่งสารแต่ละชนิด จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และมีการใช้งานแตกต่างกัน มาส์กชนิดนี้จะมีความแข็งแรง และทนทาน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้งานที่ต้องการความละเอียดสูง ๆ เช่นวงจรรวมระดับ VLSI และในงานอุตสาหกรรมซึ่งต้องการมาส์กที่มีอายุการใช้งานสูง

4.3.4 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นผลึก

4.3.4.1 การเตรียมผิวหน้าแผ่นผลึก

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่าง ๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึก ก่อนที่จะเคลือบน้ำยาไวแสง บนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน อย่างไรก็ดีผิววัสดุที่ใช้มากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้น ซิลิคอนออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้นหรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์เพราะโดยปกติ ผิวของชั้นออกไซด์นี้ จะดูดซึมไอน้ำหรือความชื้นจากอากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิ ราว 200-250 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ภายหลังการอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้นานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซึมความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้น เมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการเคลือบน้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexa Methyl Disilazane (HMDS) ฉีดพ่น หรืออบไอระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำ ออกจากชั้นผิวของออกไซด์ โดยทั่วไปในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่นหรือหมุนให้แห้ง จากนั้นจึงจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง

4.3.4.2 วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสง

การเคลือบน้ำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธี ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมหรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) แบบสปินเนอร์ (Spinner)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบน้ำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกวง กลมการเคลือบน้ำยาไวแสงวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือ สปินเนอร์ โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูกวางลงบนแท่นหมุน และถูกยึดติดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นน้ำยาไวแสงจะถูกหยดลง บริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เพื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (Spin) ด้วยความเร็วรอบราว 3000-6000 รอบ/นาที ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที น้ำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เป็นฟิล์มบาง เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก

2) แบบสเปรย์ (Spray coating)

วิธีการนี้น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตก ลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึกและยึดเกี่ยวกันเป็นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่ายและสะดวก แต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ได้ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกันชั้นของออกไซด์ด้านล่างของแผ่นผลึก

3) แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้ง จะนิยมทำในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนออกเป็น ไดซ์ หรือ ชิพ (Chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงทั้ง 2 ด้าน เพื่อป้องกันเศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่น ที่จะเกิดขึ้นขณะทำการตัดแยกชิพ ด้วยเลื่อย (Sawing) หรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก

4.3.4.3 การอบขั้น Pre bake หรือ soft bake

ภายหลังการเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบ เพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในชั้นนี้เรียกว่า Pre bake หรือ Soft bake ซึ่งใช้อุณหภูมิราว 90-100°C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวก อุณหภูมิที่ใช้จะต่ำลงเล็กน้อยคือ 80-90°C การอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้

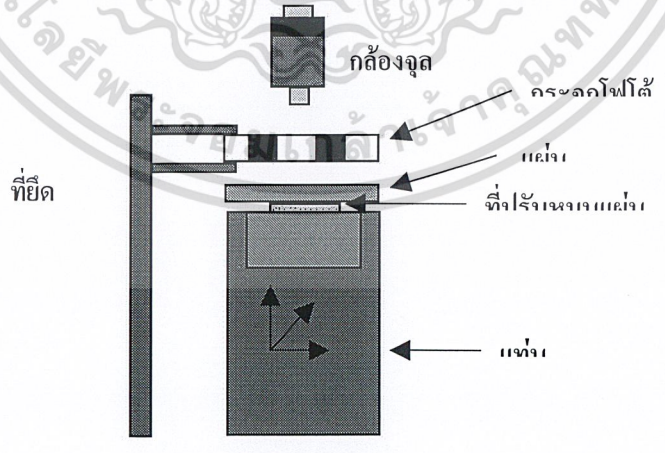
4.3.5 การปรับซ้อนมาส์กและการฉายแสง (Mask Alignment and Exposure)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโต้มาส์ก ซึ่งโดยปกติจะถูกวางทาบทับ (Contract) ลงไปบนแผ่นผลึก ที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโต้มาส์กชิ้นแรก หรือ มาส์กที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซ้อนมาส์ก (Mask alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นผลึกเลย แต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้น ได้ผ่าน

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

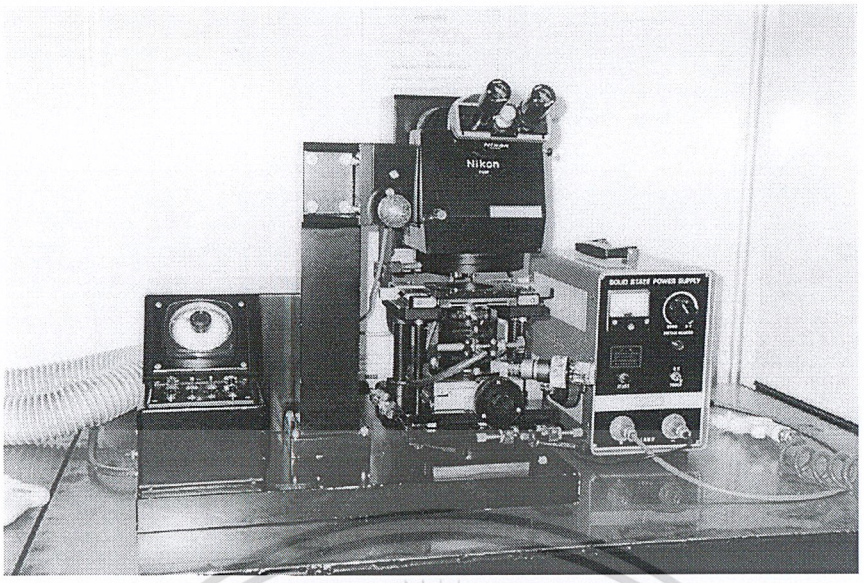
การสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหญ่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโต้มาส์ก ตั้งแต่มาส์กที่ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับซ้อนมาส์ก เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาส์ก ซ้อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ในที่สุดของกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี จะทำให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ ที่ตำแหน่งที่ถูกต้อง โครงสร้างของวงจรรวมเป็นไปตามที่ออกแบบและถูกต้อง อย่างไรก็ดี เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ้อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซ้อนมาส์ก” (Mask aligner) ซึ่งอาศัยหลักการง่าย ๆ คือ แผ่นผลึกจะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (x-y-z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้งแนว x, y และ z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ส่วนกระจกโฟโต้มาส์ก จะถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำการสังเกตภาพลวดลาย ที่ปรากฏทั้งบนแผ่นผลึกและบนโฟโต้มาส์ก พร้อมกับทำการปรับเลื่อนแผ่นผลึกทั้งแกน x, y และ θ จนกระทั่ง ภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโต้มาส์กซ้อนกันลงตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง จากนั้นจึงปรับให้แผ่นผลึกเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน z จนแนบสนิท กับกระจกโฟโต้มาส์ก ในกรณีที่ภาพลวดลาย มีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ้อนภาพนี้ จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไป ภาพลวดลายของวงจรรวม มีขนาดเล็กมาก และรูปที่ 4.21 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการปรับซ้อนมาร์คและฉายแสงที่ใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



รูป 4.20 แสดงแผนผังของอุปกรณ์เครื่อง “ตัวปรับซ้อนมาส์ก”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.21 Mask Alignment

4.3.6 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ้อนภาพระหว่างกระจกโฟโต้มาส์ก และแผ่นผลึกเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโต้มาส์ก เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสง ปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมจะมีความไวต่อแสง ที่มีความยาวคลื่น λ ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วงและสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟี จึงสามารถ เห็นเป็นสีม่วงและสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟี จึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง

4.3.7 การล้างน้ำยาไวแสง (Resis Development)

ขั้นตอนนี้เป็นการใช้น้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) ละลาย หรือล้างน้ำยาไวแสง ที่ผ่านการฉายแสงมาแล้ว ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกละลายออก แต่ถ้ากรณีน้ำยาไวแสงชนิดบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป

การล้างน้ำยาไวแสงนี้ ถ้าเป็นกรณีน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะใช้วิธีการพื้นฐานคือ นำแผ่นผลึกไปหมุนบนสปินเนอร์ (Spinner) คล้ายกับการเคลือบน้ำยาไวแสง โดยขณะที่แผ่นผลึกกำลังหมุน น้ำยาล้างจะถูกฉีดพ่นลงไปบนแผ่นผลึก น้ำยาไวแสงที่ถูกละลายก็จะถูกแรงเหวี่ยงกระจายออกไปรอบ ๆ จากนั้นล้างแผ่นผลึกให้สะอาดด้วยสารละลายอื่น ๆ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.8 การเอตชิ่งค์ (Etching)

ขั้นตอนนี้เป็นการสกัดหรือละลาย ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ หรือวัสดุอื่น ๆ ด้วยสารเคมีที่เป็น สารตัวสกัด หรือเอตแชนท์ (Ethcant) โดยที่แผ่นผลึก ที่ผ่านการล้างน้ำยาไวแสง (Development) แล้วน้ำยาไวแสงจะเหลือตกค้าง และปกคลุมอยู่บนผิว ของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และบางส่วนก็ถูกละลายออกไป ทำให้ชั้นออกไซด์ บริเวณที่ไม่มีสารไวแสงเหลืออยู่ถูกทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวสกัด (Etchant) เช่นกรดกัดแก้ว (HF) ก่อนการเอตชิงค์ หรือก็คือ ภายหลังการล้างน้ำยาไวแสง แผ่นผลึกจะถูกนำไปอบ (Post bake หรือ Hard bake) เพื่อใช้ชั้นน้ำยาไวแสง แห้งสนิทและยึดติดแน่นกับผิวของออกไซด์ วิธีการการกสัดชั้นสารหรือชั้นออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารตัวสกัด (Etchant) ที่เป็นสารละลายเคมีนี้ ถูกเรียกว่า “Wet chemical etching” หรือ “Wet etching” หรือการเอตชิ่งค์เปียก

4.4 ขบวนการแพร่สารเจือ

การเติมสารเจือลงในแผ่นผลึกซิลิกอนสามารถกระทำได้โดยการแพร่ (diffusion) ปกติการแพร่หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ที่ ๆ มีความเข้มข้นต่ำกว่า

ขบวนการแพร่

ขบวนการแพร่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานเทคโนโลยี ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ กล่าวคือเพื่อการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการ ในทางปฏิบัติขบวนการแพร่ ถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนตามลำดับดังนี้คือ

1. ขั้น Pre deposition เป็นการแพร่ขั้นต้น เพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่จะเข้าไปในผลึกสาร

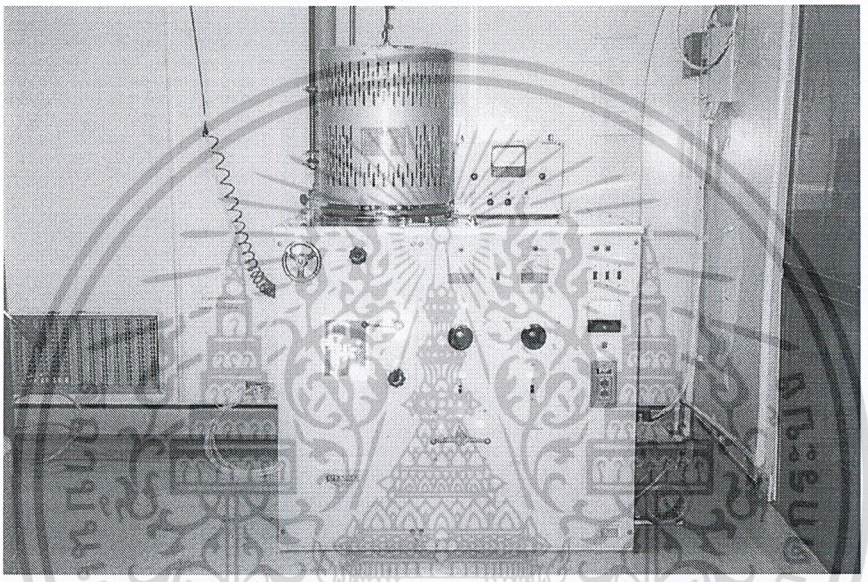
2. ขั้น Drive – in เป็นการแพร่ในขั้นต่อจากขั้นต้น เพื่อควบคุมและกำหนดลักษณะการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ

การแพร่ในขั้น Drive – in เป็นการแพร่ซึ่งกระทำต่อเนื่องจากขั้น pre deposition ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อทำให้อะตอมสารเจือแพร่ลึกเข้าไปในผลึกซิลิกอนตามต้องการ การแพร่ขั้นนี้จะมีการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวแผ่นผลึก เพื่อใช้เป็นหน้ากากป้องกันมิให้อะตอมสารเจือในผลึกซิลิกอนแพร่ออกมาภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ขบวนการเมตัลไลเซชั่น

ภายหลังจากที่สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่าง ๆ ในแผ่นผลึกซิลิกอนถูกสร้างขึ้นเรียบร้อยแล้วในกรณีที่เป็นวงจรสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ จะต้องถูกทำให้ต่อร่วมกันเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์และสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ขบวนการซึ่งใช้ในการต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าร่วมเป็นวงจรนี้เรียกว่า "ขบวนการเมตัลไลเซชั่น" (Metallization) ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์แสดงดังรูป 4.22 ซึ่งอาศัยเทคนิคของการเคลือบสารในสุญญากาศ (vacuum deposition) และเทคนิคอื่น ๆ อีก



รูป 4.22 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในขบวนการเมตัลไลเซชั่น

4.5.1 เงื่อนไขของขบวนการมัลไตเซชั่น

ในขบวนการเมตัลไลเซชั่นบนแผ่นผลึกซิลิกอน โลหะที่ถูกนำมาเคลือบผิวบนแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มิค หรือเป็นแถบความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวมนั้นจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. รอยสัมผัสกับซิลิกอนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ
2. มีค่าความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิกอนไดออกไซด์ หรือสารไดอิเลคตริคอื่น ๆ ได้ดี
4. ภาพแบบแผนจะต้องทำให้คมชัดได้ดี
5. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี
6. ค่าใช้จ่ายต่ำ และได้รับประโยชน์อย่างเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดี ไม่มีสารโลหะใดที่มีคุณสมบัติครบถ้วนทุกประการ แต่อะลูมิเนียมนับได้ว่าเป็นสารที่เหมาะสมที่สุด อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่นิยมนำมาใช้ในการเดินสายต่อภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ในวงจรรวม

4.5.2 การเคลือบสารในสูญญากาศ

งานของขบวนการเมตัลไลเซชั่นขั้นแรกก็คือ การเคลือบโลหะในสูญญากาศ ซึ่งกระทำได้หลายวิธี ซึ่งชั้นโลหะที่ได้จะมีคุณสมบัติเหมือน ๆ กัน สิ่งที่จำเป็นสำหรับการเคลือบโลหะนี้ก็คือ

1) Chamber ซึ่งสามารถทำให้ภายในมีสภาพเป็นสูญญากาศได้

2) Vacuum pump (ปั๊มอากาศ) เพื่อทำให้ภายในของ Chamber มีสภาพเป็นสูญญากาศด้วยค่าที่ต้องการ

3) อุปกรณ์แสดงหรือวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมทั้งค่าความดันภายใน chamber

4) วิธีการเคลือบชั้นของสารที่ต้องการ

วิธีการเคลือบโลหะในสูญญากาศแบบที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป ตัว chamber ซึ่งมีลักษณะเป็นครอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ หรืออาจทำจากเหล็กสแตนเลสสามารถปิดให้มิดชิดแล้วดูดอากาศภายในออกได้โดยผ่านวาวฟ์ปิดเปิด ปั๊มที่ใช้ดูดอากาศมีหลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบสามารถทำให้ภายในครอบแก้วเป็นสูญญากาศได้มากน้อยไม่เท่ากัน เช่น

1. จากความดันของบรรยากาศปกติ ถึงค่าสูญญากาศระดับกลาง (ราว 10 - 100μ) ปั๊มที่ใช้ได้แก่

ก. Rotary oil – sealed pump

ข. Sorption pump

2. จากสูญญากาศระดับปานกลาง ถึงค่าสูญญากาศระดับต่ำ(ราว 25μ -10^{-6}mm) ปั๊มที่ใช้ได้แก่

ก. Diffusion pump

ข. Turbomoecular pump

3. จากสูญญากาศระดับต่ำ ถึงค่าสูญญากาศระดับต่ำพิเศษ (ราว 10^{-6} T-10^{-10} T) ปั๊มที่ใช้ได้แก่

ก. Ion pump

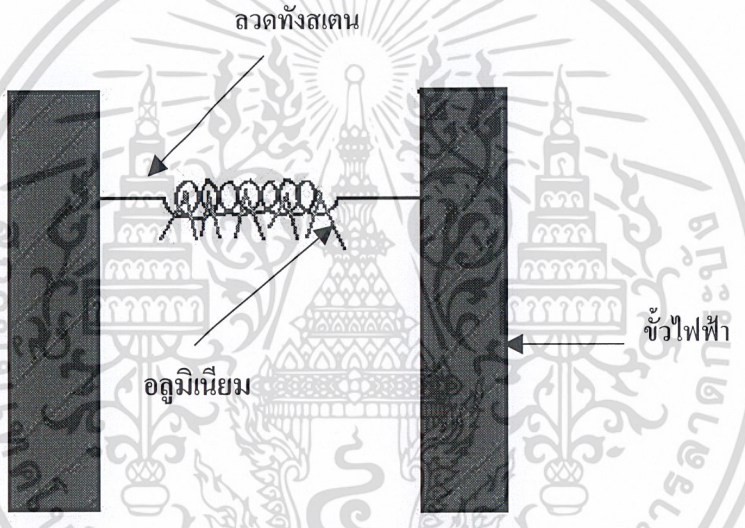
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 เทคนิคของการเคลือบสาร

เทคนิคของการเคลือบสารในสูญญากาศในงานอุตสาหรรมการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจำแนกออกได้เป็น 5 วิธี คือ

1. Filament evaporation
2. Electron – beam evaporation (E – beam)
3. Flash evaporation
4. Induction evaporation
5. Sputtering

เทคนิคแต่ละแบบมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน



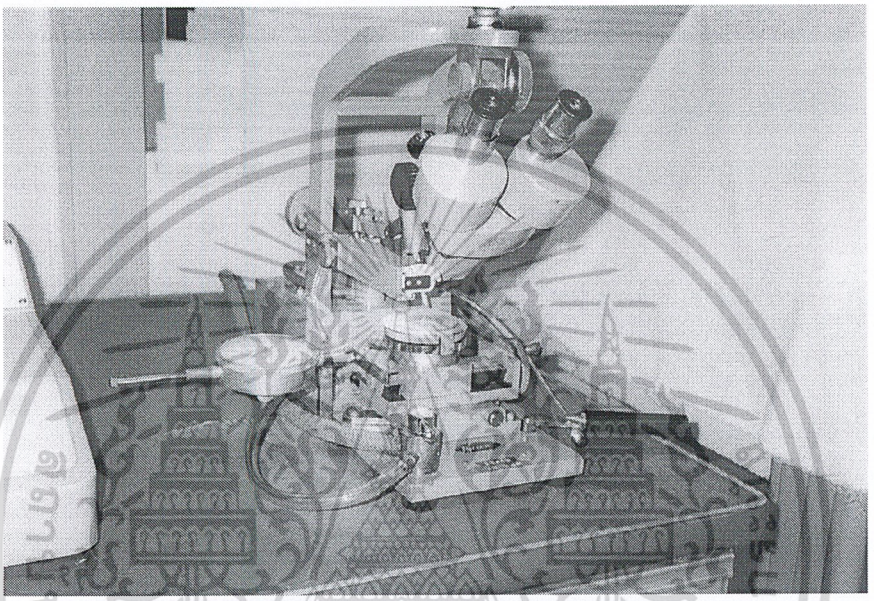
รูป 4.23 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบสูญญากาศวิธี Filament evaporation

