



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

**เซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟต
MOSFET Structure for Magnetic sensor**

นายเดิพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาวิจัย และไม่ให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการใด
ไม่ว่าในชื่อใดทั้งสิ้น หากฝ่าฝืนให้ตัดสิทธิ์ในการขอรับทุนอุดหนุนงานวิจัยของเอกสารนี้ และตัดสิทธิ์ในการ



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟต
MOSFET Structure for Magnetic sensor

นายเติมพงษ์ เพ็ชรกุล

b00270269
R000140

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟท
แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ..... 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการการสร้างตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยโครงสร้างมอสเฟท ซึ่งแตกต่างจากแมกเฟททั่วไป คือโครงสร้างนี้เป็นการนำเอาโครงสร้างมอสเฟทที่ใช้งานโดยปกติมาตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยไม่มีการดัดแปลง โครงสร้างเหมือนแมกเฟททั่วไปที่แยกขั้วเดรนออกเป็นสองส่วนเท่ากัน แต่โครงสร้างนี้อาศัยขั้วเดรน เกท ซอส และ ซับสเตอร์ มาใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กที่ตรวจจับจะมีทิศทางแนวขนานซึ่งแตกต่างจาก แมกเฟททั่วไปที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก หลักการทำงานอาศัยการเบี่ยงเบนระหว่างกระแสโมสเฟทกับ กระแสซับสเตอร์ในขณะที่ได้รับการไบแอสตรงจากแรงลอเรนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าหลักการทำงานดังกล่าวสามารถที่จะนำมาใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวขนานได้ โดยสามารถ ตรวจจับได้ทั้งปริมาณและทิศทางสนามแม่เหล็ก ความสัมพันธ์ระหว่างผลแตกต่างระหว่างกระแสมีความเป็นเชิงเส้น ที่ดี

คำสำคัญ : มอสเฟท; เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก; แรงลอเรนซ์; กระแสฐานรอง; กระบวนการสร้าง; TCAD

Research Title: MOSFET Structure for Magnetic Sensor

Researcher:.....Toempong Phetchakul.....

Faculty:Engineering.....Department:Electronics.....

ABSTRACT

This research is to make a magnetic sensor by MOS structure which is difference from the MAGFET..This device is regular MOS structure that does not any modify which differs from MAGFET structure that split drain in two symmetrical regions. It uses drain gate source and substrate for detecting magnetic field. Magnetic field detection will have parallel direction, which is different from general MAGFET, detect a magnetic field perpendicular orientation. The working principle relies on the deviation between MOS current and substrate current from the induced Lorentz's force from magnetic field. The experiments show that the operating principle can be used to detect the magnetic field in parallel direction. It can detect the amount and direction of the magnetic field. The relationship between the current difference and magnetic field is good linearity.

Keywords : MOSFET; Magnetic sensor; Lorentz's force; Substrate current; Fabrication; TCAD

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559 ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไธ ผู้อำนวยการศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีและคอมพิวเตอร์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการเอื้อเฟื้อในการใช้เครื่องมือวิจัย ขอขอบคุณคุณอนุชา เรืองพาณิชย์ ในการดูแลการสร้างและบรรจุอุปกรณ์ ขอขอบคุณคุณคุณรัฐพงศ์ นาคาศัย คุณสวัสดิพงษ์ พูนสวัสดิ์ และคุณชลินทร์ สุทธิเนตร ในการมีส่วนร่วมการวิจัยครั้งนี้



รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานมอสเฟต.....	4
2.2 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของมอสเฟต.....	6
2.3 แรงดันขีดเริ่ม.....	8
2.4 ผลกระทบจากการไบแอสฐานรอง.....	9
2.5 หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์.....	10
2.6 เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลา.....	18
2.7 ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์.....	19
2.7.1 Physical magnetoresistance effect.....	21
2.7.2 Geometrical magnetoresistance effect.....	21
2.8 แมกเฟต.....	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย (ชื่อหัวข้อปรับให้เหมาะสมกับงานวิจัย ทางวิทยาศาสตร์/สังคมศาสตร์).....	27
3.1 บทนำ TCAD.....	27
3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation).....	27
3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation).....	28
3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD.....	29
3.2.1 Sentaurus Workbench.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 Sentaurus Process.....	30
3.2.3 Sentaurus Structure Editor.....	30
3.2.4 Sentaurus Device.....	33
3.2.5 Tecplot SV.....	36
3.2.6 Inspect.....	37
3.3 โครงสร้างเพื่อศึกษาที่ใช้ในการจำลองแบบและการออกแบบ.....	37
3.3.1 โครงสร้างแมกเฟท.....	38
3.3.2 โครงสร้างมอสเฟท.....	38
3.3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟทที่ทำการสร้างขึ้น.....	39
บทที่ 4 กระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์และเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง	40
4.1 กระบวนการออกซิเดชัน.....	40
4.1.1 กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง.....	41
4.1.2 กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก.....	41
4.1.3 การสร้างชั้นออกไซด์หนา.....	42
4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	42
4.2.1 ทำความสะอาดผิวหน้า.....	43
4.2.2 การเตรียมผิวหน้า.....	44
4.2.3 การเคลือบน้ำยาไวแสง.....	45
4.2.4 การอบ.....	47
4.2.5 การปรับมาส์คและการฉายแสง.....	48
4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง.....	50
4.3 กระบวนการกัด.....	51
4.3.1 การกัดแบบเปียก.....	51
4.3.2 การกัดแบบแห้ง.....	51
4.4 การแพร่สารเจือ.....	52
4.4.1 การแพร่สารเจือชนิดพี.....	52
4.4.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น.....	53
4.5 การยิงฝังประจุ.....	54
4.5.1 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดพี.....	54
4.5.2 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็น.....	54
4.6 การสร้างชั้นโลหะ.....	55
4.7 โครงสร้างมอสเฟทที่สร้างขึ้น.....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	58
5.1 การศึกษาโครงสร้างมอสเฟตด้วยการจำลองแบบ.....	58
5.2 ค่าแรงดันฐานรอง ที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม.....	59
5.3 การศึกษาแมกเฟต (MAGFET) ด้วยการจำลองแบบ.....	60
5.4 การศึกษามอสเฟตมาใช้งานเป็น MAGFET ด้วยการจำลองแบบ.....	62
5.5 การศึกษาการนำมอสเฟตไปใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์จริง.....	64
5.5.1 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟต.....	64
5.5.2 วงจรการไบแอสสำหรับวัดคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	64
5.5.3 ผลตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	65
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	68
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ตีพิมพ์.....	71
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่เตรียมตีพิมพ์.....	77
ภาคผนวก ค สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	81
ประวัตินักวิจัย.....	83

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 มอสเฟตชนิดเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนท์.....	4
2.2 มอสเฟตช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นแบบดีพลีชั่น.....	5
2.3 มอสเฟตชนิดพีแบบเอ็นฮานซ์เมนท์.....	5
2.4 มอสเฟตช่องทางเดินกระแสชนิดพีแบบดีพลีชั่น.....	5
2.5 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของมอสเฟตชนิดเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนท์.....	6
2.6 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟตแบบดีพลีชั่น.....	7
2.7 วงจรการวัดคุณสมบัติพีมอสเฟต.....	7
2.8 (ก) ID กับ VGS(ที่ VGS ค่าน้อยๆ) สำหรับมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนท์(ข) $\sqrt{I_D}$ กับ VGS ที่กระแสอิ่มตัว สำหรับมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนท์(เส้นกราฟ A) และแบบดีพลีชั่น(เส้นกราฟ B).....	9
2.9 เป็นผลการหาค่าแรงดันขีดเริ่มในขณะที่มีค่าแรงดันค่าต่างๆ.....	9
2.10 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	10
2.11 การเบี่ยงเบนของ (ก) อิเล็กตรอน (ข) โฮล ในฮอลล์เพลทซึ่งเป็นผลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง z.....	12
2.12 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (n_i).....	15
2.13 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์.....	18
2.14 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง.....	20
2.15 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง.....	20
2.16 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Physical magnetoresistance effect.....	21
2.17 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Geometrical magnetoresistance effect.....	21
2.18 แสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาว (l) และขนาดสั้น (s).....	22
2.19 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสแตนซ์ (ก) แบบวงกลม (ดิสก์) และ (ข) แบบอนุกรมค่าความต้านทานรวมบน ฮอลล์เพลท.....	22
2.20 โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	23
2.21 โครงสร้างแมกเฟตแบบแรงดัน.....	24
2.22 โครงสร้างแมกเฟตแบบกระแส.....	25
2.23 แบบจำลองแมกเฟตแสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์เท่ากัน.....	25
2.24 การกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนตามแนวช่องทางเดินกระแส.....	26
3.1 แสดงการจำลองแบบกระบวนการสร้าง.....	28
3.2 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD.....	28
3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	29
3.4 แสดงโปรแกรมการจำลองแบบส่วนต่างๆใน Sentaurus Workbench.....	30
3.5 แสดงส่วนของการอิมพลานเทชันใน Sentaurus Process.....	30
3.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของ Sentaurus Structure Editor.....	31