เทคนิค Filament evaporation เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดสิ้นเปลืองน้อยที่สุด การเคลือบสารทำได้โดย ทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจาก “ไส้” (filament) หรือ “โบ๊ต” (boat) ที่สารนั้นวางอยู่ไส้หรือโบ๊ตได้รับความร้อนจากการที่มีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ขณะทำการเคลือบสารจะต้องควบคุมให้กระแสที่ไหลผ่านไส้เพื่อขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งสารที่วางอยู่ที่ไส้ได้รับความร้อนจนละลายติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอออกมาฟุ้งกระจายเคลือบแผ่นผลึกที่วางไว้ใน Chamber เทคนิคนี้บางครั้งก็ใช้สำหรับการเคลือบทองลงบนด้านหลังของแผ่นผลึกแต่สำหรับวัสดุที่มีธาตุต่าง ๆ รวมกันอยู่จะใช้วิธีนี้ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมละลายต่ำกว่าจะระเหยเป็นไอก่อนและเหลือธาตุที่มีจุดหลอมละลายสูงกว่าทิ้งไว้ ซึ่งเทคนิคนี้ใช้ในศูนย์วิจัย ERC ส่วนเทคนิคอื่น ๆ จะไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การตัดแยกอุปกรณ์

หลังจากที่เราทำการเคลือบอลูมิเนียมและกัดลวดลายอลูมิเนียมเสร็จเราจะต้องทำการตัดแยกตัวอุปกรณ์ออกเป็นตัวๆเพื่อทำการ Bonding ขาสำหรับการวัดและทดสอบคุณสมบัติ เนื่องจากว่าในตอนที่ทำการสร้างเราได้สร้างตัวอุปกรณ์อยู่บน wafer แผ่นเดียวกัน ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตัดแยกตัวอุปกรณ์ที่ใช้ในศูนย์วิจัยแสดงดังรูปที่ 4.24



รูป 4.24 แสดงเครื่องมือที่ใช้ตัดแยกตัวอุปกรณ์

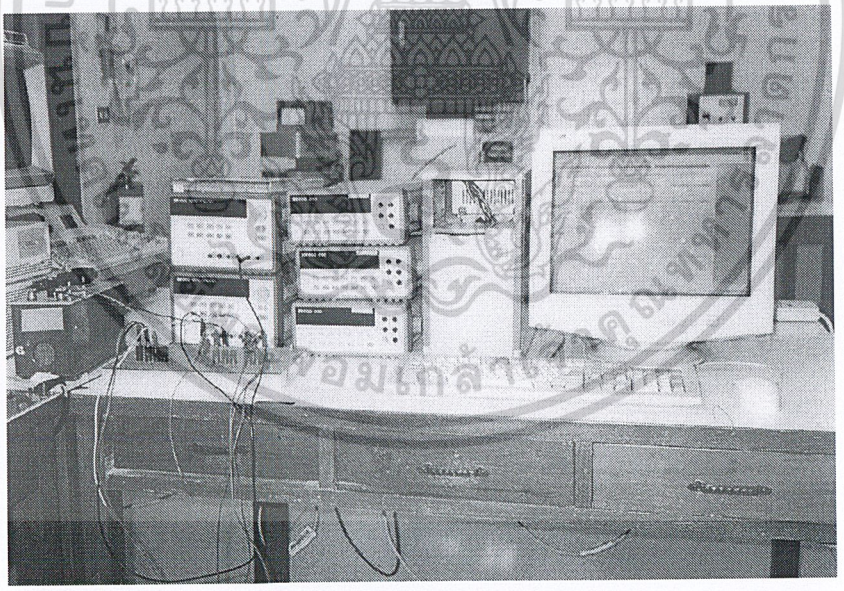
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การวัดและทดสอบคุณสมบัติอุปกรณ์

เนื่องจากว่าแมกเฟท มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับมอสเฟท เพียงแต่มีส่วนเดรนแยกออกเป็นสองส่วน ดังนั้นก่อนที่จะนำแมกเฟทไปวัดคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก จะต้องทำการวัดคุณสมบัติการทำงานเป็นมอสเฟทเสียก่อน แล้วจึงนำไปวัดคุณสมบัติการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยที่ ผลที่ได้จากการวัดคุณสมบัติ มี MAGFET เพียง 2 ตัว คือ MAGFETตัวที่ 2 (W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm) และ MAGFETตัวที่ 3 (W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm) ที่มีคุณสมบัติการทำงานเป็น sensor ได้ ซึ่งผลจากการวัดคุณสมบัติต่าง ๆ แสดงได้ดังต่อไปนี้

5.1 การวัดคุณสมบัติพื้นฐานการทำงานของ MAGFET

เป็นการวัดคุณสมบัติต่าง ๆ เช่นเดียวกับ MOSFET คือ การวัดแรงดันขีดเริ่ม การวัดความสัมพันธ์ I_D-V_{DS} ซึ่งในการวัดนี้จะใช้ระบบ GPIB ในการวัด แสดงดังรูป 5.1

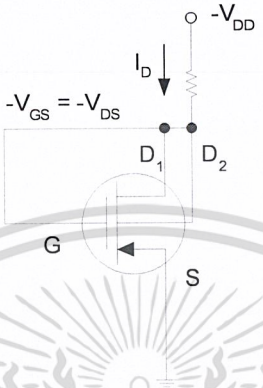


รูป 5.1 แสดงระบบ GPIB ที่ใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

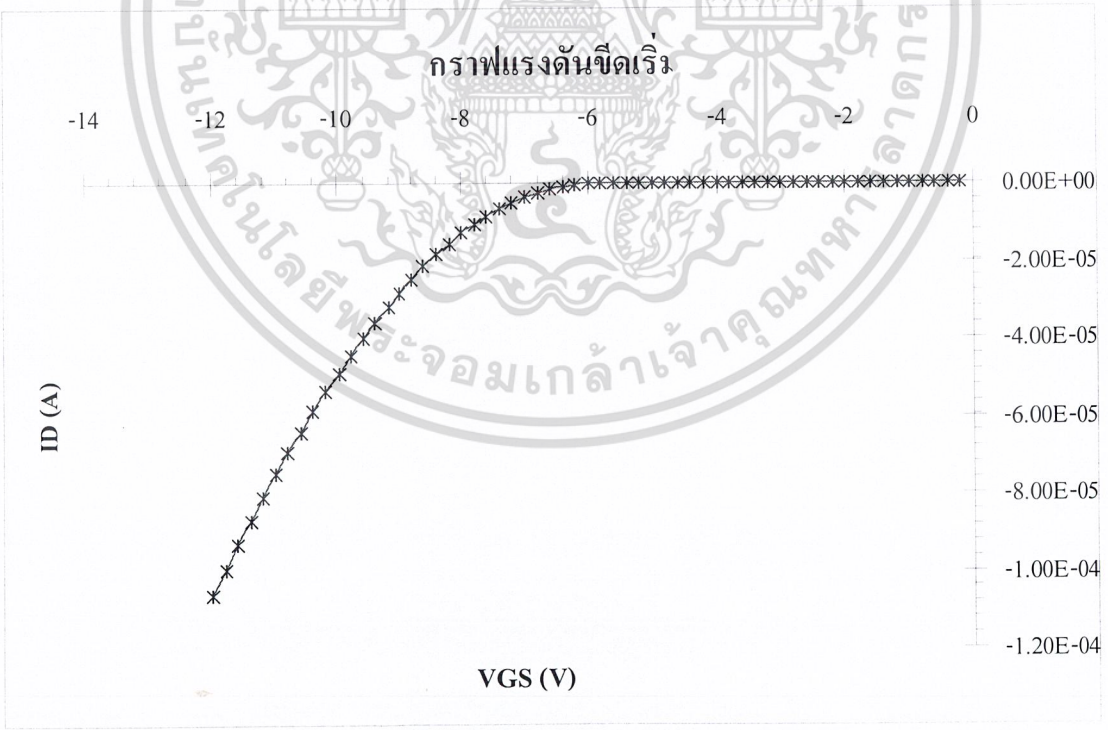
5.1.1 การวัดแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage)

เป็นการวัดเพื่อหาค่าแรงดันระหว่าง เกท กับ ซอส ที่ทำให้แมกเฟทเริ่มนำกระแส โดยใช้วงจรดังรูป 5.2



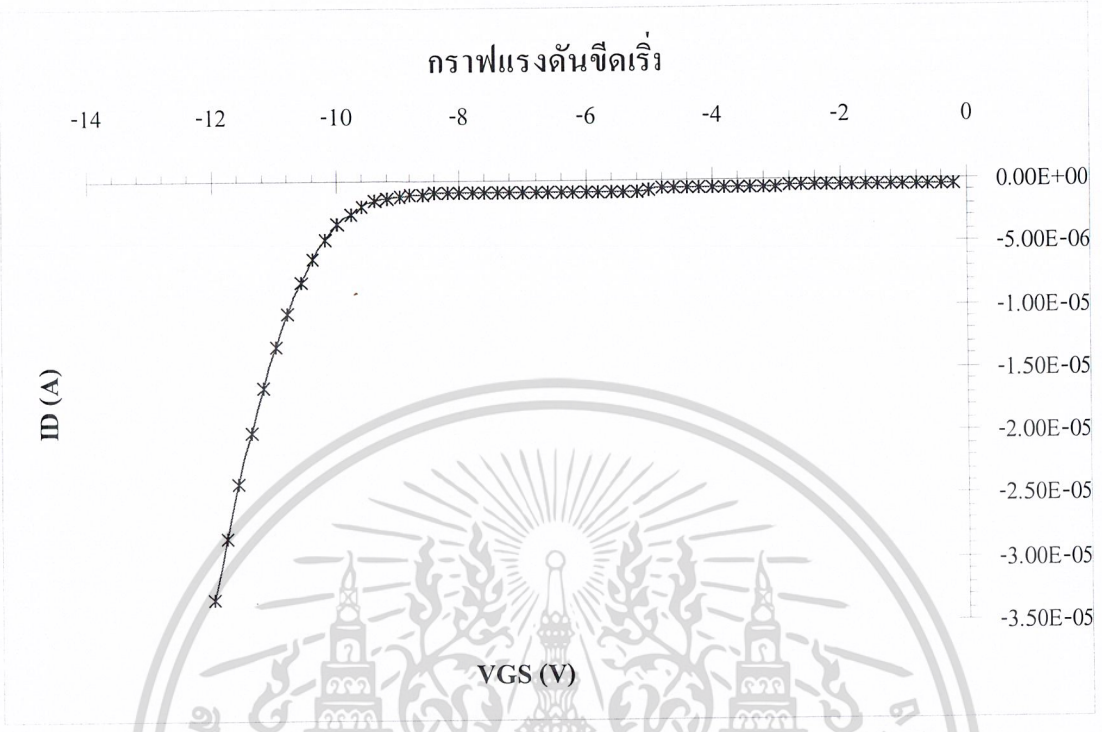
รูป 5.2 วงจรวัดลักษณะเฉพาะ I_D-V_{GS} ของแมกเฟทชนิดพี

จากนั้นนำค่าที่ได้มา plot กราฟ



รูป 5.3 กราฟแสดงค่าแรงดันขีดเริ่มของ MAGFET ตัวที่ 2

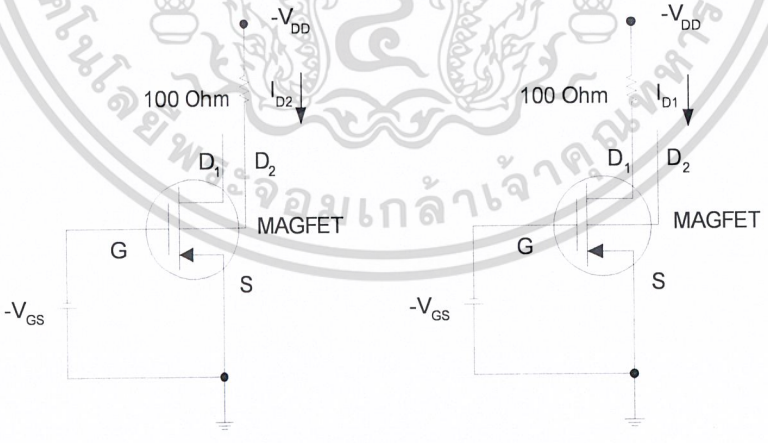
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.4 กราฟแสดงค่าแรงดันขีดเริ่มของ MAGFET ตัวที่ 3

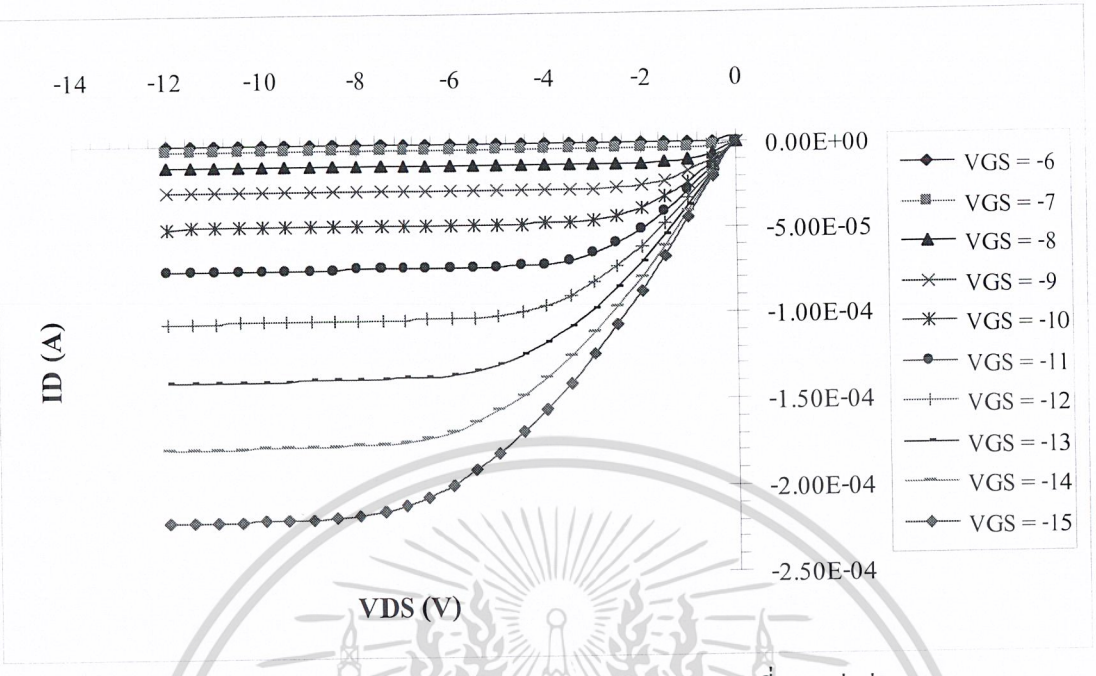
5.1.2 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} โดยที่ให้ bias เพียง เดรนเดียว

วงจรที่ใช้ในการวัดแสดงดังรูป 5.5

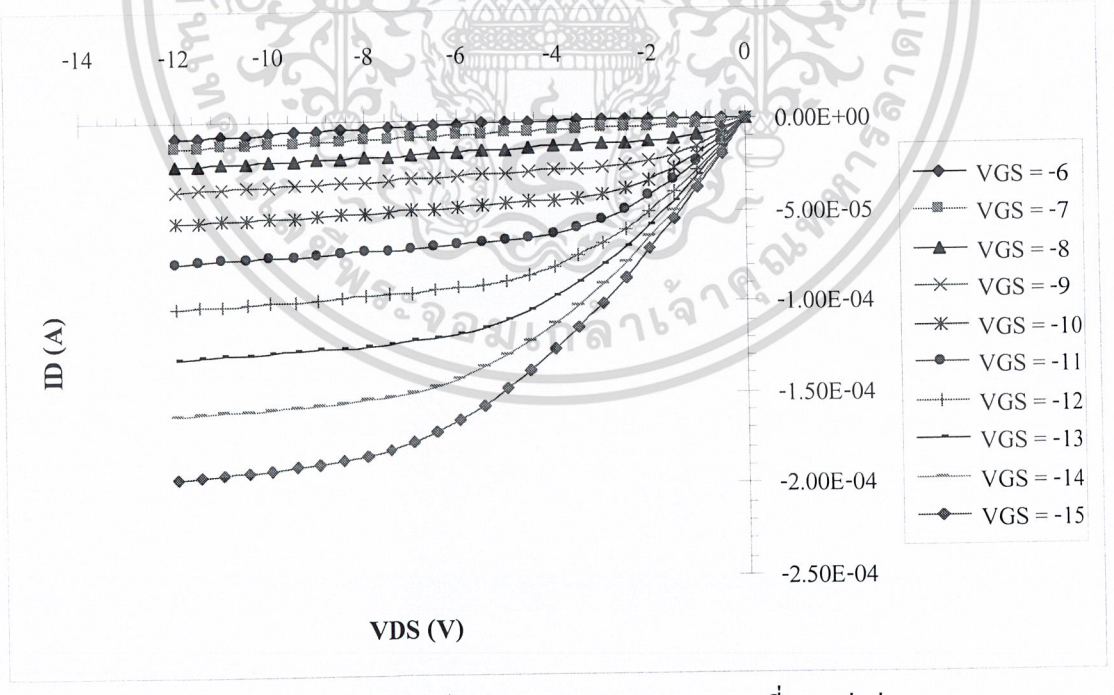


รูป 5.5 วงจรการให้ bias เพียง เดรนใดเดรนหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

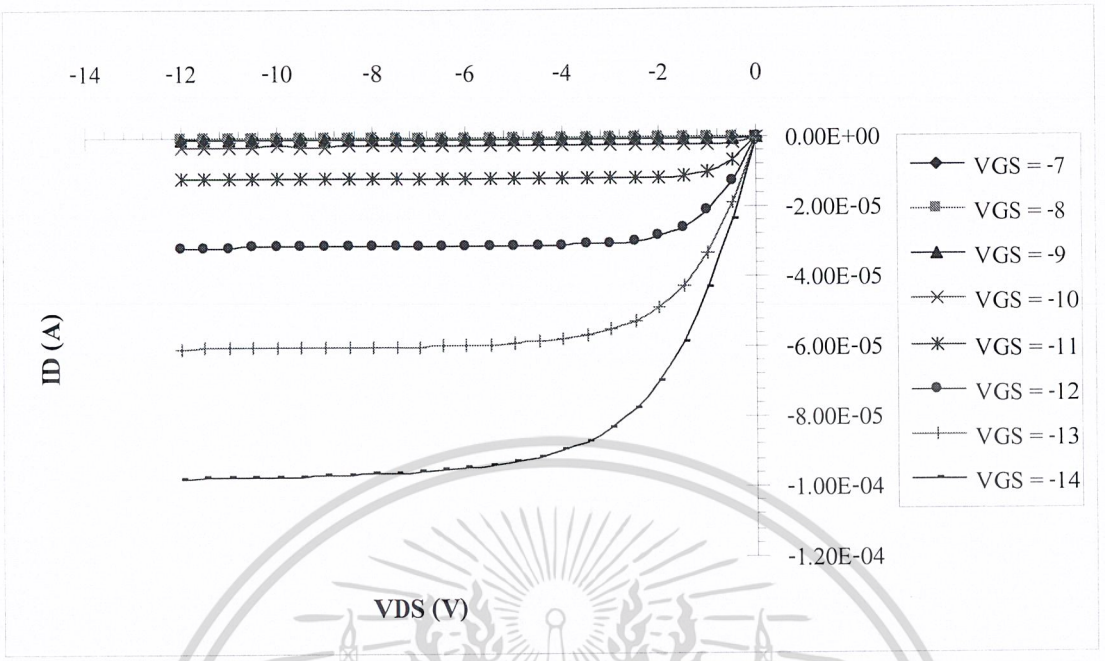


รูป 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 1 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm

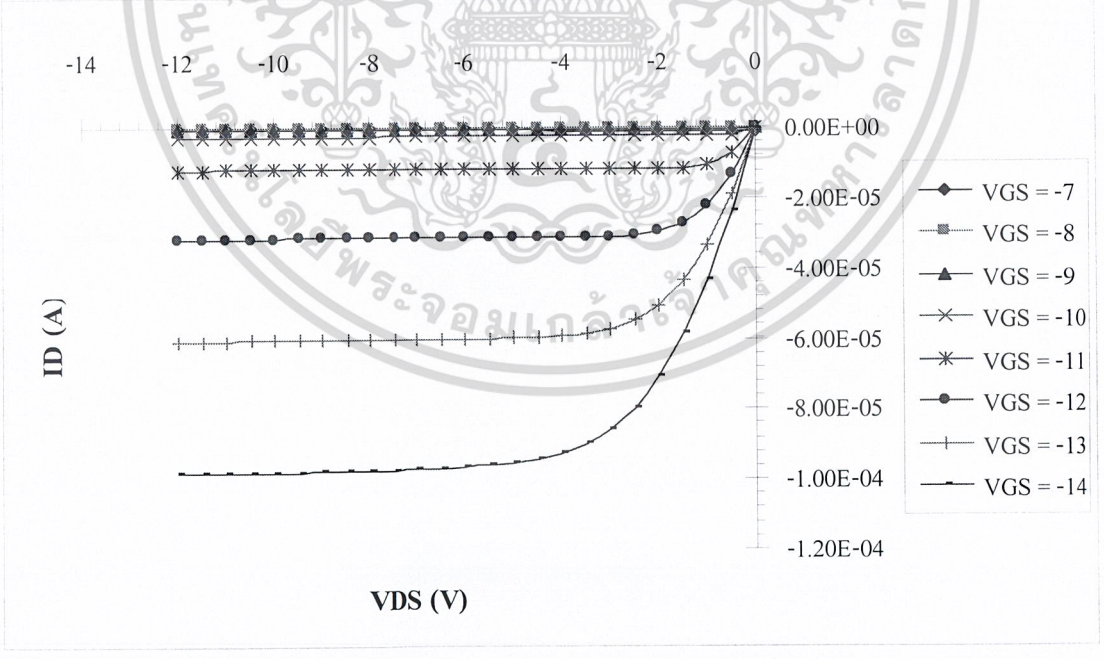


รูป 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 1 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm

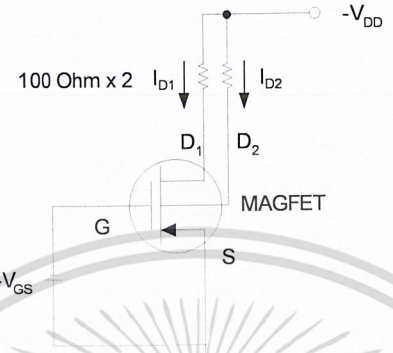


รูป 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm

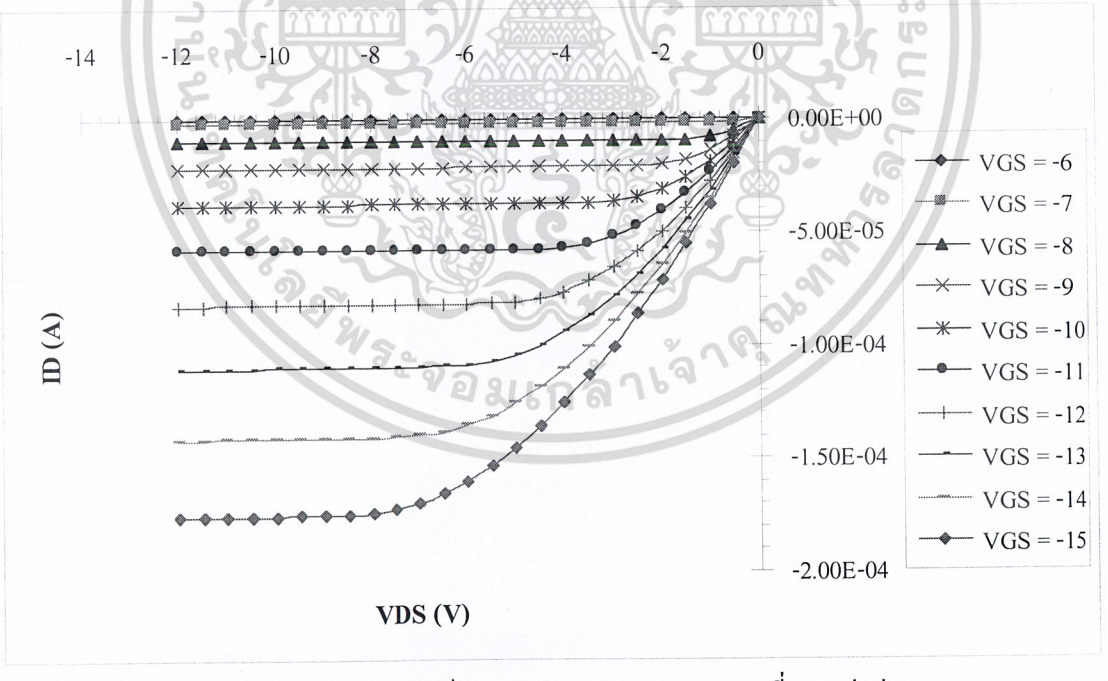
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} โดยให้ bias กับเดรนทั้งสอง

(1) เพื่อวัดหาค่ากระแสของแต่ละเดรน วงจรที่ใช้ในการวัดแสดงดังรูป5.10



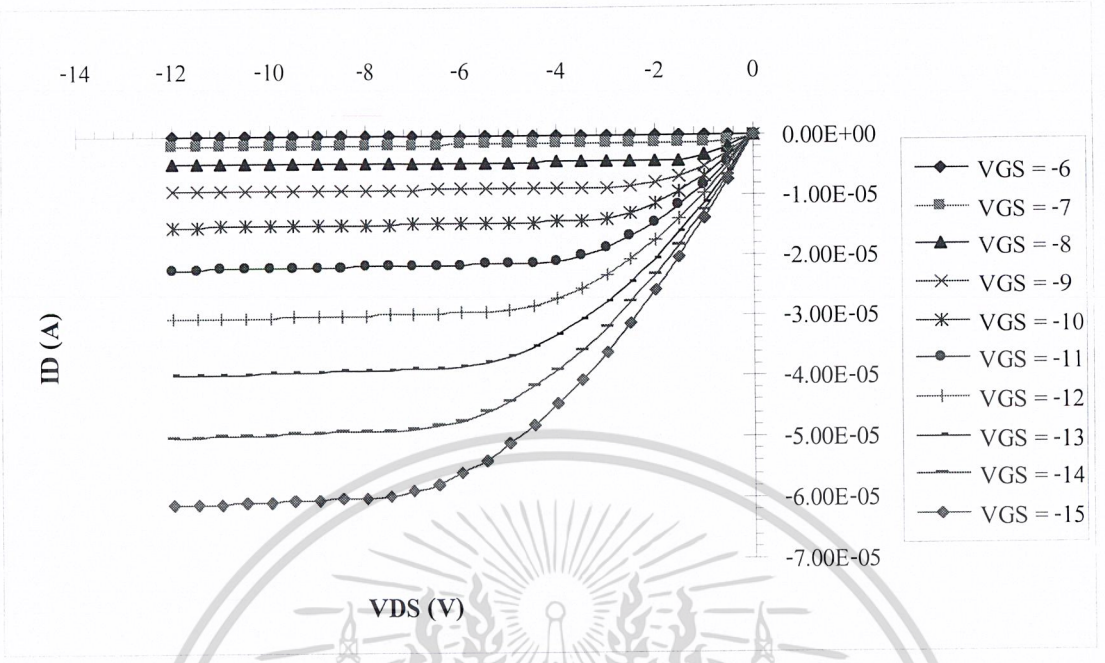
รูป 5.10 วงจรการให้ bias กับเดรนทั้งสอง เพื่อวัดหาค่ากระแส ของแต่ละเดรน



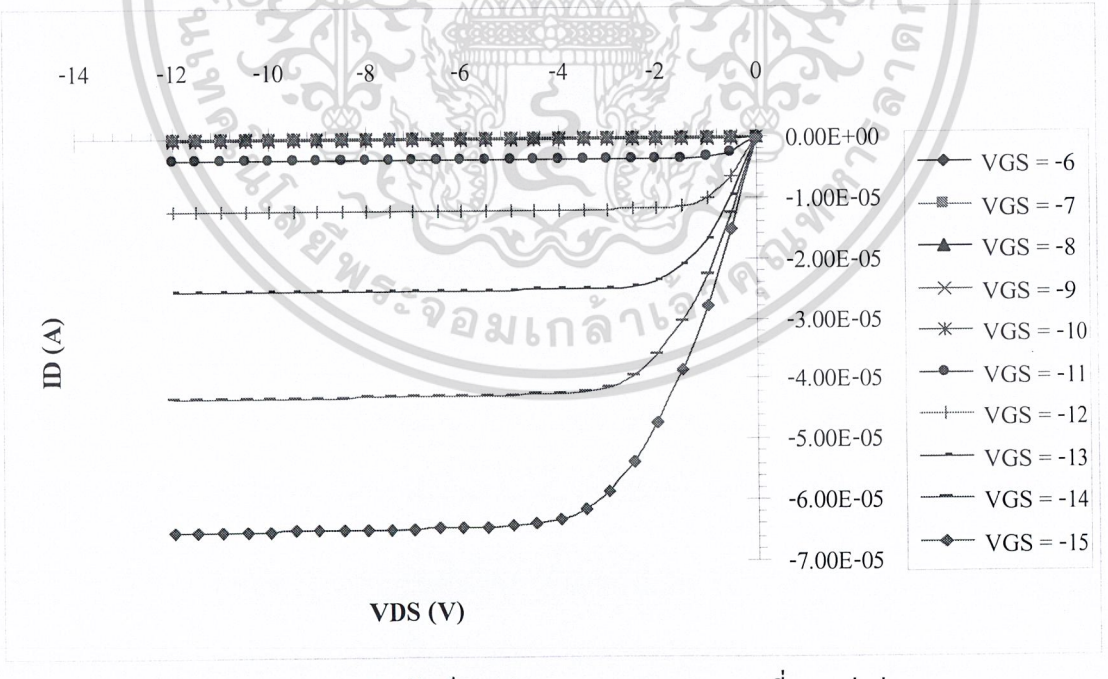
รูป 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 1 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

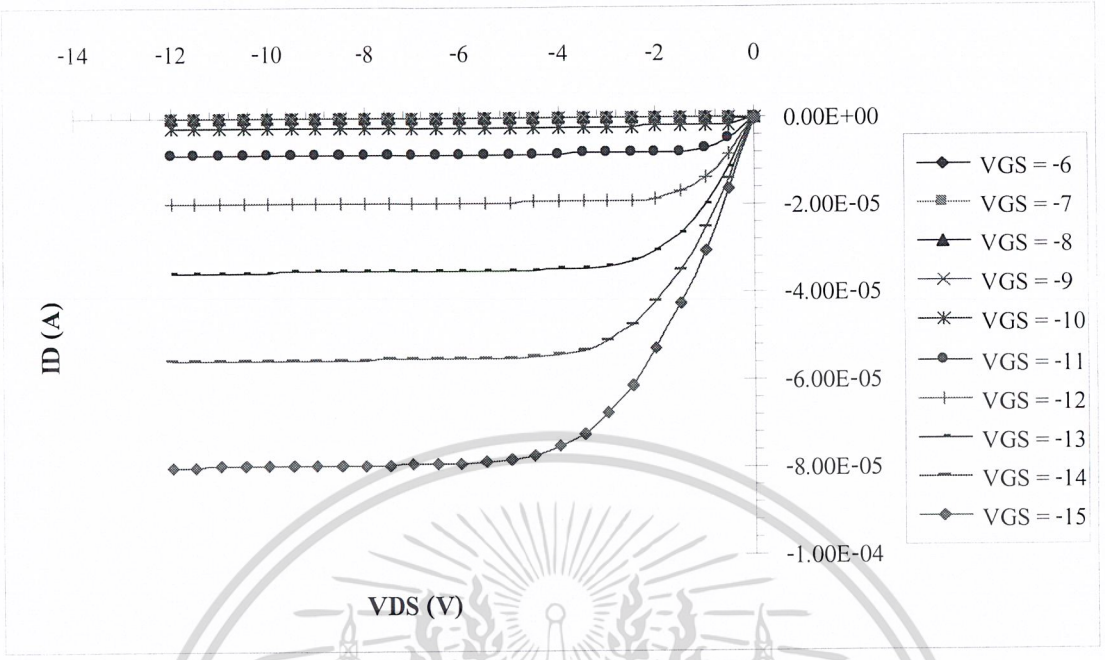


รูป 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm



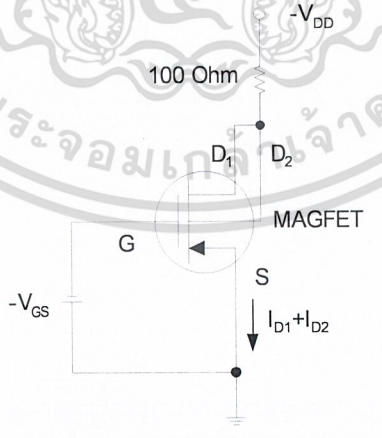
รูป 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 1 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



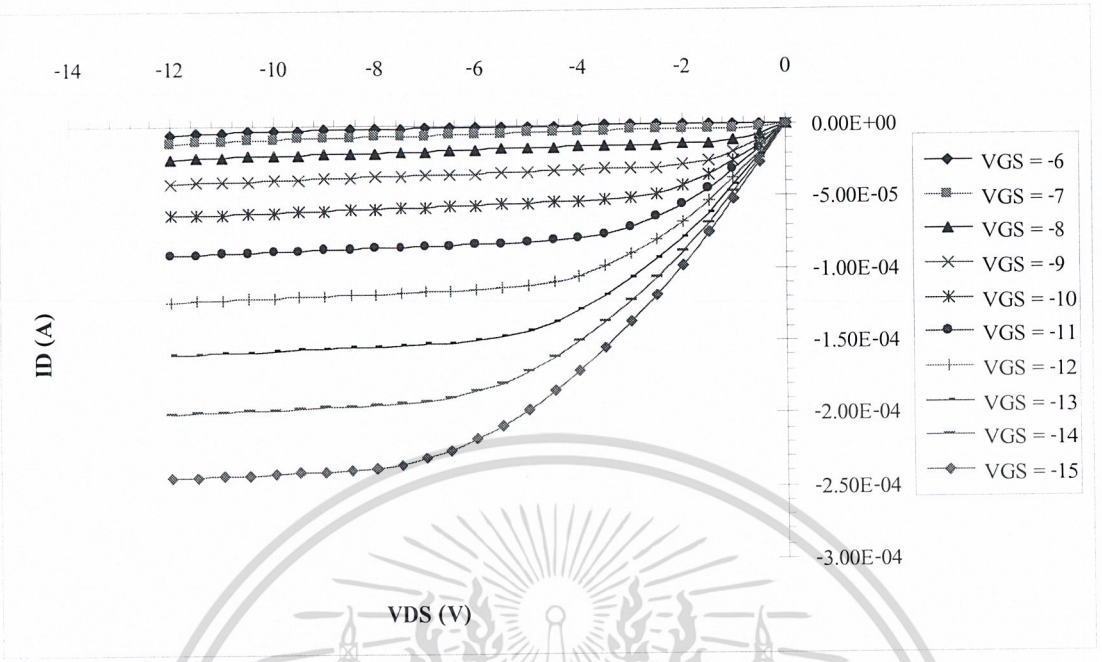
รูป 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ของ เดรน 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm

(2) เพื่อวัดหากระแสรวมของเดรนทั้งสอง วงจรที่ใช้ในการวัดแสดงดังรูป 5.15

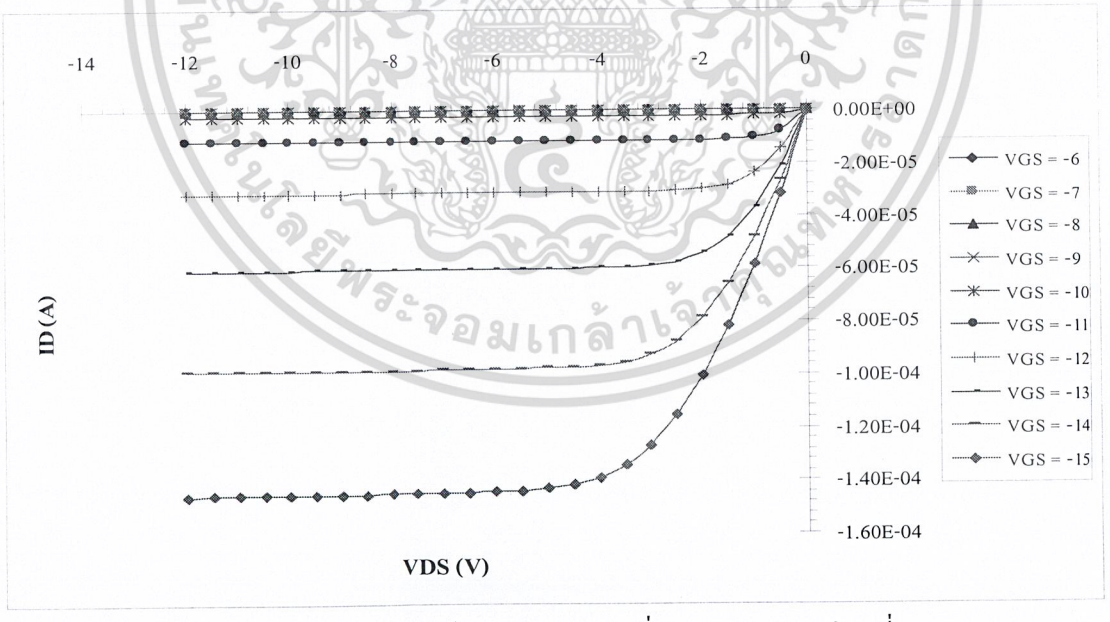


รูป 5.15 วงจรการให้ bias กับเดรนทั้งสอง เพื่อวัดหาค่ากระแสรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