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.7 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน.....	32
3.8 แสดงการจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการแบ่งกริด.....	32
3.9 แผนผังไฟลอินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device.....	34
3.10 แสดงส่วนโปรแกรมTecplot SV.....	36
3.11 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect.....	37
3.12 โครงสร้างเมกเฟทแบบแยกเดรน (split-drain MOSFET).....	38
3.13 โครงสร้างมอสเฟทมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาการตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	38
3.14 โครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟทที่สร้างขึ้น.....	39
4.1 กระบวนการเกิดขึ้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน.....	41
4.2 การสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่จากกระบวนการออกซิเดชัน.....	42
4.3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโด้กราฟฟี.....	43
4.4 แสดงขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์.....	44
4.5 กระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง.....	44
4.6 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด.....	45
4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปิเนอร์.....	46
4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปิเนอร์.....	47
4.9 แสดงกระบวนการถ่ายแบบจากมาสค์ไปยังผิวของแผ่นเวเฟอร์.....	48
4.10 แสดงกระบวนการปรับมาสค์และการฉายแสงด้วยระบบสตีปเปอร์.....	49
4.11 เปรียบเทียบผลจากการกัดด้วยกระบวนการสองแบบ (ก) การแบบเปียก และ (ข) การกัดแบบแห้ง.....	52
4.12 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ.....	52
4.13 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการยิงฝังประจุ.....	54
4.14 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมตัวอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก.....	55
4.15 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ.....	56
4.16 ภาพถ่ายขยายด้านบนของอุปกรณ์มอสเฟทที่สร้างเสร็จแล้ว.....	57
4.17 อุปกรณ์ที่บรรจุตัวถังพร้อมใช้งาน.....	57
5.1 โครงสร้างมอสเฟทที่ใช้ในการศึกษา.....	58
5.2 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟทที่ได้จากการจำลองแบบ.....	59
5.3 วงจรการไบแอสมอสเฟทสำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	60
5.4 การพล็อตระหว่าง $\sqrt{I_D}$ กับ V_{GS} ในช่วงการทำงานอิมิตัว.....	60
5.5 ค่าแรงดันขีดเริ่มที่ค่าแรงดันฐานรองค่าต่างๆ.....	60
5.6 โครงสร้างมอสเฟทแบบแยกเดรน (split drain MOSFET).....	61
5.7 ผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของเมกเฟท.....	61

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
5.8 ผลการจำลองแบบผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกเฟท.....	61
5.9 แสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสต้านบนจากการจำลองแบบ.....	62
5.10 ผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของเอ็นมอสเฟทจากการจำลองแบบ.....	62
5.11 แสดงการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสต้านข้าง.....	63
5.12 กลไกการทำงานของมอสเฟทตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	63
5.13 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟทจากการวัด.....	64
5.14 วงจรไบแอสในการวัดคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	65
5.15 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของเอ็นมอสเฟทที่ได้จากการวัด.....	65
5.16 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของเอ็นมอสเฟทที่ได้จากการจำลองแบบ.....	66
5.17 ความหนาแน่นกระแสของมอสเฟทจากการจำลองแบบ.....	66
5.18 กลไกการทำงานของเอ็นมอสเฟทตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน.....	67

บทที่ 1

บทนำ

โครงการวิจัยเซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟทเป็นโครงการที่ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยใช้โครงสร้างมอสเฟทซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในวงจรรวม ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาของปัญหาวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ขอบเขตโครงการวิจัย วิธีดำเนินวิจัย สมมุติฐานงานวิจัย กรอบแนวคิดการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยโดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุปกรณ์เซนเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ชนิดหนึ่งซึ่งมีการใช้งานมีการวิจัยและพัฒนาอยู่ตลอดเวลาเหมือนกับอุปกรณ์เซนเซอร์ชนิดอื่นๆ อุปกรณ์เซนเซอร์แม่เหล็กที่เป็นที่นิยมใช้งานได้แก่อุปกรณ์ฮอลล์ (HALL plate) มีทั้งใช้งานแบบอุปกรณ์เดี่ยวเป็นหัวเซนเซอร์ และแบบที่เป็นส่วนหนึ่งของวงจรรวมที่เรียกว่าเซนเซอร์ฉลาด (Smart sensor) ยังมีแมกนีโตรซิสเตอร์ (Magnetoresistance) หรือตัวต้านทานที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนค่าตามความเข้มสนามแม่เหล็กซึ่งก็เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์แม่เหล็กที่ได้รับความนิยมสูง นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์เซนเซอร์แบบอื่นๆ เช่น แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) และ แมกเฟท (MAGFET) ซึ่งมีทั้งโหมดการทำงานแบบแรงดัน และโหมดการทำงานแบบกระแส

อุปกรณ์เซนเซอร์แบบไดโอด ทรานซิสเตอร์ และมอสเฟท อาจจะเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้งานน้อยกว่าแบบอุปกรณ์ฮอลล์และแบบตัวต้านทาน เพราะว่าการสร้างและการใช้งานมีความยุ่งยากมากกว่าแบบแรก ผู้วิจัยได้พัฒนาโครงสร้างแมกนีโตไดโอดให้มีโครงสร้างการใช้งาน และกระบวนการสร้างที่ง่าย ถูก และทนทานซึ่งผลเป็นที่น่าพอใจ และได้พัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้างและใช้งาน แต่โครงสร้างอาจจะไม่สมมาตรเหมือนกับไดโอด แต่ก็สามารถที่ประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะในการตรวจจับแบบ 3 แกนได้เป็นอย่างดี การทำงานจะอยู่ในโหมดกระแส

โครงสร้างมอสเฟทเป็นโครงสร้างพื้นฐานในวงจรรวมสมัยใหม่ ประกอบด้วยส่วนเดรน (Drain) เกท (Gate) ซอส (Source) และมีแผ่นฐาน (substrate) ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะใช้โครงสร้างมอสเฟทมาใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยมีการทำงานในโหมดกระแสโดยไม่มีขาเพิ่มเติมใดๆ นอกเหนือไปจากโครงสร้างมอสเฟทปกติ ออกแบบให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้และมีความไวที่สูง สามารถสร้างด้วยกระบวนการสร้างวงจรรวมมาตรฐานทั่วไปได้ ซึ่งข้อเด่นของโครงสร้างมอสเฟทที่นำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กคืออุปกรณ์จะทำงานได้จะต้องมีการเหนี่ยวนำแรงดันที่เกท แม้มี่สนามแม่เหล็กมาแต่ถ้าไม่มีการเหนี่ยวนำที่ขาเกทก็ไม่สามารถทำงานตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ ทำให้มีลักษณะมีการควบคุมการปิด เปิด อุปกรณ์ในการวัดสนามแม่เหล็กผ่านทางเกท ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางยิ่งขึ้น ซึ่งในโครงสร้างตัวต้านทาน ไดโอด ทรานซิสเตอร์ จะทำงานในการเปิด ปิด ทำไม่ได้หรือได้ยากกว่าโครงสร้างแบบมอสเฟท และข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือการเหนี่ยวนำแรงดันที่ขาเกทไม่มีการกินพลังงานแต่อย่างใด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สร้างนวัตกรรมอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟท
2. ต่อยอดงานวิจัย ประยุกต์และบูรณาการความรู้และศักยภาพภายในประเทศ