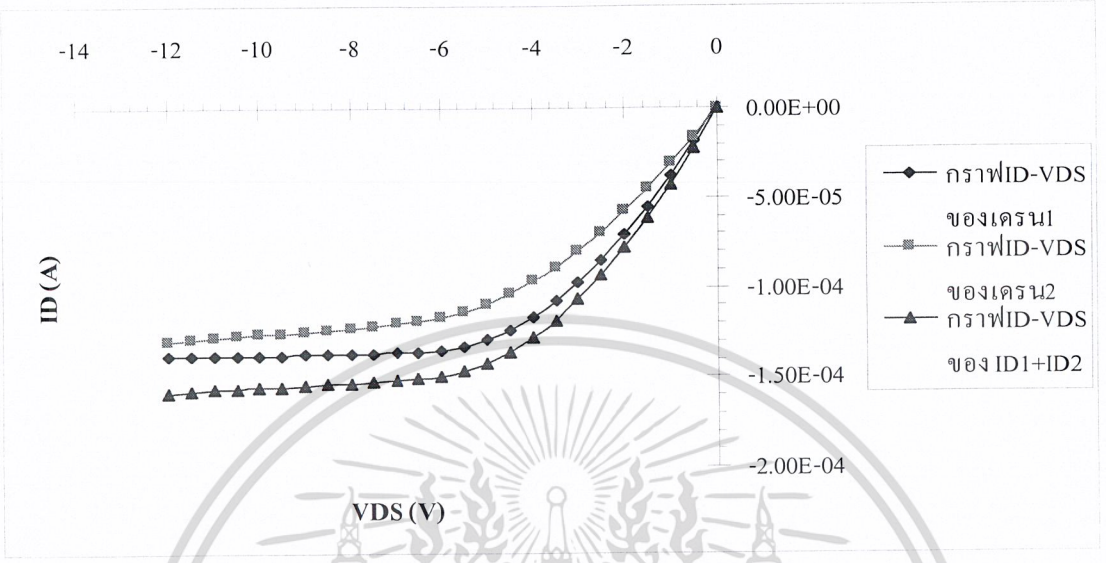
รูป 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ โดยที่กระแส $I_D = I_{D1}+I_{D2}$ ของMAGFET ตัวที่ 2 W = 190 μm, L = 110 μm, d = 10 μm



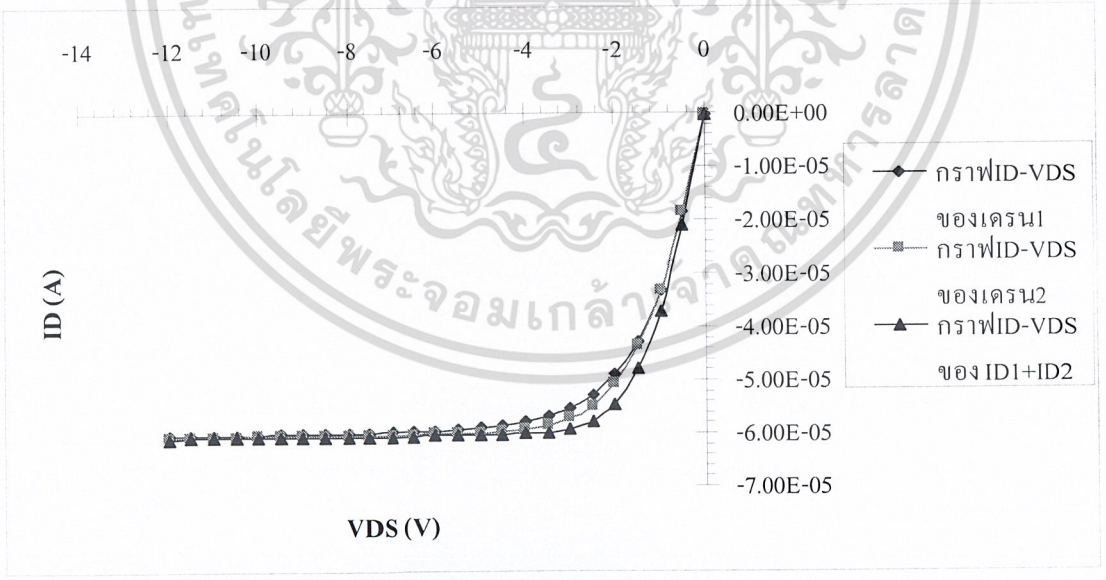
รูป 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D-V_{DS} ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ โดยที่กระแส $I_D = I_{D1}+I_{D2}$ ของMAGFET ตัวที่ 3 W = 190 μm, L = 60 μm, d = 10 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดคุณสมบัติในลักษณะต่าง ๆ แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังกราฟต่อไปนี้

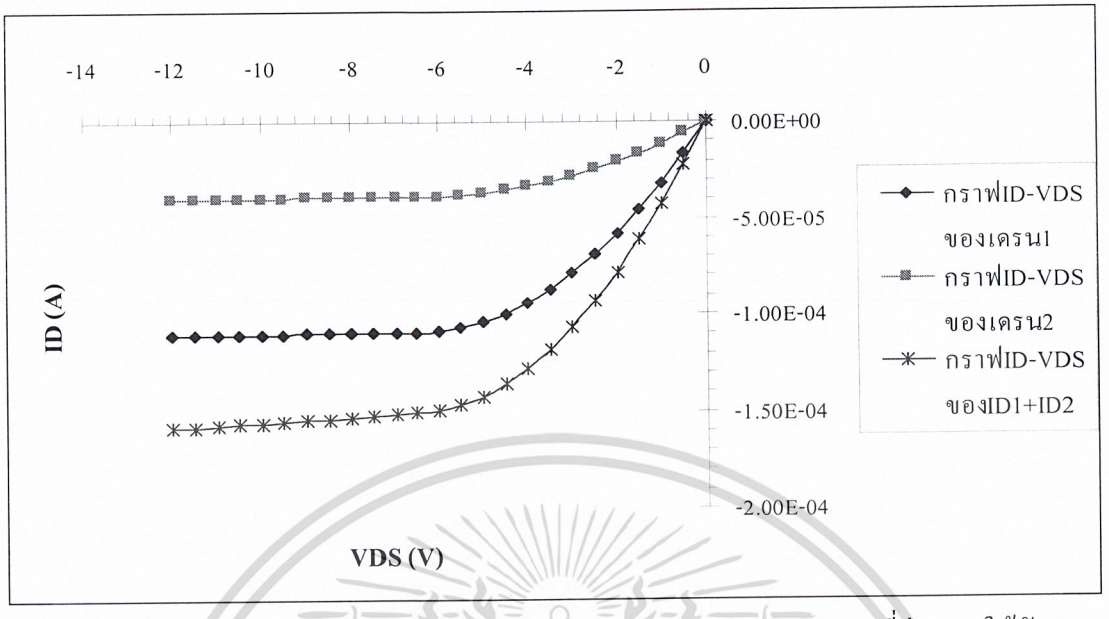


รูป 5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสเดรน 1(I_{D1}) เดรน 2 (I_{D2}) ขณะที่ได้รับ bias เพียงเดรนเดียว ดังวงจรในรูป 5.5 และ กระแสเดรนรวม ($I_{D1}+I_{D2}$) ดังวงจรในรูป 5.15 ในขณะที่ แต่ละวงจรได้รับ V_{GS} = -13V (MAGFET ตัวที่ 2)

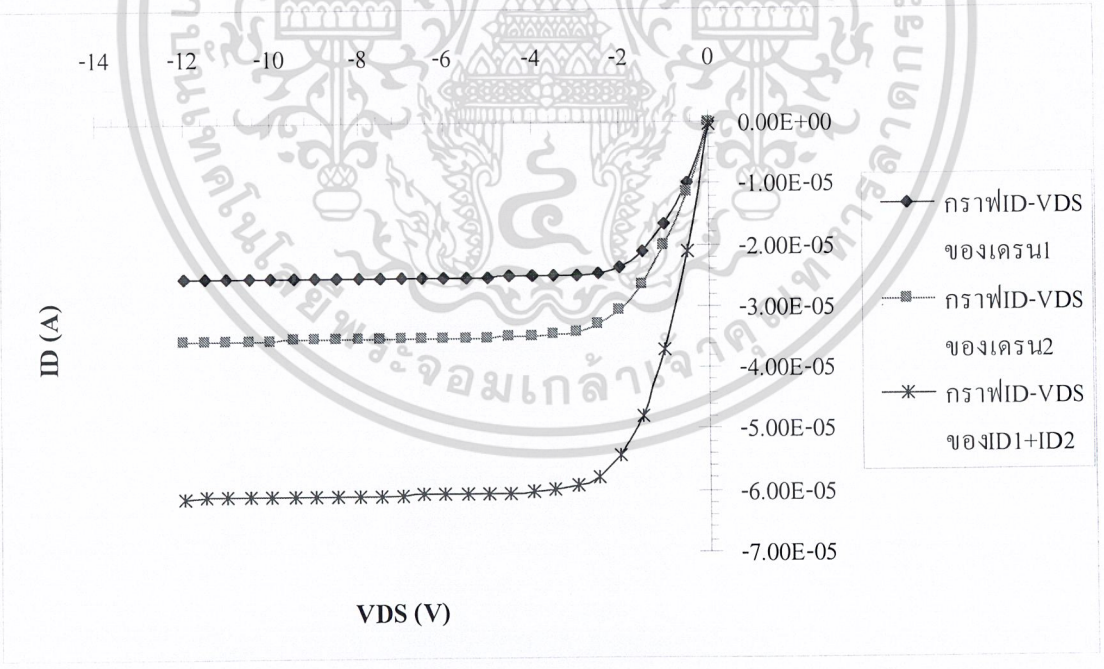


รูป 5.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสเดรน 1(I_{D1}) เดรน 2 (I_{D2}) ขณะที่ได้รับ bias เพียงเดรนเดียว ดังวงจรในรูป 5.5 และ กระแสเดรนรวม ($I_{D1}+I_{D2}$) ดังวงจรในรูป 5.15 ในขณะที่ แต่ละวงจรได้รับ V_{GS} = -13V (MAGFET ตัวที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสเดรน 1(I_{D1}) เดรน 2 (I_{D2}) ขณะที่จ่ายbiasให้กับเดรนทั้งสอง ดังวงจรในรูป 5.10 และ กระแสเดรนรวม (I_{D1}+I_{D2}) ดังวงจรในรูป 5.15 ในขณะที่ แต่ละวงจรได้รับ V_{GS} = -13V (MAGFETตัวที่ 2)

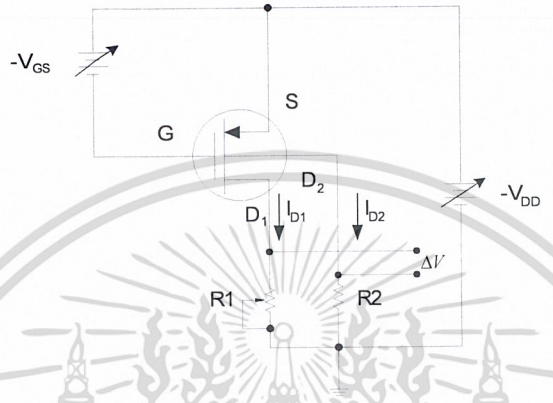


รูป 5.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสเดรน 1(I_{D1}) เดรน 2 (I_{D2}) ขณะที่จ่ายbiasให้กับเดรนทั้งสอง ดังวงจรในรูป 5.10 และ กระแสเดรนรวม (I_{D1}+I_{D2}) ดังวงจรในรูป 5.15 ในขณะที่ แต่ละวงจรได้รับ V_{GS} = -13V (MAGFETตัวที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การวัดคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET

เนื่องจาก แมกเฟท ก็จะมีย่านการทำงานอยู่สองย่าน คือ ย่านลิเนียร์(Linear region) กับย่านอิ่มตัว(Saturation region) ดังนั้นการวัดและทดสอบคุณสมบัติอุปกรณ์ ก็จะมีการวัดและทดสอบทั้งสองย่าน



รูป 5.22 วงจรวัดคุณสมบัติการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 ย่านลิเนียร์ (Linear region)

ตารางที่ 5.1 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

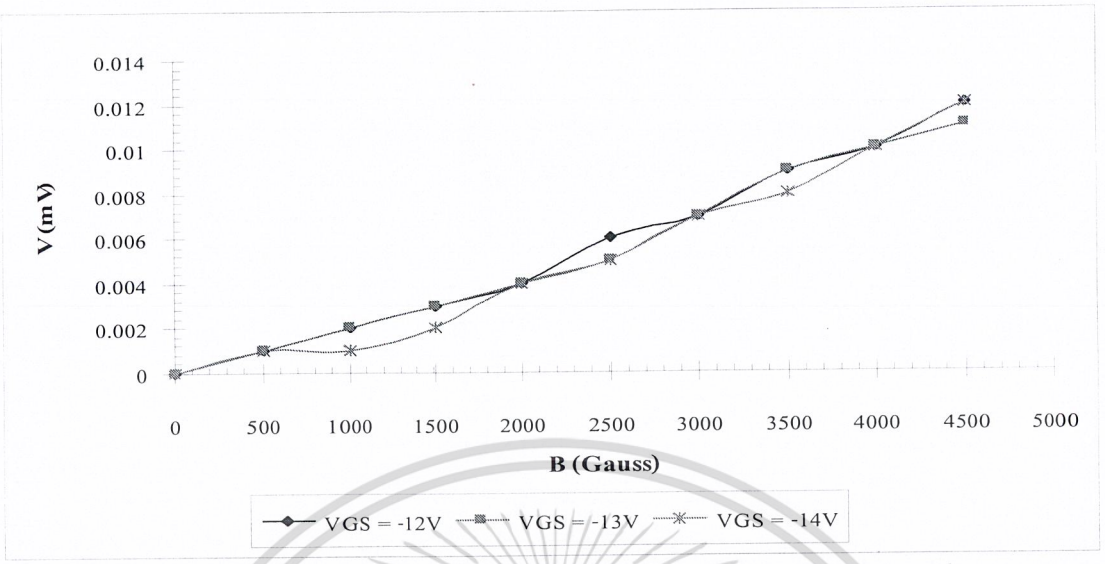
เมื่อ V_{DS} = -1 V

offset : ที่ V_{GS} =-12V คือ 1.741mV, ที่ V_{GS} = -13V คือ 1.950mV

ที่ V_{GS} = -14V คือ 2.141mV

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) (Gauss)	ความแตกต่างแรงดัน (V_{D1}-V_{D2}) (mV)		
	ที่V_{GS} = -12V	ที่V_{GS} = -13V	ที่V_{GS} = -14V
0	0	0	0
500	0.001	0.001	0.001
1,000	0.002	0.002	0.001
1,500	0.003	0.003	0.002
2,000	0.004	0.004	0.004
2,500	0.006	0.005	0.005
3,000	0.007	0.007	0.007
3,500	0.009	0.009	0.008
4,000	0.01	0.01	0.01
4,500	0.012	0.011	0.012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.23 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-1V

ตารางที่ 5.2 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

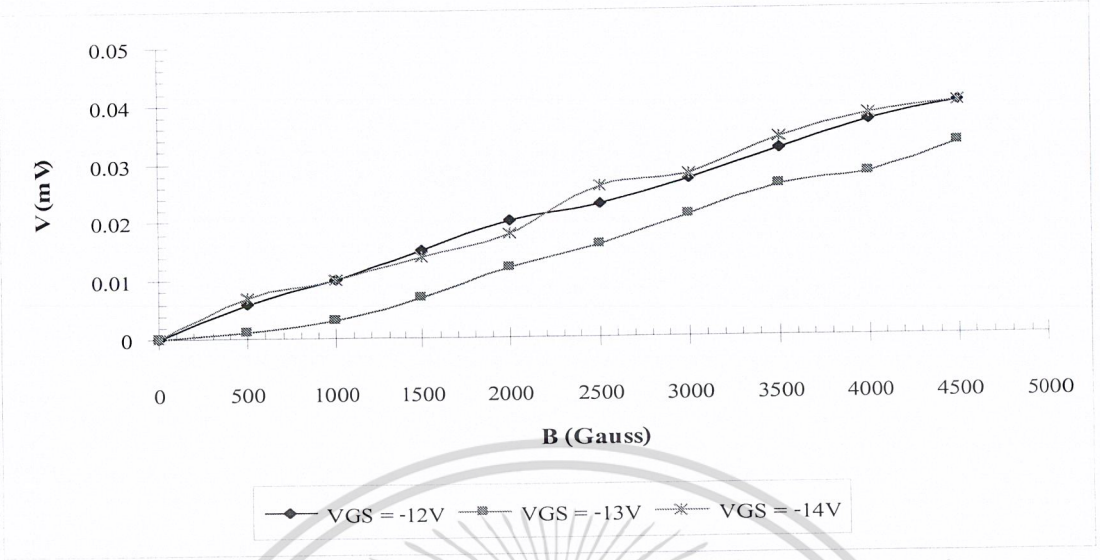
เมื่อ V_{DS} = -3 V

offset : ที่ V_{GS} =-12V คือ 4.193mV, ที่ V_{GS} = -13V คือ 5.001mV

ที่ V_{GS} = -14V คือ 5.692mV

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) (Gauss)	ความแตกต่างแรงดัน (V_{D1}-V_{D2}) (mV)		
	ที่ V_{GS} = -12V	ที่ V_{GS} = -13V	ที่ V_{GS} = -14V
0	0	0	0
500	0.006	0.001	0.007
1,000	0.01	0.003	0.01
1,500	0.015	0.007	0.014
2,000	0.02	0.012	0.018
2,500	0.023	0.016	0.026
3,000	0.027	0.021	0.028
3,500	0.032	0.026	0.034
4,000	0.037	0.028	0.038
4,500	0.04	0.033	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.24 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-3V

ตารางที่ 5.3 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 3 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

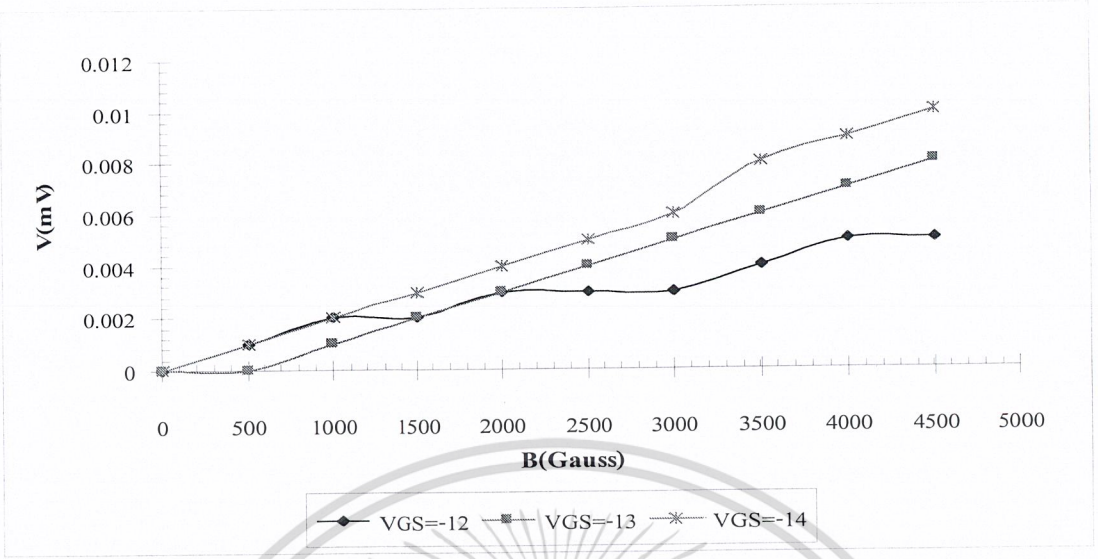
เมื่อ V_{DS} = -1V

offset : ที่ V_{GS} =-12V คือ -0.356mV, ที่ V_{GS} = -13V คือ -0.296mV

ที่ V_{GS} = -14V คือ –0.251mV

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) (Gauss)	ความแตกต่างแรงดัน (V_{D1}-V_{D2}) (mV)		
	ที่ V_{GS} = -12V	ที่ V_{GS} = -13V	ที่ V_{GS} = -14V
0	0	0	0
500	0.001	0	0.001
1,000	0.002	0.001	0.002
1,500	0.002	0.002	0.003
2,000	0.003	0.003	0.004
2,500	0.003	0.004	0.005
3,000	0.003	0.005	0.006
3,500	0.004	0.006	0.008
4,000	0.005	0.007	0.009
4,500	0.005	0.008	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.25 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-1V