3. ผลิตนักศึกษาในสาขาเซนเซอร์อุตสาหกรรมระดับบัณฑิตศึกษา
4. นำงานวิจัยเผยแพร่ในรูปแบบบทความและการประชุมวิชาการนานาชาติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเพื่อนำไปสู่การออกแบบ ทำการจำลองแบบ ปรับปรุงการออกแบบ นำไปสร้างจริง และวัดผลทดสอบ เผยแพร่ผลการวิจัยสู่สาธารณะ

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. รวบรวมศึกษาข้อมูลเพื่อนำไปสู่การออกแบบ
2. สืบค้นและเตรียมความพร้อมห้องปฏิบัติการ
3. ออกแบบและจำลองแบบเบื้องต้นและแก้ไข
4. นำแบบที่ได้ไปสร้างไฟโตนิกส์
5. ทำการสร้างต้นแบบในห้องปฏิบัติการ
6. วัดและทดสอบอุปกรณ์ด้วยแม่เหล็ก
7. นำข้อมูลมาประมวลและสรุป
8. เผยแพร่ผลงานวิจัย
9. สรุปและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

มอสเฟตสามารถใช้การเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสที่เกตมาใช้เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำได้ โดยไม่ต้องใช้การเติมอะตอมสารเจือ แต่ใช้การเหนี่ยวนำแทน สารกึ่งตัวนำที่เกิดภายใต้การเหนี่ยวนำที่เกตจะเป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากสนามไฟฟ้าดึงดูดพาหะอิสระมาสะสมอยู่ภายใต้เกต เกิดเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความบางมากๆ และสามารถประพุดิตัวและมีคุณสมบัติเหมือนกับสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการเติมอะตอมสารเจือ จากปรากฏการณ์ดังกล่าว แสดงว่าเราสามารถสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำได้จากการเหนี่ยวนำจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ฮอลล์ โครงสร้างมอสเฟตมีการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสจากแรงดันที่เกตเกิดเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำเชื่อมต่อระหว่างเดรนและซอส ทำให้สามารถที่จะนำช่องทางเดินกระแสของมอสเฟตมาใช้เหนี่ยวนำสารกึ่งตัวนำและนำไปใช้ในรูปแบบต่างๆได้เช่น อุปกรณ์ฮอลล์ เป็นต้น

การใช้งานมอสเฟตมาเป็นอุปกรณ์ฮอลล์เฟลทสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานแบบอุปกรณ์ฮอลล์ปกติแบบเติมอะตอมสารเจือได้ โดยมีทั้งโหมดการทำงานแบบแรงดันและโหมดการทำงานแบบกระแส โหมดการทำงานแบบแรงดันจะให้เอาท์พุทเป็นแรงดันฮอลล์ไปใช้งาน โดยอุปกรณ์มอสเฟตจะต้องออกแบบให้มีเกตขนาดใหญ่เท่ากับฮอลล์เฟลทที่ใช้งาน นอกจากนั้นแล้วจะต้องมีขาพิเศษเพิ่มขึ้นตามแนวช่องทางเดินกระแสเพื่อใช้เป็นขั้วนำแรงดันฮอลล์ไปใช้งาน ส่วนชั้นเดรนและซอสจะใช้ในการให้พลังงานในรูปแรงดันหรือกระแสแก่อุปกรณ์ ในโหมดการทำงานแบบกระแสจะต้องมีการออกแบบส่วนเกตให้มีความยาวเหมาะสม และจะต้องเพิ่มขั้วเดรนอีกหนึ่งขั้วเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้น แต่มอสเฟตที่ทำงานในโหมดนี้จะมีความเล็กกว่าแบบแรกมากการใช้การเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นสารกึ่ง

ตัวนำมีข้อดีคือสามารถที่จะเลือกให้เกิดสารกึ่งตัวนำและไม่ให้เกิดชั้นสารกึ่งตัวนำตามการเหนี่ยวนำแรงดันที่เกต ทำให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ให้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในช่วงเวลาที่ต้องการสำหรับการวัดได้

แมกนีไททรานซิสเตอร์คือทรานซิสเตอร์ที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก มีการใช้งานทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแส แต่อาจจะมีจำนวนขาของอุปกรณ์คอลเลคเตอร์ และ เบส มากกว่าทรานซิสเตอร์ปกติ แต่สามารถพัฒนาออกแบบให้สามารถทำงานตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยการทำงานแบบทรานซิสเตอร์ปกติได้ทำให้การใช้งานมีความสะดวกขึ้น จากการพัฒนาดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่สามารถนำมาเป็นแนวทางพัฒนาใช้กับโครงสร้างมอสเฟทในโหมดกระแสเพื่อนำมอสเฟทมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแบบมอสเฟทได้เคยมีผู้นำเสนอมาก่อนหน้านี้[1-6] โดยมีการทำงานทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแส โครงสร้างที่ทำงานในโหมดแรงดันจะใช้การเหนี่ยวนำแรงดันที่เกตเพื่อสร้างช่องทางเดินกระแสเชื่อมต่อระหว่างเดรนและซอสซึ่งทำให้มอสเฟทถูกมองในลักษณะอุปกรณ์ฮอลล์ได้ โดยขาเดรนและซอสเป็นขั้วไบแอสของอุปกรณ์ฮอลล์ ส่วนช่องทางเดินกระแสของมอสเฟทคือตัวแผ่นฮอลล์ โดยอุปกรณ์มอสชนิดนี้จะต้องออกแบบให้ช่องทางเดินกระแสหรือพื้นที่เกที่มีขนาดใหญ่เท่าอุปกรณ์ฮอลล์ทั่วไปและจะต้องมีขาอุปกรณ์เพิ่มขึ้นอีกสองขา ด้านข้างช่องทางเดินกระแสเพื่อนำแรงดันเอาท์พุทไปใช้งาน

โครงสร้างมอสเฟทอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ทำงานในโหมดกระแสจะแตกต่างจากมอสเฟทชนิดแรกโดยอุปกรณ์จะใช้หลักการเบี่ยงเบนกระแส ดังนั้นอุปกรณ์มอสเฟทชนิดนี้จะต้องใช้แรงดันเหนี่ยวนำเกตให้เกิดช่องทางเดินกระแสและจะต้องมีส่วนเดรนสองส่วนที่เหมือนกันเพื่อรองรับความแตกต่างของกระแสที่เกิดจากการเบี่ยงเบนเนื่องจากสนามแม่เหล็ก ส่วนพื้นที่เกตจะมีขนาดเล็กกว่าแบบแรกมากเพราะต้องการแค่ระยะการเลี้ยวเบนของพาหะทำให้ไม่ต้องมีพื้นที่ที่ใหญ่ทำให้มอสเฟทแบบนี้มีขนาดเล็กกว่าแบบแรกหลายเท่าตัว

โครงสร้างมอสเฟทที่น่าสนใจจะเป็นโครงสร้างที่ทำงานในโหมดกระแสโดยอุปกรณ์จะมีขนาดเล็กกว่าแบบโหมดแรงดัน แต่ก็จะมีขนาดใหญ่กว่ามอสเฟทปกติอยู่มากเพราะต้องการโครงสร้างเพื่อให้เหมาะสมกับการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งมอสเฟทปกติทำไม่ได้ โดยอุปกรณ์นี้จะมีเดรน เกต ซอส และฐานรองเหมือนกับอุปกรณ์มอสทั่วไปแต่จะไม่มีขาเดรนเพิ่มเข้ามา การทำงานจะใช้การทำงานของมอสเฟทร่วมกับการทำงานของรอยต่อสารกึ่งตัวนำ สามารถควบคุมการเปิด ปิดอุปกรณ์มอสเฟทสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กได้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 นวัตกรรมอุปกรณ์เซนเซอร์สำหรับวัดสนามแม่เหล็กโครงสร้าง MOSFET
- 2 วัดกรรมสามารถนำไปจดสิทธิบัตรและทรัพย์สินทางปัญญา
- 3 เผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปวารสารนานาชาติ และการประชุมวิชาการทั้งในและนอกประเทศ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องและรองรับแนวคิดการวิจัย โดยประกอบด้วยพื้นฐานเกี่ยวกับ MOSFET (MOSFET) พื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ และแมกเฟท (MAGFET) โดยทฤษฎี MOSFET ที่ใช้คือ คุณสมบัติกระแสและแรงดัน (I-V characteristic) แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) และผลของแรงดันฐานรอง (substrate bias effect) ทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในโหมดแรงดันและโหมดกระแส ในส่วนแมกเฟทเป็นตัวอย่างอุปกรณ์ที่ประยุกต์ใช้โครงสร้าง MOSFET กับปรากฏการณ์ฮอลล์ในโหมดแรงดันและกระแส สำหรับโครงสร้าง MOSFET ในงานวิจัยนี้ จะมีความแตกต่างจากแมกเฟททั่วไป รวมถึงการตรวจจับสนามแม่เหล็กก็ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ต่างกัน สำหรับทฤษฎีดังกล่าวจะได้กล่าวในลำดับต่อไป

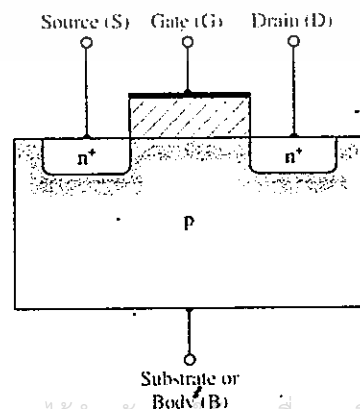
2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน MOSFET

2.1.1 โครงสร้าง MOSFET

โครงสร้าง MOSFET พื้นฐาน MOSFET ประกอบด้วยส่วนเดรน (drain) ส่วนซอส (source) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน ส่วนฐานรอง (substrate) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน และส่วนเกตที่ประกอบด้วยโลหะด้านบนและสารกึ่งตัวนำที่เป็นฐานรองด้านล่างที่ขึ้นกลางด้วยฉนวน นอกจากนี้โครงสร้างพื้นฐานดังกล่าว สามารถแบ่งประเภทของ MOSFET ได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เอ็น MOSFET และพี MOSFET นอกจากนั้นยังแบ่งเป็นประเภทย่อยตามการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแส (channel) ซึ่งอุปกรณ์กระแสเกิดจากการไหลของประจุในชั้นกลับ (inversion layer) หรือเรียกว่าช่องทางเดินกระแสที่บริเวณใต้เกต

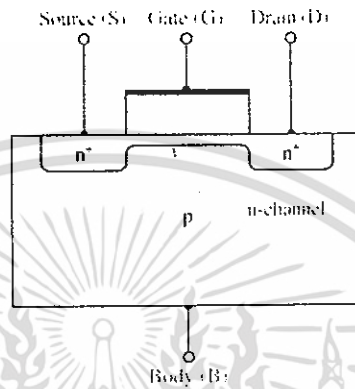
ประเภทแรกแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 คือเอ็น MOSFET แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ (n-channel enhancement mode MOSFET) การนิยามว่าเอ็นฮานซ์เมนต์เกิดจากฐานรองสารกึ่งตัวนำจะไม่กลับชั้นถ้ายังไม่ให้แรงดันที่เกต แรงดันที่เกต ค่าบวกจะเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับอิเล็กตรอน (electron inversion layer) เป็นช่องทางเดินกระแสเชื่อมระหว่างซอสชนิดเอ็นและเดรนชนิดเอ็น ซอสเป็นแหล่งจ่ายพาหะ (carriers) ให้ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสเข้าไปที่เดรน อุปกรณ์ช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น อิเล็กตรอนจะไหลจากซอสไปเดรนทำให้กระแสไหลจากเดรนไปซอสผ่านช่องทางเดินกระแส

ประเภทที่สองแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 เป็น MOSFET ช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นแบบดีพลีชัน (n-channel depletion mode MOSFET) อุปกรณ์ชนิดนี้จะมีช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นปรากฏภายใต้เกตออกไซด์แม้จะไม่มี

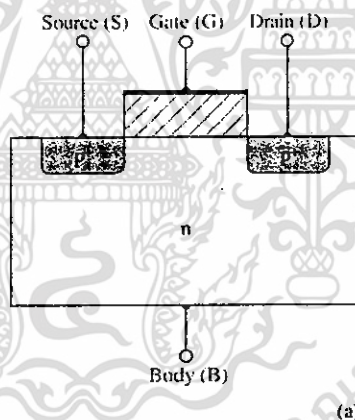


รูป 2.1 MOSFET ชนิดเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์

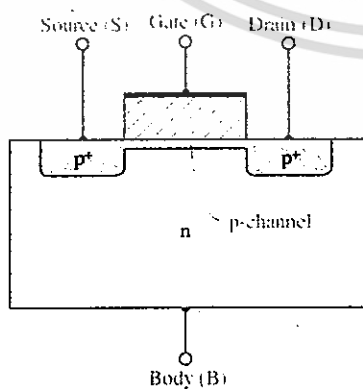
แรงดันที่เกตก็ตาม ช่องทางเดินกระแสเกิดจากกระบวนการสร้างที่จุงใจ ประเภทสามและประเภทสี่แสดงได้ ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 คือมอสเฟตชนิดพีแบบเอ็นฮานซ์เมนต์และมอสเฟตชนิดพีแบบดีพลีชัน ในกรณีพีมอสแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ เราต้องให้แรงดันที่เกตค่าลบเพื่อสร้างชั้นกลับของโฮล(hole)เชื่อมต่อบริเวณซอสและเดรน โฮลจะไหลจากซอสไปเดรนและกระแสจะไหลจากซอสไปเดรน ส่วนอุปกรณ์แบบดีพลีชันจะมีช่องทางเดินกระแสชนิดพีได้เกตเมื่อยังไม่ให้แรงดันที่เกตแต่อย่างไร



รูป 2.2 มอสเฟตช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นแบบดีพลีชัน



รูป 2.3 มอสเฟตชนิดพีแบบเอ็นฮานซ์เมนต์



รูป 2.4 มอสเฟตช่องทางเดินกระแสชนิดพีแบบดีพลีชัน

(b)

2.2 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของมอสเฟต (current-voltage characteristic)

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของมอสเฟตแสดงได้ดังรูป 2.5 ในรูปแสดงกราฟคุณลักษณะของมอสเฟตชนิดเอ็นโดยมีค่ากระแสเดรนที่ไหลที่ค่าแรงดันระหว่างเดรนและซอส (V_{DS}) ที่ค่าแรงดันเกตค่าต่างๆ (V_{GS}) ค่าแรงดันทุกค่าจะเทียบกับฐานรอง (B) ที่มีค่ากราวด์ซึ่งขอสัมก็จะต่อร่วมกับฐานรองมีค่าเป็นกราวด์เช่นเดียวกัน สำหรับสมการกระแสของมอสเฟตสามารถเขียนได้ดังสมการ(2.1) และ (2.2) โดยสมการ (2.1) ใช้ในกรณีมอสเฟตทำงานในช่วงเชิงเส้น (linear) หรือช่วงไม่อิ่มตัว (nonsaturation) และสมการ (2.2) ใช้ในกรณีมอสเฟตทำงานช่วงอิ่มตัว (saturation) สมการกระแสในช่วงไม่อิ่มตัวแสดงได้ดังนี้