ตารางที่ 5.4 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 3 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

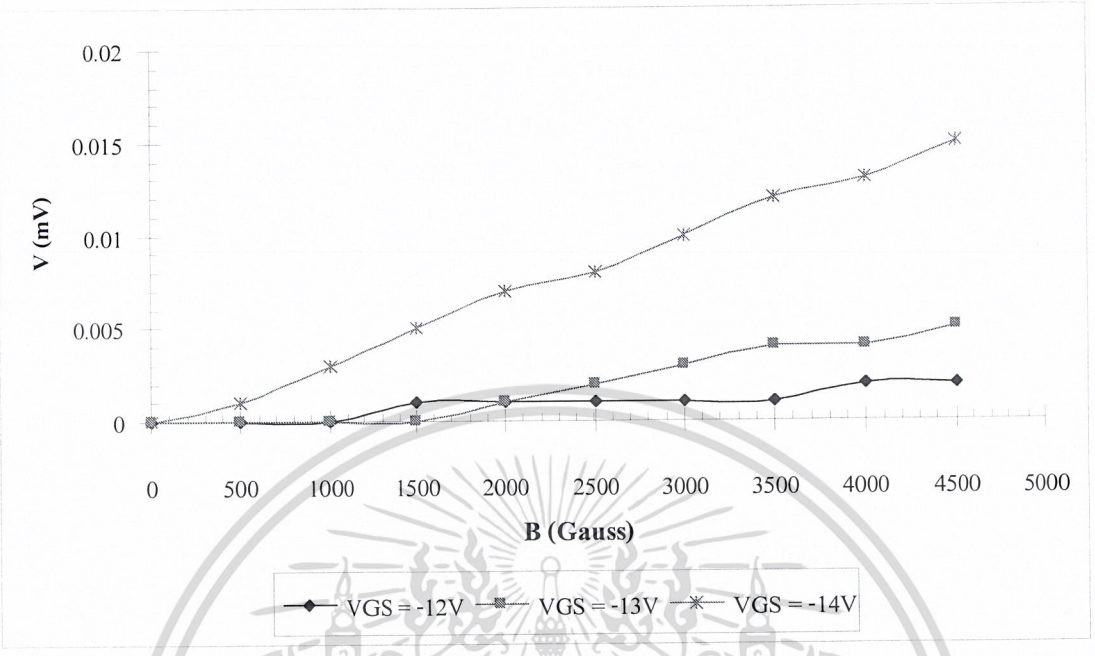
เมื่อ V_{DS} = -3 V

offset : ที่ V_{GS} =-12V คือ -0.718mV, ที่ V_{GS} = -13V คือ -0.884mV

ที่ V_{GS} = -14V คือ -0.903mV

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) (Gauss)	ความแตกต่างแรงดัน (V_{D1}-V_{D2}) (mV)		
	ที่ V_{GS} = -12V	ที่ V_{GS} = -13V	ที่ V_{GS} = -14V
0	0	0	0
500	0	0	0.001
1,000	0	0	0.003
1,500	0.001	0	0.005
2,000	0.001	0.001	0.007
2,500	0.001	0.002	0.008
3,000	0.001	0.003	0.01
3,500	0.001	0.004	0.012
4,000	0.002	0.004	0.013
4,500	0.002	0.005	0.015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.26 กราฟ แสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-3V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ย่านอิ่มตัว (Saturation region)

ตารางที่ 5.5 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

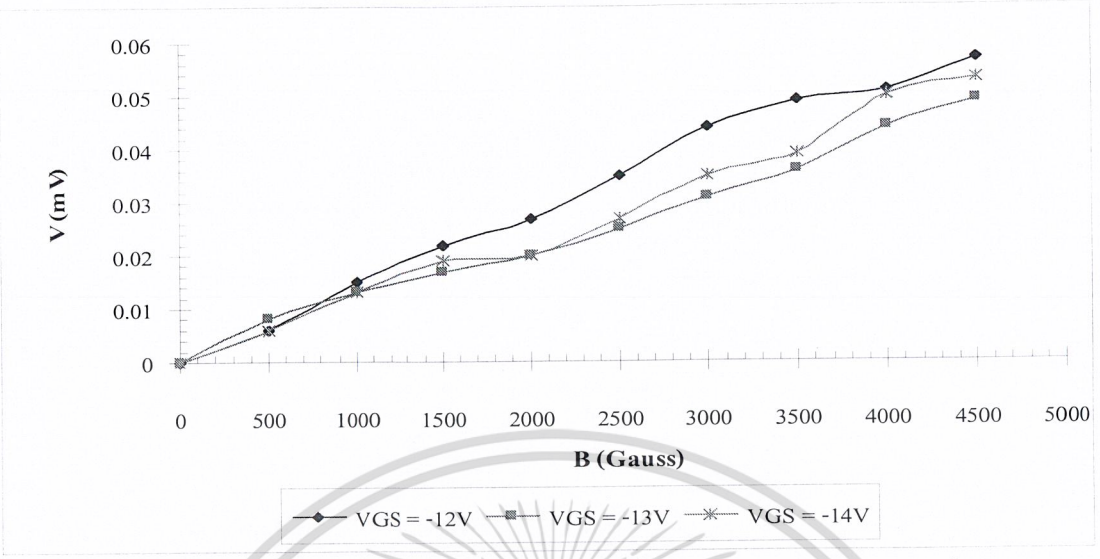
เมื่อ V_{DS} = -6 V

offset : ที่ V_{GS} =-12V คือ 5.074mV, ที่ V_{GS} = -13V คือ 6.855mV

ที่ V_{GS} = -14V คือ -8.572mV

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) (Gauss)	ความแตกต่างแรงดัน (V_{D1}-V_{D2}) (mV)		
	ที่ V_{GS} = -12V	ที่ V_{GS} = -13V	ที่ V_{GS} = -14V
0	0	0	0
500	0.006	0.008	0.006
1,000	0.015	0.013	0.013
1,500	0.022	0.017	0.019
2,000	0.027	0.02	0.02
2,500	0.035	0.025	0.027
3,000	0.044	0.031	0.035
3,500	0.049	0.036	0.039
4,000	0.051	0.044	0.05
4,500	0.057	0.049	0.053

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.27 กราฟ แสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-6V

ตารางที่ 5.6 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 2 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

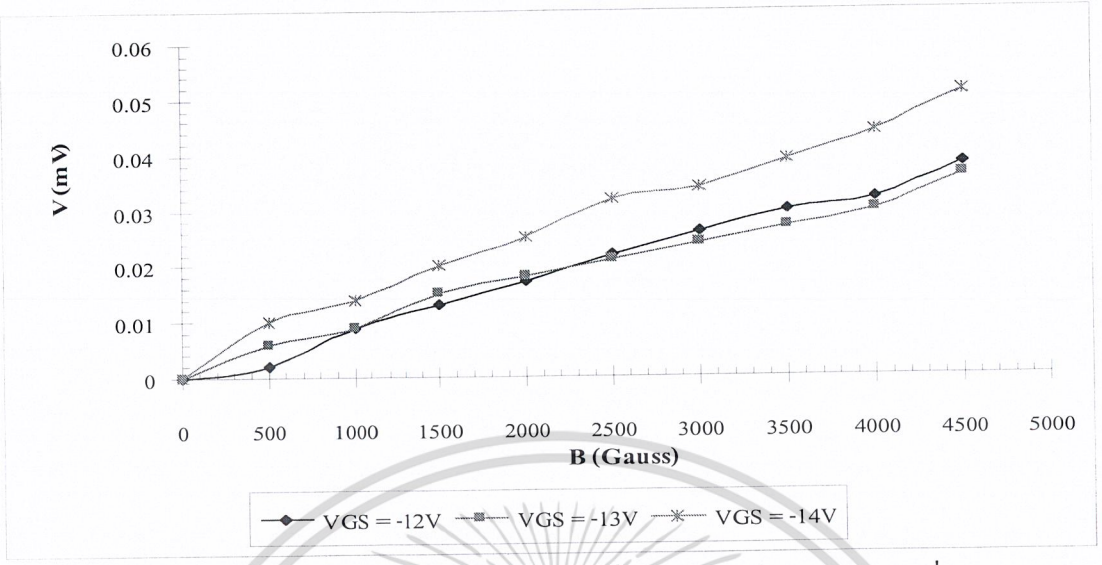
เมื่อ V_{DS} = -12 V

offset : ที่ V_{GS} =-12V คือ 5.019mV, ที่ V_{GS} = -13V คือ 6.989mV

ที่ V_{GS} = -14V คือ 8.914mV

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) (Gauss)	ความแตกต่างแรงดัน (V_{D1}-V_{D2}) (mV)		
	ที่ V_{GS} = -12V	ที่ V_{GS} = -13V	ที่ V_{GS} = -14V
0	0	0	0
500	0.002	0.006	0.01
1,000	0.009	0.009	0.014
1,500	0.013	0.015	0.02
2,000	0.017	0.018	0.025
2,500	0.022	0.021	0.032
3,000	0.026	0.024	0.034
3,500	0.03	0.027	0.039
4,000	0.032	0.03	0.044
4,500	0.038	0.036	0.051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.28 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆขณะที่V_{DS}=-12V

ตารางที่ 5.7 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 3 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

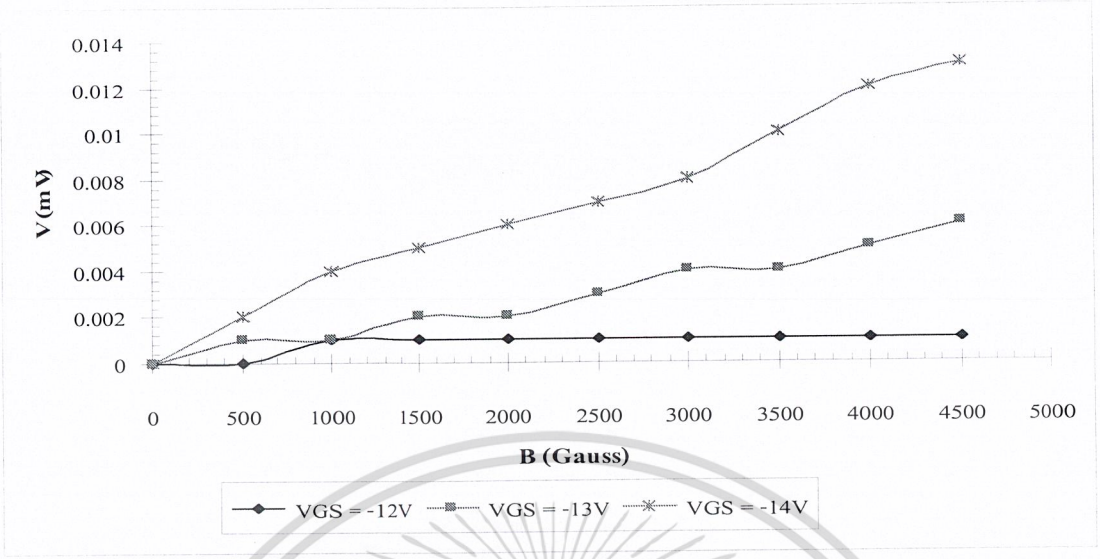
เมื่อ V_{DS} = -6 V

offset : ที่ V_{GS} =-12V คือ -0.723mV, ที่ V_{GS} = -13V คือ -0.971mV

ที่ V_{GS} = -14V คือ -0.191mV

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) (Gauss)	ความแตกต่างแรงดัน (V_{D1}-V_{D2}) (mV)		
	ที่ V_{GS} = -12V	ที่ V_{GS} = -13V	ที่ V_{GS} = -14V
0	0	0	0
500	0	0.001	0.002
1,000	0.001	0.001	0.004
1,500	0.001	0.002	0.005
2,000	0.001	0.002	0.006
2,500	0.001	0.003	0.007
3,000	0.001	0.004	0.008
3,500	0.001	0.004	0.01
4,000	0.001	0.005	0.012
4,500	0.001	0.006	0.013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.29 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่ V_{DS}=-6V

ตารางที่ 5.8 ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของ MAGFET ตัวที่ 3 ที่ V_{GS} ค่าต่าง ๆ

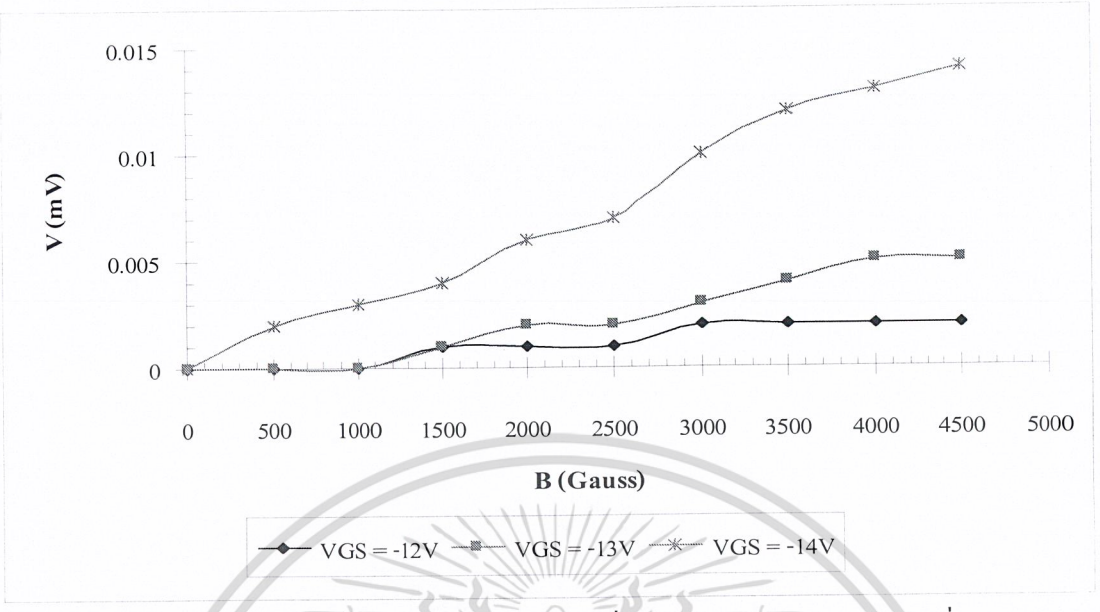
เมื่อ V_{DS} = -12V

offset : ที่ V_{GS} =-12V คือ -0.741mV, ที่ V_{GS} = -13V คือ -0.979mV

ที่ V_{GS} = -14V คือ -1.210mV

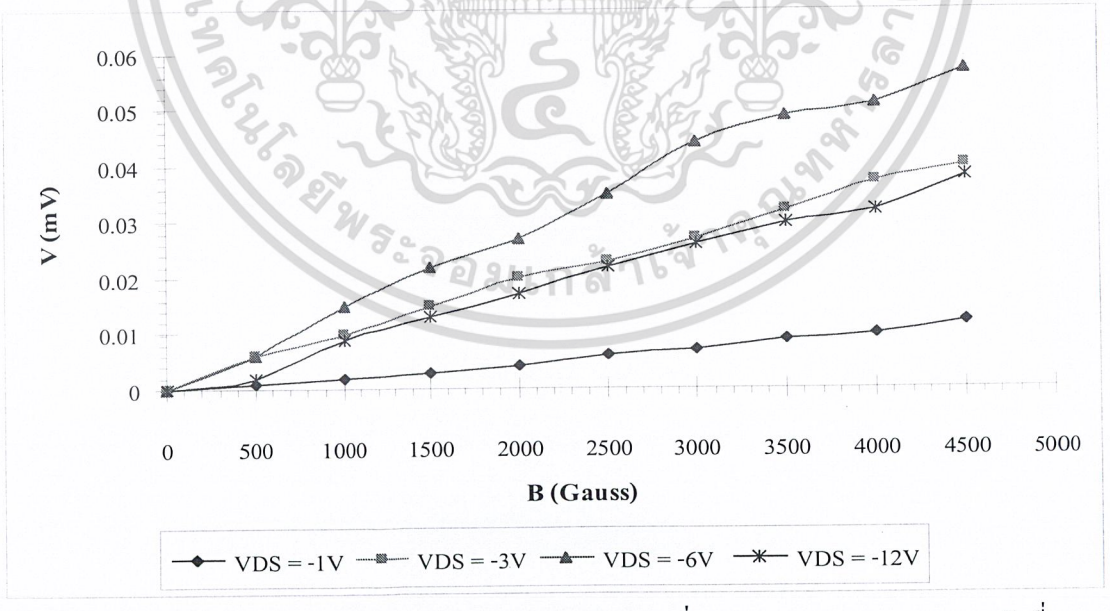
ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) (Gauss)	ความแตกต่างแรงดัน (V_{D1}-V_{D2}) (mV)		
	ที่ V_{GS} = -12V	ที่ V_{GS} = -13V	ที่ V_{GS} = -14V
0	0	0	0
500	0	0	0.002
1,000	0	0	0.003
1,500	0.001	0.001	0.004
2,000	0.001	0.002	0.006
2,500	0.001	0.002	0.007
3,000	0.002	0.003	0.01
3,500	0.002	0.004	0.012
4,000	0.002	0.005	0.013
4,500	0.002	0.005	0.014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



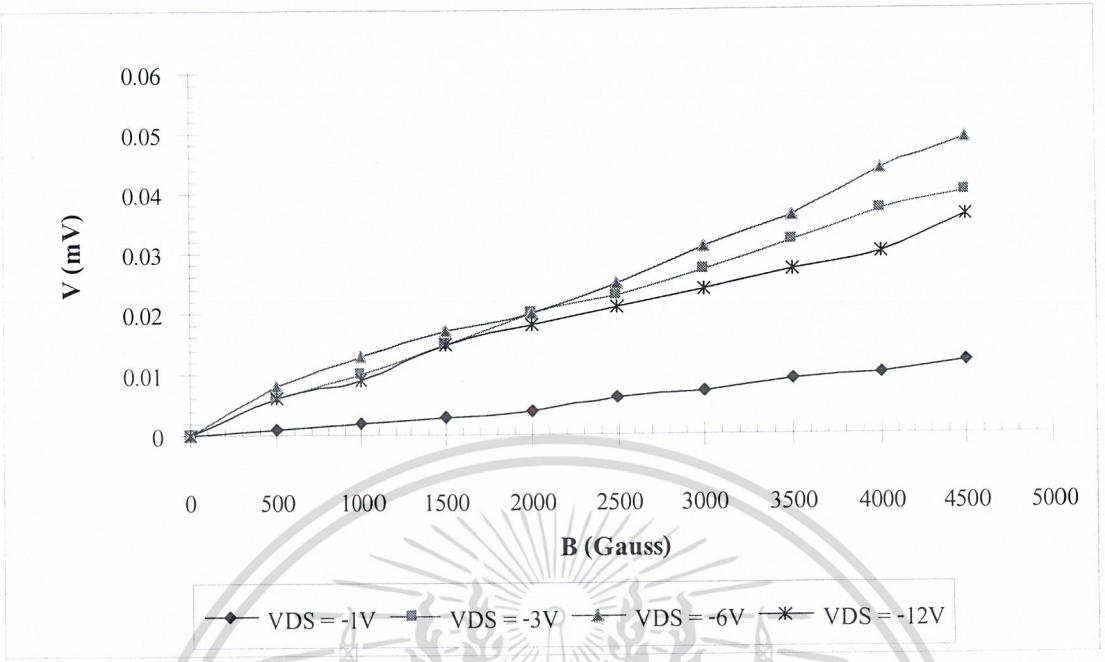
รูป 5.30 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{DS}=-12V

จากนั้นนำค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดผลมาเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ แล้ว plot กราฟออกมาแสดงได้ดังต่อไปนี้

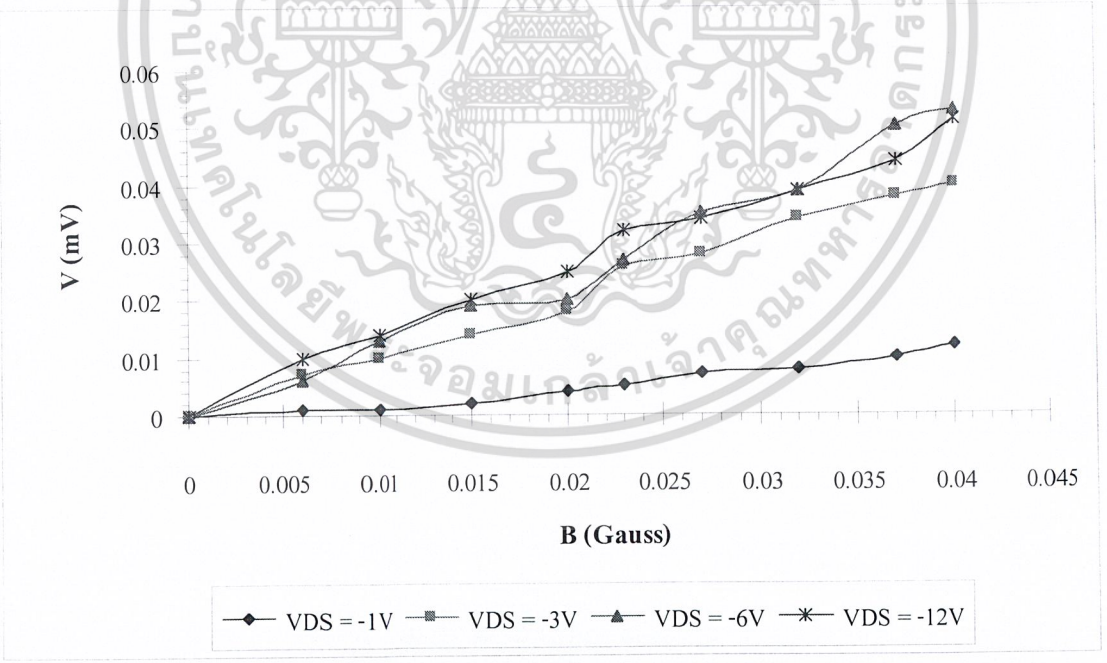


รูป 5.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบV_{DS}ค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{GS} =-12V ของ MAGFET ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

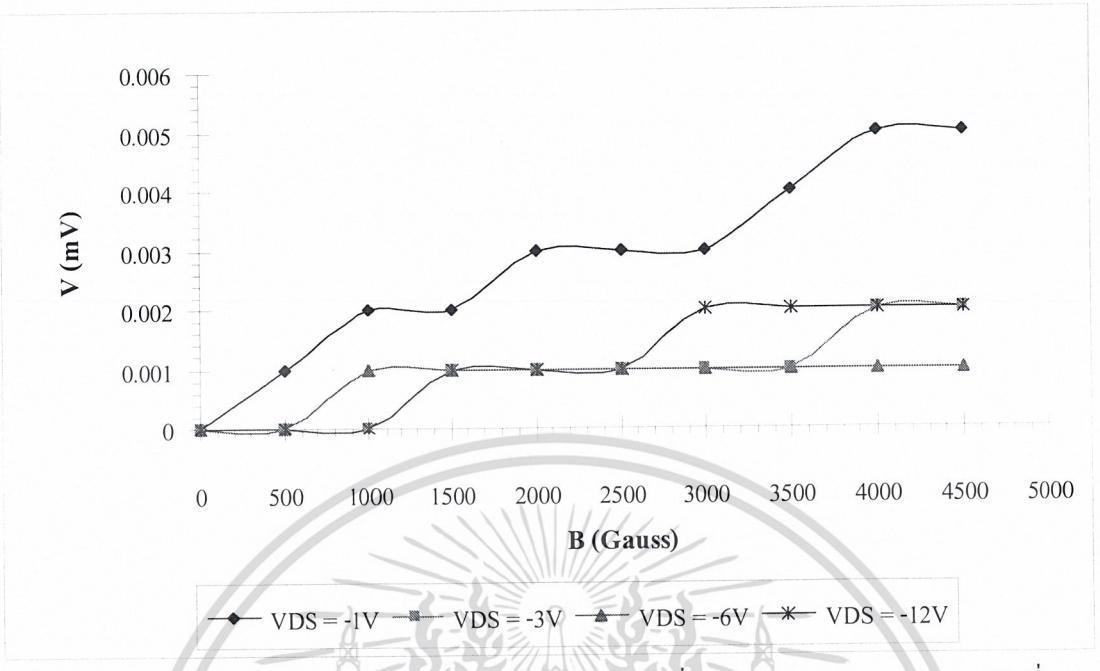


รูป 5.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบV_{DS}ค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{GS} =-13V ของ MAGFET ตัวที่ 2

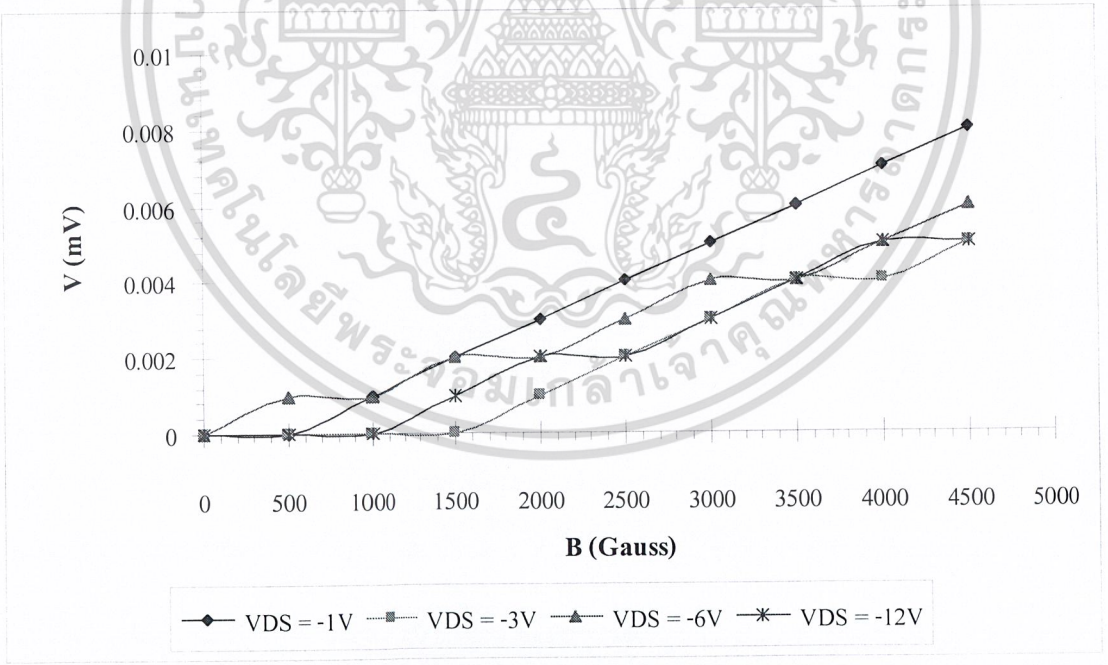


รูป 5.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบV_{DS}ค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{GS} =-14V ของ MAGFET ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

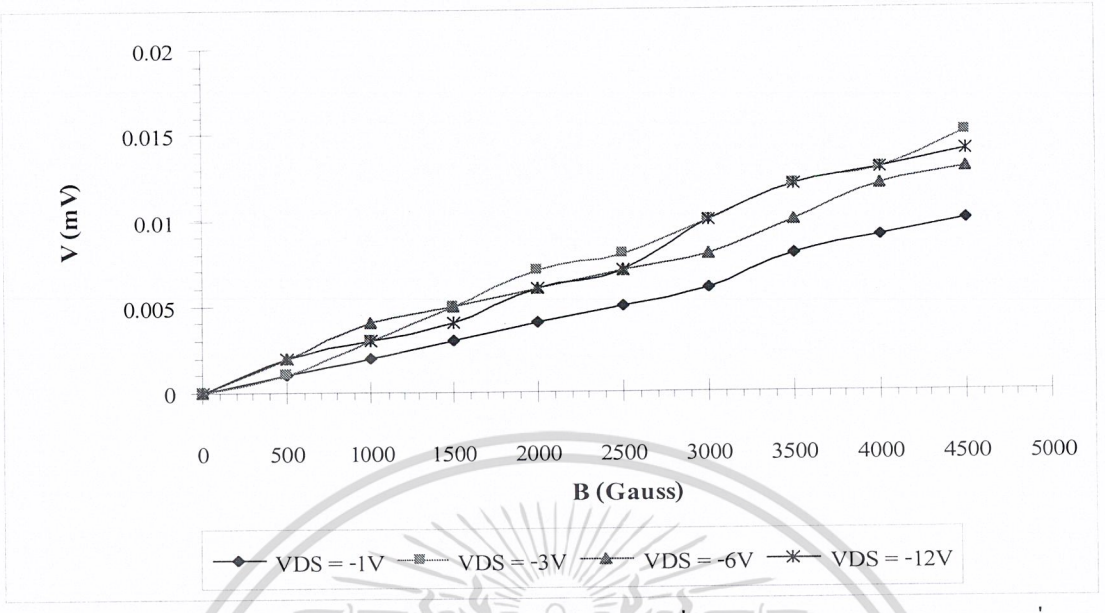


รูป 5.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบV_{DS}ค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{GS} =-12V ของ MAGFET ตัวที่ 3



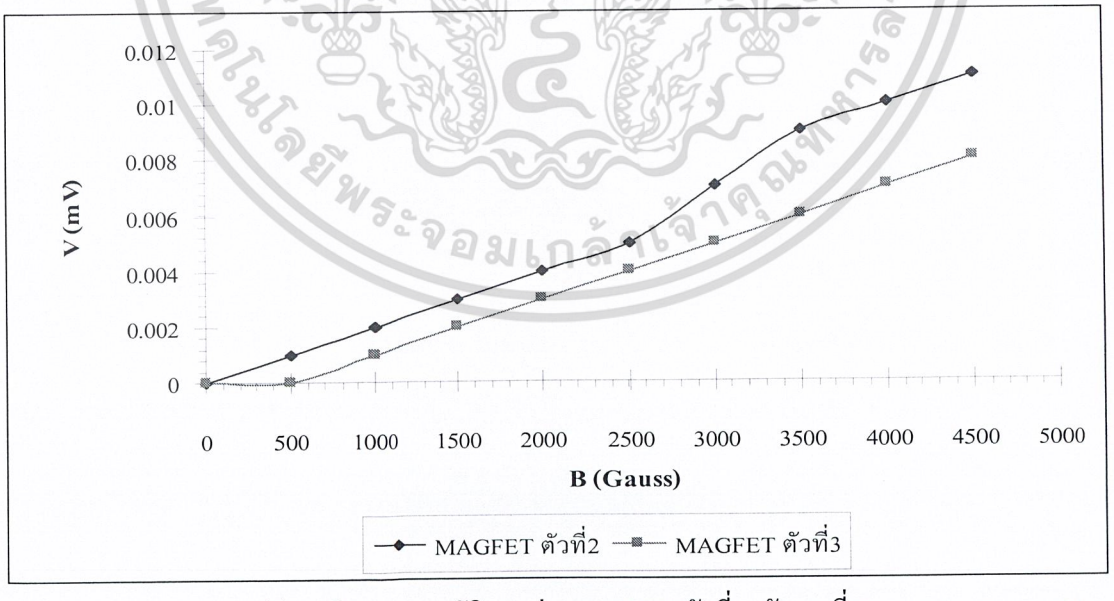
รูป 5.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบV_{DS}ค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{GS} =-13V ของ MAGFET ตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



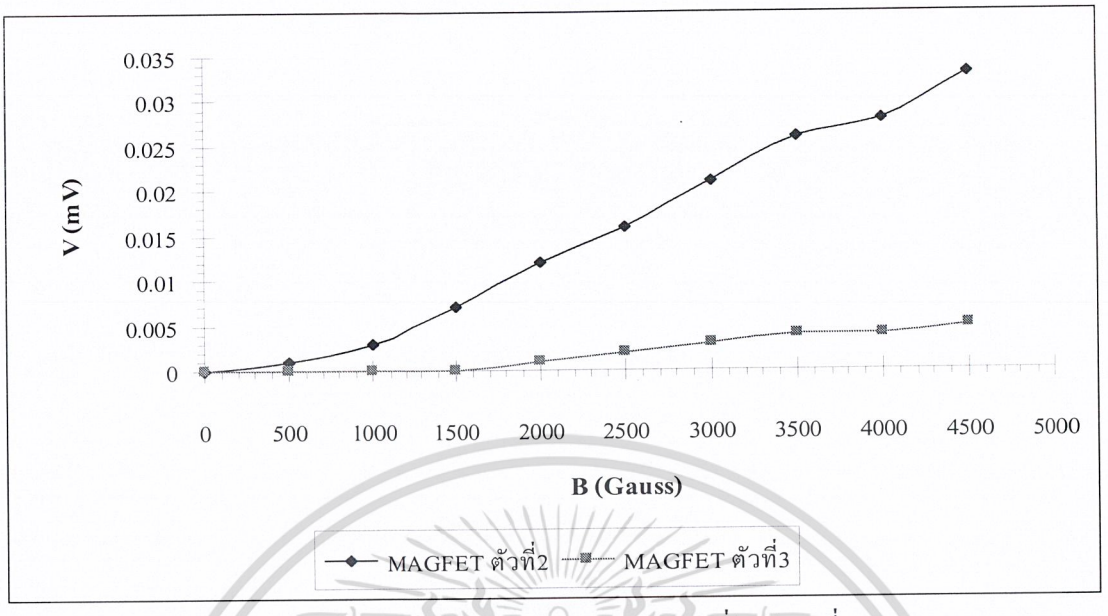
รูป 5.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบV_{DS}ค่าต่าง ๆ ขณะที่V_{GS} =-14V ของ MAGFET ตัวที่ 3

5.2.3 ทำการวัดและทดสอบคุณสมบัติเมื่อแมกเฟทเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแมกเฟทที่มีค่า $\frac{W}{L}$ ต่างๆว่ามีคุณสมบัติแตกต่างกันอย่างไร

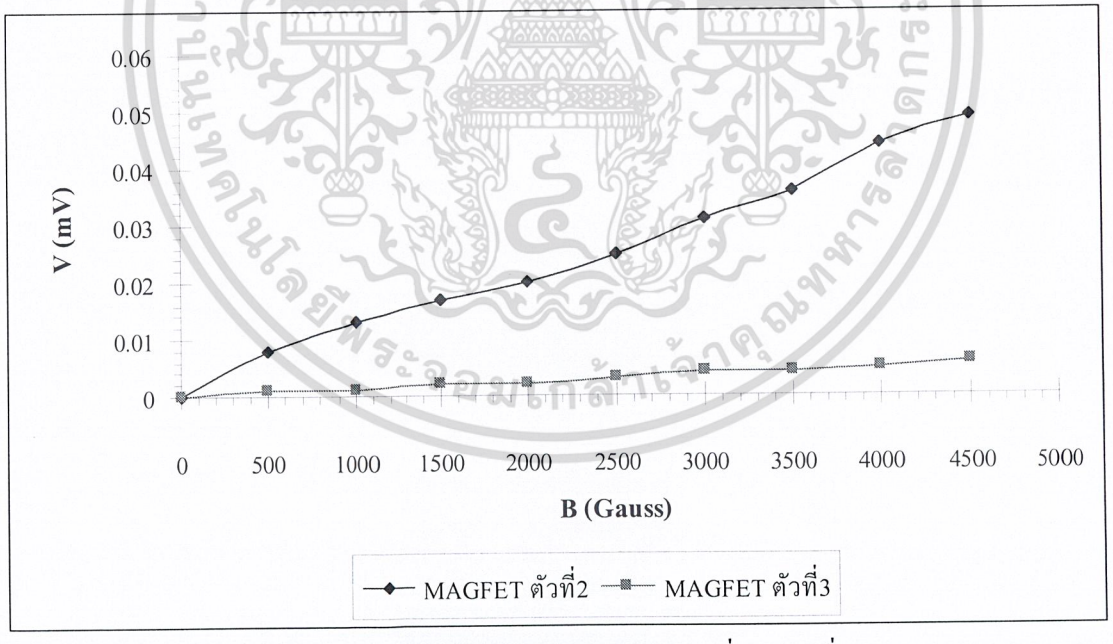


รูป 5.37 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างMAGFETตัวที่ 2 กับ 3 ที่V_{GS} =-13V, V_{DS}=-1V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

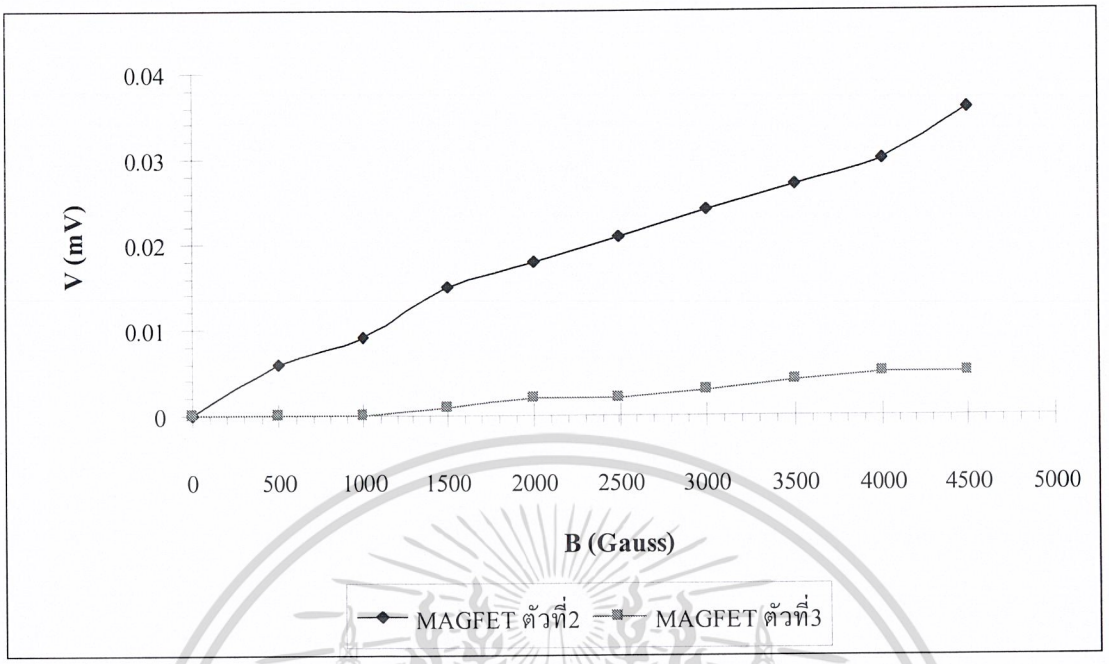


รูป 5.38 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างMAGFETตัวที่ 2 กับ3 ที่V_{GS} =-13V, V_{DS}=-3V