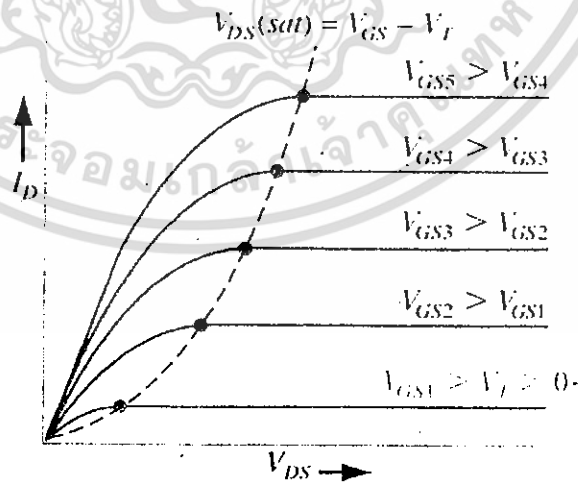
$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (2.1)$$

และสมการกระแสอิ่มตัวแสดงได้ดังนี้

$$I_D = \frac{WC_{ox}\mu_n}{2L} (V_G - V_{DS}) \quad (2.2)$$

โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆคือ

- I_D = กระแสเดรน
- W = ความกว้างเกต
- L = ความยาวเกต
- C_{ox} = ความหนาแน่นตัวเก็บประจุที่เกต
- μ_n = ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน
- V_{GS} = แรงดันระหว่างเกตซอส
- V_{DS} = แรงดันระหว่างเดรนซอส
- V_T = แรงดันขีดเริ่ม



รูป 2.5 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของมอสเฟตชนิดเอ็นแบบเอ็นยานซ์แมนท์

ในช่วงการทำงานไม่อิ่มตัว กระแสเดรนจะขึ้นอยู่กับแรงดันเดรนซอสและแรงดันเกต ในช่วงการทำงานอิ่มตัว กระแสเดรนจะขึ้นอยู่กับแรงดันเกตอย่างเดียวโดยไม่ขึ้นกับแรงดันเดรนซอส

สำหรับคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอสแบบดีฟลิชันแสดงได้ดังรูป 2.6 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบเอ็นทรานซ์เม้นท์แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าแรงดันเกตเป็นศูนย์จะมีค่ากระแสเดรนไหลค่าหนึ่ง เมื่อแรงดันเกตมากกว่าศูนย์ค่ากระแสจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อค่าแรงดันเกตน้อยกว่าศูนย์ ค่ากระแสเดรนจะมีค่าลดลง

สำหรับพีมอส คุณลักษณะกระแสและแรงดันสามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน เพียงแต่การให้ไบแอสจะกลับทิศทางการกับเอ็นมอสเฟท รูปที่ 2.7 เป็นวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของพีมอสจะสังเกตเห็นว่าทั้งแรงดันและกระแสจะมีทิศทางตรงข้ามกับเอ็นมอส ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของพีมอสในช่วงไม่อิ่มตัวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I_D = \frac{W\mu_p C_{ox}}{2L} [2(V_{SG} - V_T)V_{SD} - V_{SD}^2] \quad (2.3)$$

และสมการกระแสในช่วงอิ่มตัว

$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} (V_{SG} + V_T) \quad (2.4)$$

โดยที่ค่าแรงดันซอสเดรนอิ่มตัว $V_{SD}(sat)$ มีค่า

$$V_{DS}(sat) = V_{GS} - V_T$$

$$V_{GS2} > V_{GS1}$$

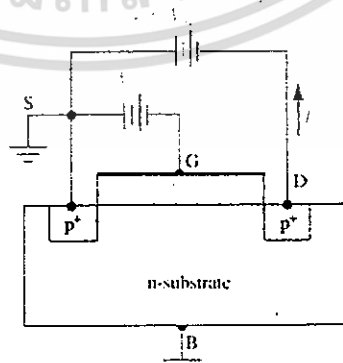
$$V_{GS1} > 0$$

$$V_{GS} = 0$$

$$V_{GS} < 0$$

$$V_T < V_{GS4} < V_{GS3}$$

รูป 2.6 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟทแบบดีฟลิชัน



รูป 2.7 วงจรการวัดคุณสมบัติพีมอสเฟท

2.3 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage)

แรงดันขีดเริ่มคือแรงดันที่ให้ที่เกตแล้วทำให้เกิดชั้นกลับ สำหรับเอ็นมอสเฟตสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{TN} = (Q'_{SDMAX} - Q_{SD}) \left(\frac{t_{ox}}{C_{ox}} \right) + \phi_{MS} + 2\phi_{FP} \quad (2.5)$$

โดยที่

V_{TN} = แรงดันขีดเริ่มเอ็นมอส

Q_{SD} = ความหนาแน่นประจุระหว่างเดรนซอสใต้พื้นที่เกต

Q_{SS} = ความหนาแน่นประจุพื้นผิว

T_{ox} = ความหนาออกไซด์

ϵ_{ox} = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์

ϕ_{MS} = ค่าความต่างศักย์ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ϕ_{FP} = ค่าความต่างศักย์ระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิอินทรีนซิกกับระดับพลังงานเฟอร์มิเอ็กทรีนซิก

สำหรับแรงดันขีดเริ่มของพีมอสที่มีฐานรองชนิดเอ็นสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$V_{TP} = (-|Q_{SD(MAX)}| - Q'_{SS}) \left(\frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} \right) + \phi_{MS} - 2\phi_{FN} \quad (2.6)$$

โดยที่ V_{TP} คือค่าแรงดันขีดเริ่ม และ ϕ_{FN} คือค่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิเอ็กทรีนซิกชนิดเอ็นกับระดับพลังงานเฟอร์มิอินทรีนซิก

เราสามารถใช้ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันหาค่าแรงดันขีดเริ่มในขณะที่ V_{DS} มีค่าน้อยๆ จากสมการกระแสไม่อิ่มตัวจะประมาณได้ดังนี้

$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad (2.7)$$

เมื่อนำมาพลอต เราจะได้ดังรูป 2.8 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ ค่ากระแสเดรน I_D กับ V_{GS} ที่ค่า V_{DS} คงที่ จุดต่างๆจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแต่จะมีค่าเบี่ยงเบนไปบ้างที่ค่า V_{GS} ค่าน้อยๆเนื่องจากการนำกระแสก่อนแรงดันขีดเริ่มแรงดันขีดเริ่มหาได้จากจุดตัดแกน X หรืออาจหาได้จากกระแสอิ่มตัวโดยการใส่รากที่สองของกระแสเดรนจะได้ว่า

$$\sqrt{I_{D,sat}} = \sqrt{\frac{W\mu_n C_{ox}}{2L}} (V_{GS} - V_T) \quad (2.8)$$

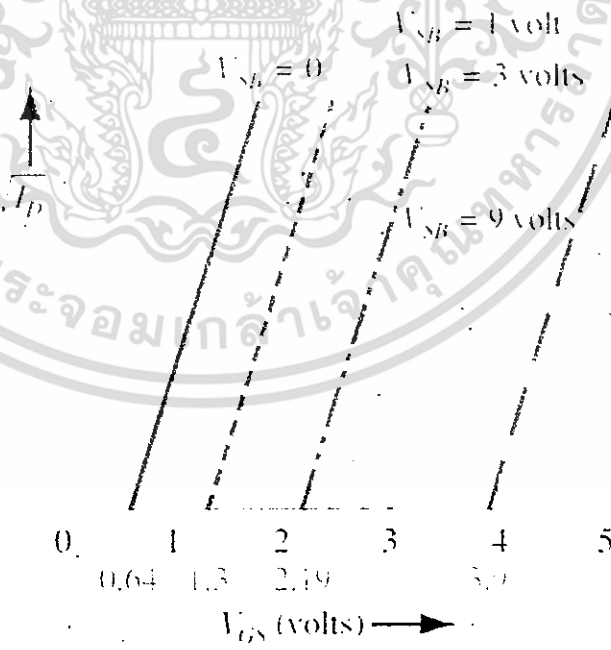
เมื่อทำการพลอตความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_D}$ กับแกน X โดยทั่วไปแล้ววิธีหาค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยวิธีนี้จะได้อ่านค่าที่น่าเชื่อถือกว่าวิธีแรก