รูป 5.39 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างMAGFETตัวที่ 2 กับ3 ที่V_{GS} =-13V, V_{DS}=-6V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.40 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างMAGFETตัวที่ 2 กับ3 ที่V_{GS} =-13V, V_{DS}=-12V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองขณะที่ MAGFET ยังไม่ได้รับสนามแม่เหล็ก

จากการทดลอง ขณะที่ MAGFET ยังไม่ได้รับสนามแม่เหล็ก MAGFET ทุกตัวจะมีค่าออฟเซ็ทอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งดูได้จากรูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 ขณะที่เราให้ไบอัสแก่ MAGFET เพื่อดูการทำงานเป็น MOSFET จะเห็นได้ว่ากระแสของเดรนทั้งสองจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ใน MAGFET ตัวที่ 2 จากรูปที่ 5.20 นั้นจะมีค่ากระแสที่เดรน 1 มากกว่าเดรน 2 และใน MAGFET ตัวที่ 3 จากรูปที่ 5.21 จะมีค่ากระแสเดรน 2 มากกว่าเดรน 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{GS} จะทำให้ค่าออฟเซ็ทเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าแรงดันออฟเซ็ทของ MAGFET ตัวที่ 2

V_{DS} (V)	แรงดันออฟเซ็ท (mV)		
	ที่ V_{GS}= -12V	ที่ V_{GS}= -13V	ที่ V_{GS}= -14V
-1	1.741	1.950	2.141
-3	4.193	5.001	5.692
-6	5.074	6.855	8.572
-12	5.019	6.989	8.914

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าแรงดันออฟเซ็ทของ MAGFET ตัวที่ 3

V_{DS} (V)	แรงดันออฟเซ็ท (mV)		
	ที่ V_{GS}= -12V	ที่ V_{GS}= -13V	ที่ V_{GS}= -14V
-1	-0.356	-0.296	-0.251
-3	-0.718	-0.884	-0.903
-6	-0.723	-0.971	-0.191
-12	-0.741	-0.979	-1.210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุของการเกิดออฟเซ็ท คือเกิดจากความไม่สมมาตรของเดรนทั้งสอง ซึ่งอาจจะเกิดมาจากอะตอมสารเจือของโบรอนที่เดรนทั้งสองมีค่าความหนาแน่นไม่เท่ากัน หรือขนาดของเดรนทั้งสองไม่เท่ากัน

6.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองขณะที่ MAGFET ได้รับสนามแม่เหล็ก

จากผลการทดลองเมื่อเราให้สนามแม่เหล็กเข้าไปแก่ตัวอุปกรณ์ขณะที่ให้ไบอัสในย่านการทำงานต่างๆ โดยพิจารณา 2 ย่านคือ linear และ Saturated

พิจารณาที่ย่าน Linear โดยให้ V_{DS}=-1 และ -3 ที่ค่า V_{GS} เป็น -12 V,-13V และ -14V เนื่องจากว่าค่า V_T ของ MAGFET ตัวที่2 ประมาณ 8 V และตัวที่ 3 ประมาณ 10 Vเพราะนั้นการให้ V_{DS}=-1V และ -3V ถือว่าอยู่ในย่านLinear ทั้ง 2 ตัว ซึ่งที่ V_{DS}=-1V ถือว่าlinearน้อยๆ และที V_{DS}= -3V ถือว่าเป็นค่าที่อยู่ใกล้จุดที่ V_{DS} มีค่าใกล้เคียงกับ $V_{GS} - V_T$ จากกราฟของ MAGFET ตัวที่ 2 จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลต่างของแรงดันเอาท์พุทของเดรน1 และเดรน 2 เทียบกับสนามแม่เหล็กคือ

$$\left.\frac{\Delta V(\text{mV})}{\Delta B(\text{Gauss})}\right|_{VDS=-1\text{V}} = \frac{0.012}{4500} = 2.6\mu$$

$$\left.\frac{\Delta V(\text{mV})}{\Delta B(\text{Gauss})}\right|_{VDS=-3\text{V}} = \frac{0.045}{4500} = 10\mu$$

และกราฟของ MAGFET ตัวที่ 3 จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลต่างของแรงดันเอาท์พุทของเดรน1 และเดรน 2 เทียบกับสนามแม่เหล็กคือ

$$\left.\frac{\Delta V(\text{mV})}{\Delta B(\text{Gauss})}\right|_{VDS=-1\text{V}} = \frac{0.01}{4500} = 2.2\mu$$

$$\left.\frac{\Delta V(\text{mV})}{\Delta B(\text{Gauss})}\right|_{VDS=-3\text{V}} = \frac{0.015}{4500} = 3.3\mu$$

จากการการเปรียบเทียบผลที่ได้พบว่าทั้ง MAGFET ตัวที่ 2 และ 3 อัตราการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ V_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้น หรือมีค่าเข้าใกล้ $V_{GS} - V_T$

พิจารณาย่าน Saturated โดยให้ V_{DS}= -6 และ -12 ที่ค่า V_{GS} เป็น -12 V,-13V และ -14เนื่องจากว่าค่า V_T ของ MAGFET ตัวที่2 ประมาณ 8 V และตัวที่ 3 ประมาณ 10 Vเพราะนั้นการให้ V_{DS}=-6V และ -12V ถือว่าอยู่ในย่าน Saturated ทั้ง 2 ตัว ซึ่งที่ V_{DS}=-6V ถือว่า Saturated น้อยๆ และที V_{DS}=-12V ถือว่าเป็นค่าที่ Saturated มาก ๆ จากกราฟของ MAGFET ตัวที่ 2 จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลต่างของแรงดันเอาท์พุทของเดรน1 และเดรน 2 เทียบกับสนามแม่เหล็กคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left.\frac{\Delta V(\text{mV})}{\Delta B(\text{Gauss})}\right|_{VDS=-6\text{V}} = \frac{0.06}{4500} = 13\mu$$

$$\left.\frac{\Delta V(\text{mV})}{\Delta B(\text{Gauss})}\right|_{VDS=-12\text{V}} = \frac{0.055}{4500} = 12\mu$$

และจากกราฟของ MAGFET ตัวที่ 3 จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลต่างของแรงดันเอาท์พุทของเดรน1 และเดรน 2 เทียบกับสนามแม่เหล็กคือ

$$\left.\frac{\Delta V(\text{mV})}{\Delta B(\text{Gauss})}\right|_{VDS=-6\text{V}} = \frac{0.013}{4500} = 2.8\mu$$

$$\left.\frac{\Delta V(\text{mV})}{\Delta B(\text{Gauss})}\right|_{VDS=-12\text{V}} = \frac{0.014}{4500} = 3.1\mu$$

ฉะนั้น MAGFET ตัวที่ 2 จากรูปที่ 5.31 ถึง รูปที่ 5.33 ที่ V_{GS}ต่างๆ และ V_{DS}=-6 V จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อสนามแม่เหล็กที่ดีที่สุด และ MAGFET ตัวที่ 3 จากรูปที่ 5.34 ถึง รูปที่ 5.35 ที่ V_{GS}ต่างๆ และ V_{DS}=-1 V จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อสนามแม่เหล็กที่ดีที่สุด

6.3 เปรียบเทียบผลของ *W/L* ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก

เนื่องจาก MAGFET ตัวที่ 2 มีค่า $\frac{W}{L} = \frac{190}{110}$ และ MAGFET ตัวที่ 3 มีค่า $\frac{W}{L} = \frac{190}{60}$ ซึ่งทั้งสองตัวมีค่าระยะห่างระหว่างเดรน1 และ เดรน2 มีค่าเท่ากันคือ 10 μm จากกราฟทั้งในย่าน Linear รูปที่ 5.37 ถึง รูปที่ 5.38 และย่าน Saturate รูปที่ 5.39 ถึง รูปที่ 5.40 MAGFET ตัวที่ 2 จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อสนามแม่เหล็กที่ดีกว่า MAGFET ตัวที่ 3 ทุกค่าของ V_{GS} และ V_{DS} เดียวกัน และสาเหตุที่เป็นเช่นนี้วิเคราะห์ได้ว่าเกิดจากการที่ตัวอุปกรณ์ซึ่งโดยโครงสร้างแล้วเป็น MOSFET และเมื่อเปรียบเทียบค่า L ของทั้งสองตัวซึ่งเท่ากับ 110 μm สำหรับ MAGFET ตัวที่ 2 และ 60 μm สำหรับ MAGFET ตัวที่ 3 ฉะนั้นเมื่อ MOSFET นำกระแสและมีสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับแชลแนลที่เกิด จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะและทำให้ค่าของกระแสเดรนทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน และระยะทางระหว่างขาซอสกับขาเดรนก็เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างเช่นกัน และผลที่ได้จากการทดลองนี้สามารถอ้างอิงได้กับสมการ (2.66) ซึ่งเป็นสมการความไวของ MAGFET ดังนี้

$$S = G\mu_{nch} * \frac{L}{W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ μ_{nch} คือ สภาพคล่องของฮอลล์ (Hall mobility)

G เป็น Geometric correction factor ของอุปกรณ์

ฉะนั้นการที่ L มากจึงทำให้มี Sensitivity ที่ดีด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างและทดลองตลอดจนนำตัวอุปกรณ์ที่ได้มาทดสอบและวัดคุณสมบัติพบว่าผลที่ได้จากการสร้างตัวอุปกรณ์ 4 ตัว โดยทั้ง 4 ตัวจะสามารถเปรียบเทียบได้ครบทุกพารามิเตอร์ คือ เปรียบเทียบ ผลของ W , L และ ระยะห่างระหว่างเดรน1 และ เดรน2 (d) แต่ในกระบวนการสร้างจริงที่ได้ผลที่ไม่สามารถเปรียบเทียบได้ครบทุกพารามิเตอร์ที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์

โดย MAGFET ตัวที่1 W=110 μm , L=110 μm , d=10 μm มีคุณสมบัติที่ไม่เป็น MOSFET

MAGFET ตัวที่2 W=190 μm , L=110 μm , d=10 μm มีคุณสมบัติที่เป็น MOSFET

MAGFET ตัวที่3 W=190 μm , L=60 μm , d=10 μm มีคุณสมบัติที่เป็น MOSFET

MAGFET ตัวที่4 W=190 μm , L=60 μm , d=30 μm มีคุณสมบัติที่ไม่เป็น MOSFET

โดยอุปกรณ์ตัวที่ใช้เปรียบเทียบผลที่มีต่อการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้แก่

MAGFET ตัวที่3 กับ MAGFET ตัวที่4 จะใช้เปรียบเทียบผลของ d

MAGFET ตัวที่2 กับ MAGFET ตัวที่3 จะใช้เปรียบเทียบผลของ L

MAGFET ตัวที่1 กับ MAGFET ตัวที่2 จะใช้เปรียบเทียบผลของ W

ฉะนั้นจึงสามารถเปรียบเทียบได้เฉพาะ MAGFET ตัวที่2 กับ MAGFET ตัวที่3 และทั้งสองตัวนี้มีค่าระยะห่างระหว่างเดรนทั้งสองมีค่าเท่ากันซึ่งเปรียบเทียบผลของ $\frac{W}{L}$ ผลที่ได้คือ $\frac{W}{L}$ มีค่าน้อยจะสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าค่า $\frac{W}{L}$ ที่มีค่ามาก และค่าของ V_T ของMAGFET ทั้งสองตัวก็มีค่าไม่เท่ากันคือ V_T ประมาณ -8 V สำหรับDevice ตัวที่สอง และ V_Tประมาณ-10 V สำหรับDevice ตัวที่สาม ซึ่งถือว่ามีค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ MOSFET ทั่วๆไป ฉะนั้นการที่จะทำให้MAGFET มีความไวหรือสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีที่สุดคือการไบอัสให้ MAGFET มีย่านการทำงานที่อยู่ใกล้จุดที่ทำให้ V_{DS} มีค่าใกล้เคียงกับผลต่างของ V_{GS} กับ V_T มากที่สุด และค่าของผลต่างของแรงดันระหว่างเดรนทั้งสองจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามสนามแม่เหล็กที่จ่ายให้แก่ MAGFET

แนวทางในการที่จะพัฒนาMAGFET เพื่อที่จะให้มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดียิ่งขึ้นโดยวิเคราะห์จากผลการทดลองคือควรที่จะทำให้ค่าของ L มีค่าที่มากขึ้นซึ่งจะทำผลต่างของกระแสเดรนมีค่ามากขึ้นด้วย และอีกอย่างคือน่าจะมีการลดค่า V_T ให้ต่ำลงให้ต่ำกว่านี้ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการจัดไบอัสซึ่งการที่จะลดค่าของ V_T นี้สามารถควบคุมได้จากขบวนการในการสร้าง ซึ่งมีพารามิเตอร์หลายตัวที่เกี่ยวของกับค่า V_T นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์ ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ และคุณสมบัติของซิลิกอนคุณสมบัติของซิลิกอน

สัญลักษณ์

k	Boltzmann's constant (J/K), wave number (cm^{-1})
n, p	Electron and hole concemtration (cm^3)
	Index of reflaction
n_i	Intrinsic concentration of electrons (cm^3)
n_0, p_0	Thermal-equilibrium concentration of electron and hole4 (cm^3)
n_p, p_n	Minority carrier electon and minority carrier hole concentration (cm^3)
n_{p0}, p_{n0}	Thermal-equilibrium minority carrier electron and minority carrier hole concentration (cm^3)
q	absolute value of the electron charge
t_{ox}	Gate oxide thickness (cm or $\mathring{A}$)
$\vec{v}$	Velocity (cm/sec)
v_d	Carrier drift velocity (cm/sec)
x, y, z	Cartesian coordinates
A	Area (cm^2)
$\vec{B}$	Magnetic flux density (Wb/m^2)
B_Z	applied magnetic field along the z-direction, transverse to J_x (T)
C	Capacitance
C_j	Junction capacitance per unit area (F/cm^2)
C_{ox}	Gate oxide capacitance per unit area (F/cm^2)
E_H	Hall electric field (V/cm)
E_x	applied electronic field along the x-direction of current flow, J_x (Vm^{-1})
E_y	Electric field along the y-direction (or the Hall field), transverse to J_x and B_z (Vm^{-1})
$\vec{F}$	Force (N)
G	geometric correction factor
I	Current (A)
$\vec{J}_n, \vec{J}_p$	Electron and hole electric current density (A/cm^2)

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J_x current density along x (A m^{-2})

J_y current density along y (A m^{-2})

N Number density (cm^{-3})

N_a Density of acceptor impurity atoms (cm^{-3})

N_d Density of donor impurity atoms (cm^{-3})

R_H Hall coefficient (m^3C^{-1})

T Temperature (kelvin), kinetic energy (joule of eV), transmission coefficient

V Potential (Volt), potential energy (joule of eV)

V_H Hall voltage

ε Permittivity (F/cm^2)

ε_0 Permittivity of free space (F/cm^2)

ε_{ox} Permittivity of an oxide (F/cm^2)

ε_r Relative permittivity or dielectric constant

ε_s Permittivity a semiconductor (F/cm^2)

μ Permittivity (H/cm)

μ_n, μ_p Electron and hole mobility (cm^2/V-sec)

μ_0 Permittivity of free space (H/cm)

μ^* Hall mobility

τ Lifetime (sec)

τ_n, τ_p Electron and hole lifetime (sec)

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
Avogadro's constant	N_A	$6.02 \times 10^{+23}$	Atom per gram molecular weight
Boltzmann's constant	k	$= 1.38 \times 10^{-23}$ $= 8.62 \times 10^{-5}$	J/K eV/K
Electronic charge (magnitude)	e	1.60×10^{-19}	C
Free electron rest mass	m_0	9.11×10^{-31}	Kg
Permeability	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
Permittivity of free space	ε_0	$= 8.85 \times 10^{-14}$ $= 8.85 \times 10^{-12}$	F/cm F/m
Planck's constant	h	$= 6.625 \times 10^{-34}$ $= 4.135 \times 10^{-15}$	J-s eV-s
Proton rest mass	M	1.67×10^{-27}	Kg
Speed of light in vacuum	c	2.998×10^{10}	cm/s
Thermal voltage ($T = 300K$)	$V_t = \frac{kT}{e}$	0.0259	Volt

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของซิลิกอน ($T = 300K$)

คุณสมบัติ	ขนาด
Atoms (cm^{-3})	5.0×10^{22}
Atomic weight	28.09
Crystal structure	Diamond
Lattice constant $\mathring{A}$	5.43
Melting point ($^{\circ}C$)	1415
Dielectric constant	11.7
Bandgap energy (eV)	1.12
Electron affinity x (Volts)	4.01
Effective density of states in conduction band, N_c (cm^{-3})	2.8×10^{19}
Effective density of states in conduction band, N_v (cm^{-3})	1.04×10^{19}
Intrinsic carrier concentration (cm^{-3})	1.5×10^{10}
Mobility ($cm^{-2}/V-s$)	
Electron, μ_n	1350
Hole, μ_p	480

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติ	ขนาด
Effective mass (density of states)	
Electron $\left(\frac{m_n^*}{m_0}\right)$	1.08
Hole $\left(\frac{m_p^*}{m_0}\right)$	0.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอน

Initial wafer preparation and cleaning process

การเตรียมแผ่นผลึกเริ่มต้นและการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึกเพื่อให้แผ่นผลึกพร้อมที่จะใช้ในการสร้างตัวอุปกรณ์

ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอนและการเช็คคุณสมบัติ

- แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ(100)
- ความต้านทาน8.25 Ω-cm
- ความหนา 400μm

การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์(Deionization Water) 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดHNO_3 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2

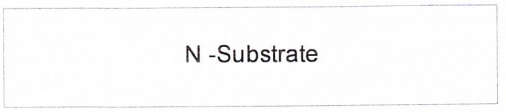
การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มใน Tricholoethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

การ Slice etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

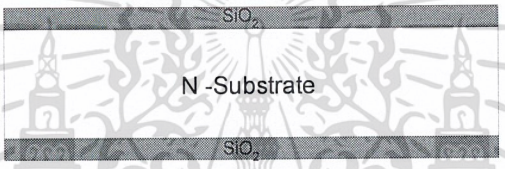


2. กระบวนการออกซิเดชั่น

Oxidation for Diffusion Mark

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นDiffusion mask

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 2 hours
- wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc/min 1 hours
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 2 hours
- ใช้อุณหภูมิเตา 1150 อุณหภูมิน้ำ 90°C



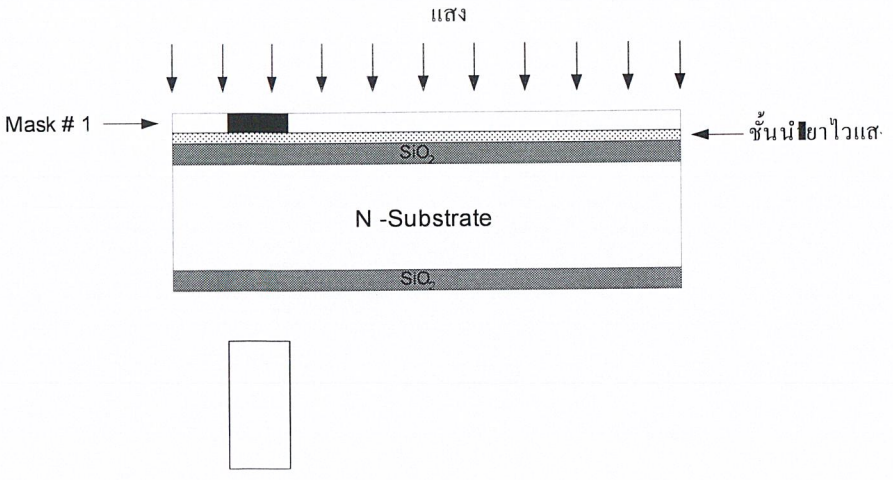
3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี่ มาส์คที่ 1

Photolithography for body

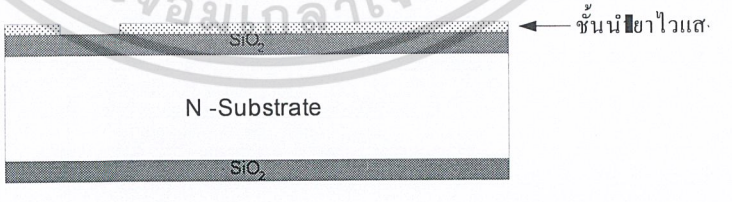
เปิดชั้นออกไซด์บริเวณที่จะสร้างส่วนbody เพื่อเชื่อมต่อกับขาซอส

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120° C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ(Way coat) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95° C 30 นาที(prebake)
- Alignment Expose

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



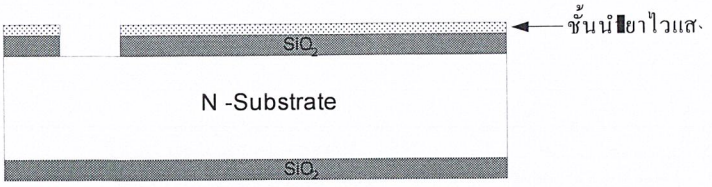
- Develop ฟิล์มโดย
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
  - จุ่มลงในXylene แก้วที่สอง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่สาม 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ 95° C 10 นาที (post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 95°C 30 นาที



การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

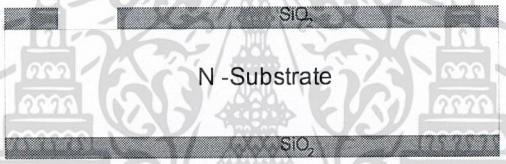
- จุ่มน้ำในสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2



4. **แพร่อะตอมสารเจือเพื่อสร้างส่วน body และ reoxidation**

diffusion for body and reoxidation

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Tricholoethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

การ Slice etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

กระบวนการ Pre – deposing

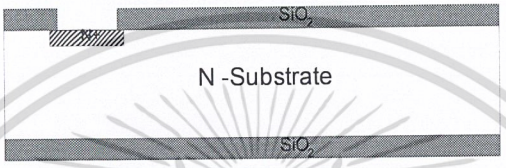
- Phosphorus deposing Temp 1050° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Active ด้วย O_2 700 cc/min 30 นาที
- Stabilize ด้วย N_2 700 cc/min 30 นาที
- Deposing ด้วย N_2 700 cc/min 20 นาที

ลอกชั้น Phosphorus glass

- จุ่มใน HF 5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

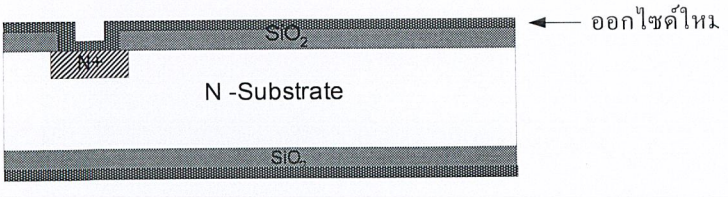


การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Tricholoethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

กระบวรการ Drive – in

- Phosphorus drive – in Temp 1100 ^{o}C
  - Dry O_2 1200 cc/min 10 นาที
  - Wet O_2 1000 cc/min 20 นาที
  - Dry O_2 1000 cc/min 10 นาที



5. กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ มาส์คที่ 2 (ซอส-เดรน)

Photolithography for source , drain area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิดชั้นออกไซด์บริเวณที่จะสร้างส่วนซอสและส่วนเดรน โดยใช้กระจกต้นแบบชิ้นที่สอง

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120° C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ(Way coat) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95° C 30 นาที(prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์มโดย
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
  - จุ่มลงในXylene แก้วที่สอง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่สาม 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ 95° C 10 นาที (post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 95°C 30 นาที

การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มน้ำในสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แพร่อะตอมสารเจือเพื่อสร้างส่วนซอสและส่วนเดรน

diffusion for source , drain and reoxidation

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Tricholoethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

การ Slice etching

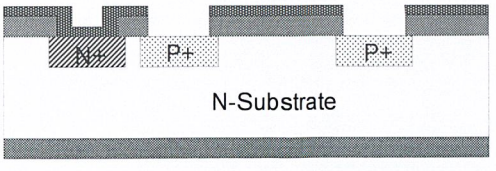
- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

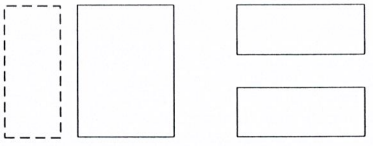
กระบวนการ Pre – deposing

- Boron deposing Temp 950° C
- Active ด้วย O_2 700 cc/min 30 นาที
- Stabilize ด้วย N_2 700 cc/min 30 นาที
- Deposing ด้วย N_2 700 cc/min 30 นาที

ลอกชั้น Boron glass

- จุ่มใน HF 5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2





การทำความสะอาดผิวหน้า

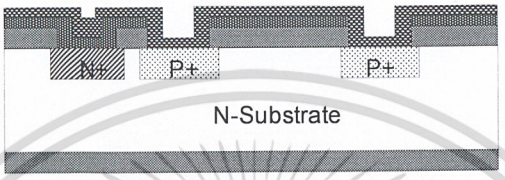
- ต้มใน Tricholoethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

กระบวรการ Drive – in

- Boron drive – in Temp 1100°C
  - Dry O_2 1200 cc/min 10 นาที
  - Wet O_2 1000 cc/min 20 นาที
  - Dry O_2 1200 cc/min 10 นาที



7. **กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ มาส์คที่ 3 (เกท)**

Photolithography for gate area

เปิดชั้นออกไซด์บริเวณที่จะสร้างชั้นออกไซด์ส่วนเกทโดยใช้กระจกต้นแบบชิ้นที่สาม

กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ มาส์คที่ 2 (gate)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120° C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ(Way coat) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95° C 30 นาที(prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์มโดย
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
  - จุ่มลงในXylene แก้วที่สอง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่สาม 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ 95° C 10 นาที (post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบฟิล์มที่ 95°C 30 นาที

การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มน้ำในสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2

8. **สร้างชั้นออกไซด์ส่วนเกท**

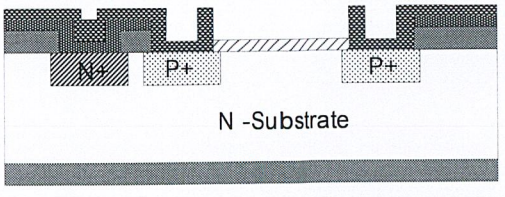
Oxidation for gate oxide

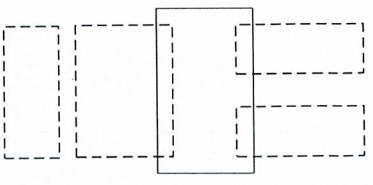
การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Tricholoethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

Gate Oxidation Temp 950 °C

- Dry O_2 1200 cc/min 2 ชั่วโมง
- Dry O_2 1200 cc/min 2 นาที





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ มาส์คที่ 4 (ขั้วสัมผัสโลหะ)

Photolithography for metal contact windows

เปิดชั้นออกไซด์บริเวณที่เป็นช่องของขั้วสัมผัสโลหะโดยใช้กระจกต้นแบบชิ้นที่สี่

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120° C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ(Way coat) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95° C 30 นาที(prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์มโดย
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
  - จุ่มลงในXylene แก้วที่สอง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alchohol แก้วที่สาม 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ 95° C 10 นาที (post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 95°C 30 นาที

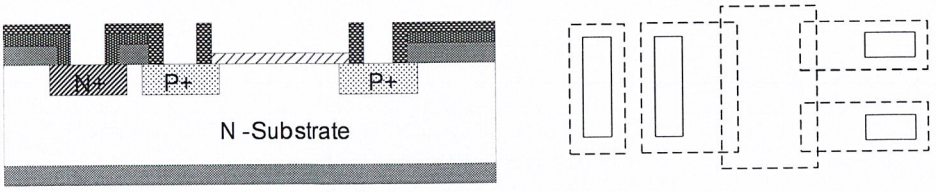
การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มน้ำในสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



10. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator

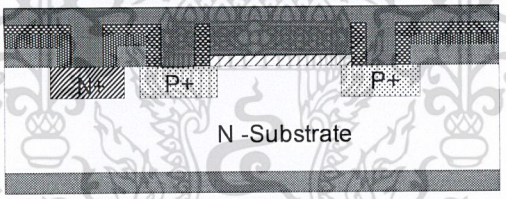
Al-vacuum evaporation

สร้างชั้นของอลูมิเนียมบนผิวหน้าของแผ่นผลึก

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Tricholoethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr



11. กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ มาส์คที่ 5 (ทำลวดลายของโลหะ)

Photolithography for metal contacts

ทำลวดลายของโลหะเพื่อเป็นส่วนของซอส เดรน และเกท โดยใช้กระจกต้นแบบชิ้นที่ห้า

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่ 85°C 20 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Developeฟิล์มโดย
  - Az Developer แก้วที่หนึ่ง 30 นาที
  - Az Developer แก้วที่หนึ่ง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

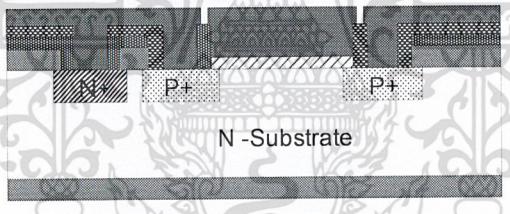
- อบฟิล์มที่ 85°C 20 นาที (postbake)

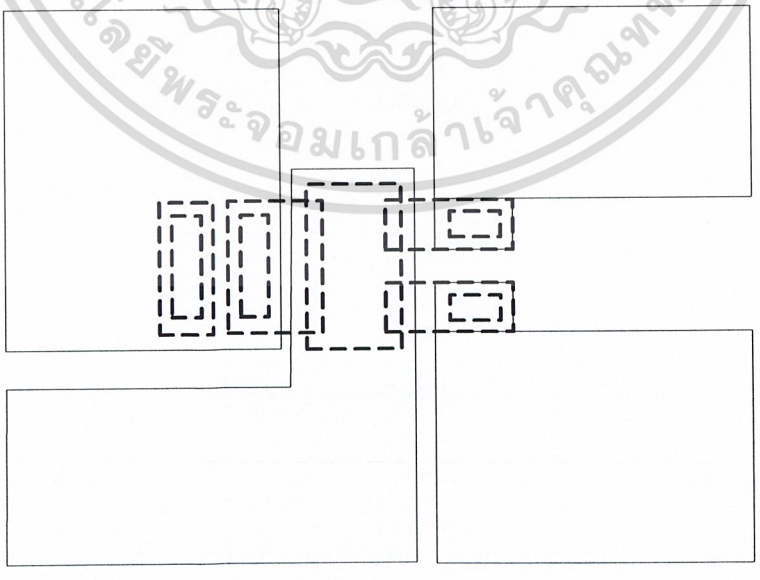
การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al – Etching)

- จุ่มสารละลาย Al – Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2





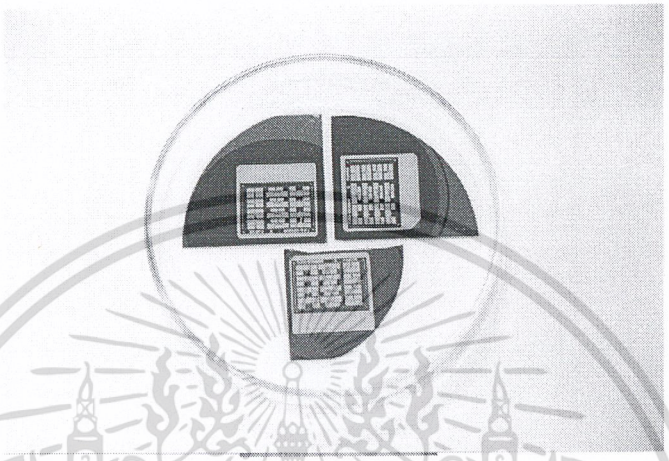
รูปแสดงการทำลวดลายด้านบนของโลหะเพื่อเป็นส่วนของซอส เดรน และเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Sintering for ohmic contacts

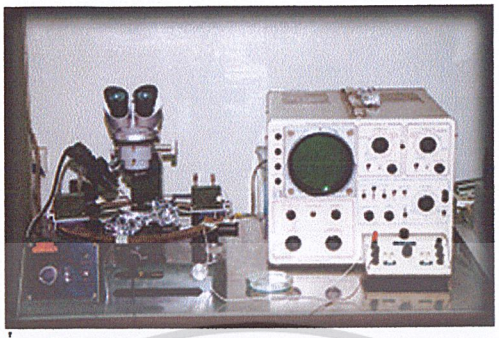
ทำการซินเตอริงค์เพื่อให้ได้ Ohmic contact

- Dry N_2 1000 cc/min 12 นาที



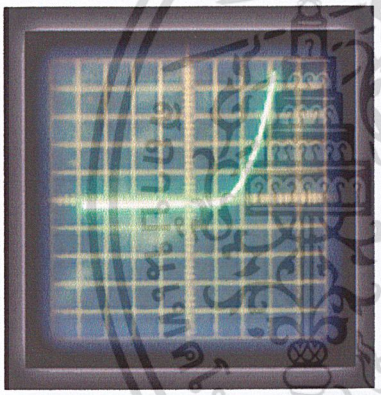
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. กราฟคุณสมบัติของ MAGFET ที่จุดต่าง ๆ

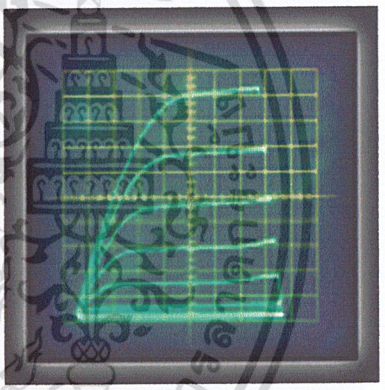


รูปแสดงเครื่องมือวัด (TRANSISTOR-CURVE TRACER TYPE TCT-7D)

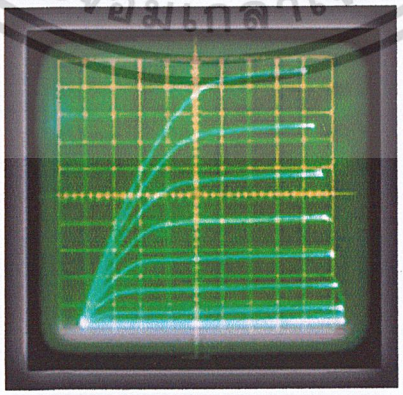
MAGFET ตัวที่ 2



Source-Drain(I-V characteristics)



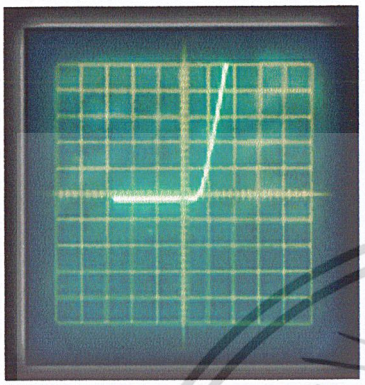
คุณสมบัติเป็น MOSFET ของ Drain1



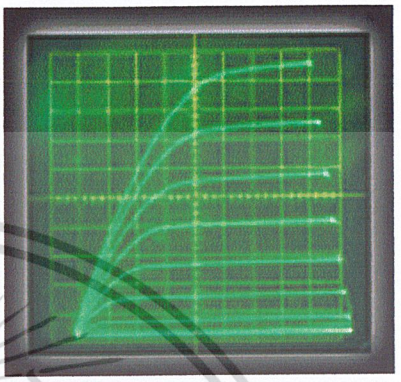
คุณสมบัติเป็น MOSFET ของ Drain2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

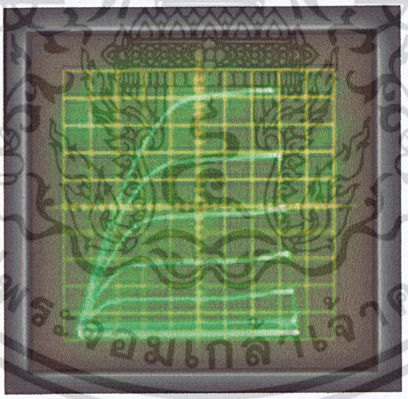
MAGFET ตัวที่ 3



Source-Drain(I-V characteristics)



คุณสมบัติเป็น MOSFET ของ Drain1



คุณสมบัติเป็น MOSFET ของ Drain2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้ประสบความสำเร็จมาได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากความอนุเคราะห์ของอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เติมพงษ์ เพ็ชรกูล ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำรายงานฉบับนี้ตลอดมา นายโสภณ พรหมชัย นักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำถึงเทคนิคและวิธีการในการทำการทดลอง เจ้าหน้าที่ และอาจารย์ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องวิจัยในการทำการทดลองตลอดเวลาและเพื่อน ๆ ทุกคนที่มีมุมมองและแนวคิดใหม่ ๆ ที่ช่วยทำให้กระผมทำรายงานฉบับนี้ได้อย่างรอบคอบมากยิ่งขึ้น สุดท้ายนี้กระผมจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นอย่างสูงที่ช่วยให้การทำรายงานฉบับนี้ของกระผมบรรลุตามวัตถุประสงค์ของหลักสูตรปริญญาวิศกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ไปได้ด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, *"อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ"*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2544.
2. สมเกียรติ ศุภเดช, *"เซมิคอนดัคเตอร์ฟิสิกส์"*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2542.
3. สมเกียรติ ศุภเดช, *"สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ"*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 6, 2538.
4. H. Baltes and R. Castagnetti, "Magnetic sensors", *Semiconductor Sensors,* John Wiley, New York, 1994, Ch. 5.
5. H. Baltes and R. Popovic, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensors", *Proc. IEEE,* vol. 74, pp. 1107-1132, 1986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้