รูป 2.8 (a) I_D กับ V_{GS} (ที่ V_{DS} ค่าน้อยๆ) สำหรับมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์
 (b) $\sqrt{I_D}$ กับ V_{GS} ที่กระแสมีตัวสำหรับมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ (เส้นกราฟ A) และแบบดีพีซีเอ็น (เส้นกราฟ B)

2.4 ผลกระทบจากการไบแอสฐานรอง (substrate bias effect)

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมา ฐานรองหรือบอดี้ (body) จะถูกต่อร่วมกับซอสและให้มีความเป็นกราวด์ ในวงจรมอสเฟต ซอสและบอดี้ อาจจะมีศักย์ที่ไม่เท่ากัน รูปที่ 2.9 แสดงมอสเฟตช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น โดยปกติแล้ว V_{SB} คือค่าแรงดันระหว่างซอส(s) กับฐานรอง (B) มีค่าไบแอสกลับทาง(reverse bias) แต่ในกรณี แต่ในกรณีที่ค่า V_{SB} มีค่าไม่เป็นศูนย์ ค่าแรงดันขีดเริ่ม V_T จะมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 เป็นผลการหาค่าแรงดันขีดเริ่มในขณะที่มีค่าแรงดันค่าต่างๆ

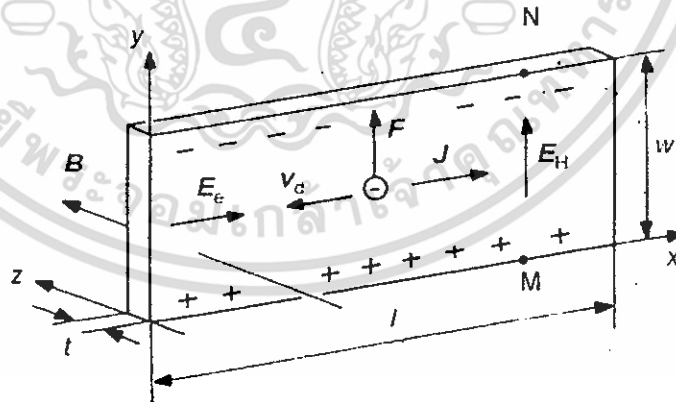
$$\Delta V_T = \frac{-Q'_{SD}}{C_{ox}} = \frac{\sqrt{2e\epsilon_s N_a}}{C_{ox}} \left[\sqrt{2\phi_{fP} + V_{SB}} + \sqrt{2\phi_{fP}} \right] \quad (2.9)$$

โดยที่

- V_T = การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่ม
- N_a = ความเข้มข้นสารเจือสำหรับฐานรองชนิดพี
- e = ประจุอิเล็กตรอน
- ϵ_s = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสารกึ่งตัวนำ

เซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor) เป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำที่มนุษย์สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์หลายอย่างด้วยกัน เช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall Effect), ปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก(Magnetoresistive Effect) หรือ ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ เป็นต้น ซึ่งตลอดหลายปีที่ผ่านมา ปรากฏการณ์ฮอลล์และปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ได้นำมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษาเรียนรู้ รวมถึงนำหลักการของฮอลล์มาใช้สร้างอุปกรณ์หลายชนิดเช่น คีย์บอร์ด(Keyboards), แมกนีโตมิเตอร์(Magnetometers), เซ็นเซอร์วัดระยะ(displacement sensors) รวมถึงแมกเนติกเซ็นเซอร์ (magnetic sensors) ต่างๆ มากมาย เป็นต้น

2.5 หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)



รูปที่ 2.10 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงอุปกรณ์ฮอลล์เพลทในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความกว้าง w ยาว l และหนา t เมื่อฮอลล์เพลทได้รับสนามไฟฟ้า E_x ในทิศทาง $+x$ จะทำให้เกิดมีแรงกระทำกับ

ประจุพาหะ วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นพาหะส่วนมากคืออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่แบบบดริฟท์ด้วยความเร็วค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า “ความเร็วดริฟท์” (Drift velocity: V_d) โดยมีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าคือทิศทาง x และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า I_x ไหลในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือก็คือมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า เมื่อให้สนามแม่เหล็ก B ในทิศทาง $+z$ และตั้งฉากกับทิศทางของกระแส I_x พบว่าจะมีแรงกระทำต่อพาหะเกิดขึ้น ซึ่งแรงที่กระทำต่อพาหะนี้เรียกว่า “แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force: F_L)” ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนไปด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทางทิศ $+y$ ส่วนทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศทาง $-y$ จะเกิดประจุไฟฟ้าชนิดตรงกันข้ามอีกชนิดหนึ่งซึ่งก็คือ โฮล (hole) สิ่งนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นซึ่งเรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H มีทิศทาง $+y$ สนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้เกิดแรงไฟฟ้ากระทำกับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางทิศ $-y$ เมื่อแรงลอเรนซ์สมดุลกับแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทาง $+x$ เช่นเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอีก เมื่อทำการวัดแรงดันทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศ y จะพบแรงดันฮอลล์ (V_H) ขึ้น ซึ่งแรงดันฮอลล์หาได้จากสมการที่ 2.1

$$V_H = R_H I_x B_z / t \quad (2.1)$$

R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall constant) จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่าแรงดันฮอลล์จะแปรผกผันกับความหนาของแผ่นฮอลล์เพลท

จากที่กล่าวก่อนหน้านี้ว่าอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดริฟท์เฉลี่ยผ่านทางฮอลล์เพลทเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์ (F_L) ซึ่งแรงลอเรนซ์หาได้จากสมการที่ 2.2

$$\vec{F}_L = -q (\vec{v}_x \times \vec{B}_z) \quad (2.2)$$

v_x คือ ความเร็วดริฟท์เฉลี่ยของประจุพาหะในทิศทาง x

อิเล็กตรอนจะถูกเบี่ยงเบนด้วยแรงลอเรนซ์ ในทิศทาง $+y$ ไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท ส่วนทิศทาง $-y$ ก็เกิดพาหะประจุกชนิดหนึ่งซึ่งก็คือโฮล สิ่งนี้จะสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนอีก สนามไฟฟ้าฮอลล์ในขณะนี้หาได้จากสมการที่ 2.3

$$E_H = v_x B_z \quad (2.3)$$

ความหนาแน่นกระแส J_x คือ

$$J_x = n q v_x \quad (2.4)$$

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน $= -1.6 \times 10^{-19}$ คูอมบ์ ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 และ 2.4 สนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H จะแสดงตามสมการที่ 2.5

$$E_H = -J_x B_z / nq \quad (2.5)$$

คูณทั้งสองข้างด้วยความกว้าง w ก็จะได้

$$E_H w = -J_x w t B_z / nq t \quad (2.6)$$

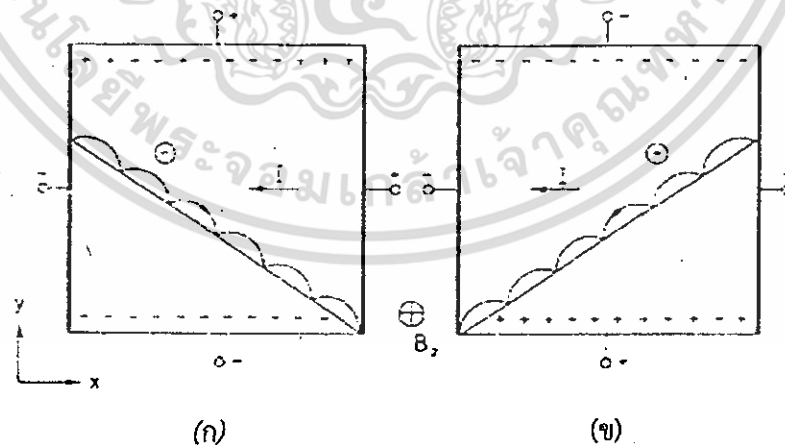
ดังนั้นแรงดันฮอลล์จะได้

$$V_H = -I_x B_z / nq t \quad (2.7)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 2.7 กับสมการที่ 2.1 จะได้สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) ของอิเล็กตรอนตามสมการที่ 2.8

$$R_H \text{ (electrons)} = -1/nq \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) จะแปรผกผันกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration) สิ่งนี้จึงอธิบายความจริงที่ว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำจะมีมากกว่าในโลหะ อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ถูกเบี่ยงเบนด้วยผลของสนามแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 2.11(ก) นำไปสู่แรงดันฮอลล์ที่มีค่าเป็นลบ โฮลก็เป็นพาหะนำไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งในสารกึ่งตัวนำ แรงลอเรนซ์ F_L ของประจุพาหะที่เป็นบวกเช่นโฮลจะตรงข้ามกับประจุพาหะที่เป็นลบ ซึ่งส่วนของโฮลจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.12(ข) แรงดันฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) มีค่าเป็นบวก



รูปที่ 2.11 การเบี่ยงเบนของ (ก) อิเล็กตรอน (ข) โฮล ในฮอลล์เพลทซึ่งเป็นผลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง z

จากรูปที่ 2.2 พาหะทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลเมื่อเคลื่อนที่ด้วยผลของสนามแม่เหล็กจะเกิดการชนกับแลตทิซ (lattice) หรืออะตอมสารเจือ^[20-22] แต่ละการชนความเร็วของพาหะจะลดลงเป็นศูนย์ และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอีก

ครึ่งด้วยผลของสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และแรงลอเรนซ์ F_L ในทิศทาง y สำหรับสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีค่าเป็นบวกตามสมการที่ 2.9

$$R_H \text{ (holes)} = +1/pq \quad (2.9)$$

การได้มาถึงสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างเข้มข้นสามารถหาได้จากที่กล่าวมา แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารชนิดอินทรีนซิคเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กพาหะประจุทั้งสองชนิดจะเบี่ยงเบนไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้กระแสไหลในทิศทางเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนอีก ซึ่งสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศทาง y แสดงตามสมการที่ 2.10

$$E_H = E_y = v_x B_z \quad (2.10)$$

เมื่อมีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift (Drift velocity)

$$v_x = -\mu_n E_x \quad (2.11)$$

ที่ μ_n คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าเป็นบวก สำหรับความหนาแน่นกระแสในทิศทาง y จะได้

$$J_{ny} = qn\mu_n E_y \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.10 – 2.11 เราจะพบว่า

$$J_{ny} = -qn\mu_n^2 B_z E_x \quad (2.13)$$

สำหรับโฮลจะได้

$$J_{py} = +qp\mu_p^2 B_z E_x \quad (2.14)$$

สำหรับความหนาแน่นกระแสทั้งหมดในทิศทาง y แสดงในสมการที่ 2.15

$$J_y = q(n\mu_n + p\mu_p) E_y \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.15 จะเท่ากับผลบวกของสมการที่ 2.13 กับ 2.14

$$q(n\mu_n + p\mu_p) E_y = -q(n\mu_n^2 - p\mu_p^2) B_z E_x \quad (2.16)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้า E_y จะแสดงตามสมการที่ 2.17

$$E_y = (p\mu_p^2 - n\mu_n^2) B_z E_x / (p\mu_p + n\mu_n) \quad (2.17)$$

จากสนามไฟฟ้าฮอลล์ $E_y = R_H J_x B_z$ (2.18)

และความหนาแน่นกระแส $J_x = q(n\mu_n + p\mu_p) E_x$ (2.19)

จากสมการที่ 2.17, 2.18 และ 2.19 สัมประสิทธิ์ฮอลล์สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิคแสดงตามสมการที่ 2.20

$$R_H = (p\mu_p^2 - n\mu_n^2) / q(p\mu_p + n\mu_n)^2 \quad (2.20)$$

สำหรับวัสดุชนิดเอ็น ($n \gg p$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์ $R_H = -1/nq$ (2.21)

สำหรับวัสดุชนิดพี ($p \gg n$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์ $R_H = 1/pq$ (2.22)

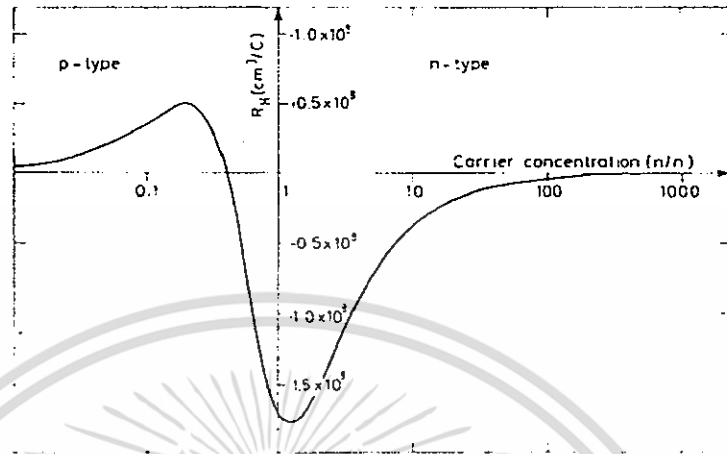
จะเห็นว่าในสมการที่ 2.21 และ 2.22 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จะคล้ายกับกรณีในสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างเข้มข้นตามสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิคแสดงดังสมการที่ 2.23

$$R_H = (\mu_p - \mu_n) / n_i q (\mu_p + \mu_n) \quad (2.23)$$

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration) ในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรีนซิค (n_i) ซึ่งเปลี่ยนแปลงจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จากรูปเราจะพบค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์เป็นศูนย์ที่บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดพี เนื่องจากโมบิลิตี้ (mobility) ที่แตกต่างกันของอิเล็กตรอนกับโฮล และจากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่าในที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือน้อยจะทำให้สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงขึ้นได้

ปรากฏการณ์ฮอลล์ยังเป็นวิธีที่นิยมนำมาวัดค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะได้อีกด้วย

จากสมการ $J_x = pqv_x$ หรือ $v_x = \frac{J_x}{pq}$ (2.24)



รูปที่ 2.12 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (n_i)

และสนามไฟฟ้าฮอลล์ $E_H = E_y = J_x B_z / pq$ (2.25)

ดังนั้น $\frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pq} = R_H$ (2.26)

จากรูป 2.1 เมื่อทำการวัดแรงดันฮอลล์ระหว่างขอบด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศทาง y ซึ่งมีระยะความกว้างเท่ากับ w จะได้

$$V_y = V_H = E_y w \quad \text{หรือ} \quad E_y = \frac{V_H}{w} \quad (2.27)$$

โดย V_H คือแรงดันฮอลล์ ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่าสมการกระแส $J_x = \frac{I}{w \cdot t}$ และ $E_y = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการที่ 2.26 จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{w I B_z} \cdot w \cdot t \quad \text{หรือ} \quad R_H = \frac{V_H \cdot t}{I B_z} = \frac{1}{pq} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ 2.28 ความหนาแน่นของโฮลคือ

$$p = p_0 = \frac{1}{q R_H} = \frac{I_x B_z}{q \cdot t \cdot V_H} \quad (2.29)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ
$$\rho = R \frac{w \cdot t}{l} = \frac{V \cdot w \cdot t}{I_x \cdot l} \quad (2.30)$$

โดย R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสาร (โอห์ม)

และจากสมการ $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{pq\mu_p}$ ดังนั้นจะได้ว่า
$$\mu_p = \frac{1}{\rho \cdot p \cdot q} = \frac{1}{\rho} \cdot R_H \quad (2.31)$$

จากสมการ 2.29, 2.30 และ 2.31 จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ, สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้แล้วจากสมการ 2.31 โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) และสภาพต้านทาน (ρ) ที่อุณหภูมิค่าต่างๆจะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพคล่อง (μ_p) และค่าความหนาแน่นของพาหะที่อุณหภูมิต่างๆได้ ซึ่งข้อมูลนี้มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆของสารกึ่งตัวนำ

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าแรงดันฮอลล์ (R_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือมีค่าเป็นลบ(-) คือ $R_H = -1/nq$ โดยเฉพาะแรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารชนิดพี คือมีค่าเป็นลบด้วย ดังนั้น การวัดแรงดันของฮอลล์ทำให้เราสามารถบ่งชี้ชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดเอ็นหรือพีได้อีกด้วย

ขณะที่ค่าความไวในการตอบสนอง (Sensitivity: S) คือ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H \cdot G}{t} = \frac{G}{n \cdot q \cdot t} \quad (2.32)$$

โดยที่ G คือ พารามิเตอร์โครงสร้าง (geometry factor) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.33

$$G = \frac{V_H \cdot t}{R_H I_x B_z} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.32 จะเห็นได้ว่า ค่าความไวในการตอบสนองจะมีค่าสูงเมื่อฮอลล์เพลทมีความหนาแน่นของพาหะที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ E_H และ E_x

ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x เนื่องจากแรงลอเรนซ์ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะซึ่งทำมุม θ_H กับแกน +x ซึ่งมุม θ_H ที่เกิดขึ้นเรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta_H = \frac{E_H}{E_x} \quad (2.34)$$

โดยการแทนค่า $E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e}$ และ $J_x = \sigma \cdot E_x$ ลงในสมการที่ 2.34 จะได้ว่า

$$\tan \theta_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e} \cdot \frac{\sigma}{J_x} = \frac{\sigma \cdot B_z}{p \cdot e}$$

หรือ

$$\tan \theta_H = \frac{\sigma \cdot B_z}{p \cdot e} = p \cdot e \cdot \mu_p \frac{B_z}{p \cdot e} = \mu_p \cdot B_z \quad (2.35)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\sigma}{p \cdot e} = \mu_p$$

หรือ

$$\mu_p = \sigma \cdot R_H \quad (2.36)$$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันของพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ R_{HI} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{HI} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (2.37)$$

และ $\tan \theta = \frac{3\pi}{8} \mu_p \cdot B_z = \mu_H \cdot B_z$ หรือ $\mu_H = \frac{\tan \theta_H}{B_z} = \frac{3\pi}{8} \mu_p$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu_{HI} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (2.38)$$

เมื่อ μ_H คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility)

และ μ_{HI} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันกับของพาหะกับอะตอมสารเจือ R_{HI} แสดงได้ดังสมการที่ (2.39)

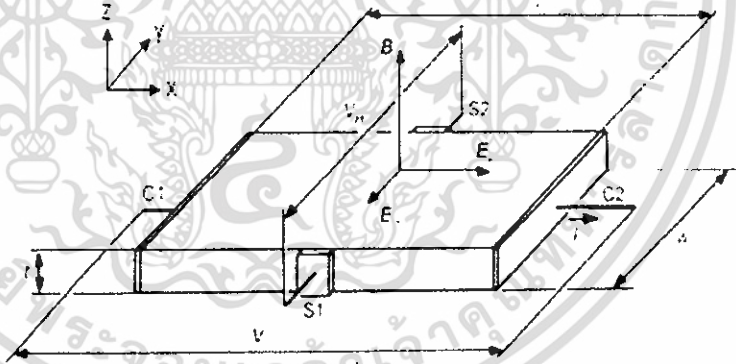
$$R_{Hh} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93R_H \quad (2.39)$$

และ
$$\mu_{Hh} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93\mu_p \quad (2.40)$$

เมื่อ μ_{Hh} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ และ μ_p คือ ค่า Mobility ของโฮล

2.6 เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท (Hallplate sensor)

เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการทำงาน โดยลักษณะของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงโครงสร้างของแผ่นฮอลล์ เซ็นเซอร์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-substrate) ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ w ความยาวเท่ากับ l และความหนาของแผ่นฮอลล์เท่ากับ t โดยประกอบด้วยขั้วใช้งาน 4 ขั้วคือ C1, C2, S1 และ S2 เมื่อให้กระแสไฟฟ้าระหว่างขา C1 กับ C2 และสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางกระแสจะปรากฏแรงดันฮอลล์ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขา S1 กับ S2 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.41



รูปที่ 2.13 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์

$$V_H = \frac{R_H \cdot G \cdot I \cdot B_z}{t} \quad (2.41)$$

โดยที่ R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ G คือพารามิเตอร์โครงสร้าง t คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์ B_z คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาจากพฤติกรรมของพาหะคือ อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมากๆ ($n \gg p$) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot t} \cdot G \cdot B_z \cdot I \quad (2.42)$$

โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

จากสมการที่ 2.41 และ 2.42 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.43

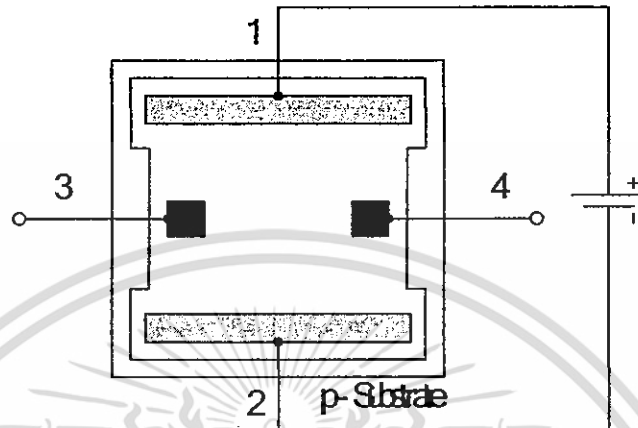
$$G = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.43)$$

โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า $G = 1$ ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้ $l/w = 3$ และ $s/w < 1$ โดยตำแหน่งของขั้วเซ็นเซอร์จะออกแบบที่ระยะ $1/2$ ของความยาวฮอลล์เพลท ในปัจจุบันเซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เซ็นเซอร์ชนิดแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยรูปที่ 2.14 (ก) และ 2.14(ข) แสดงมุมมองด้านบนและด้านภาคตัดขวางของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้งชนิดเอ็น ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์โครงสร้างคือ ใช้ฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียลระหว่าง $5 - 10 \text{ } \mu\text{m}$ โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ $200 \times 200 \text{ } \mu\text{m}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิ (Epilayer) สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการยิงฝังประจุ (Ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้ ฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งสามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน โดยแสดงดังรูปที่ 2.15(ก) และ 2.15(ข) โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเซ็นเซอร์แม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และพาหะจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ในลักษณะแนวตั้ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวของอุปกรณ์

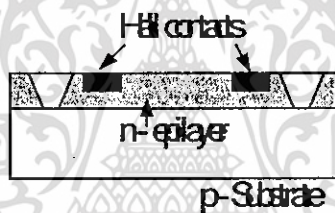
2.7 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)

นอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท เรายังสามารถพบกับปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ได้อีกด้วย ซึ่งปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์คือ ปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของวัสดุมีค่าเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่กล่าวมานี้มีสาเหตุหลักๆอยู่ 2 สาเหตุคือ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจาก

การกระจายความเร็วของประจุพาหะ หรือที่เรียกว่า (Physical magnetoresistance effect) และ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เกิดจากรูปร่างของตัวอุปกรณ์ หรือที่เรียกว่า (Geometrical magnetoresistance effect)

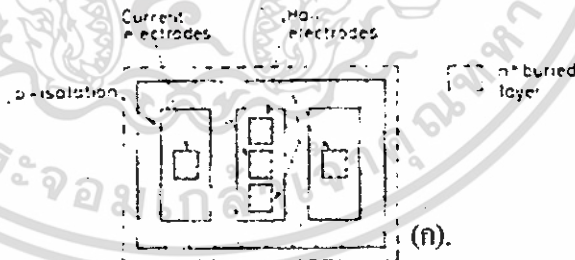


(ก).

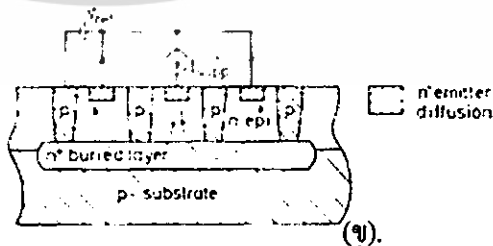


(ข).

รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง (ก).มุมมองด้านบน และ (ข).ภาคตัดขวาง



(ก).

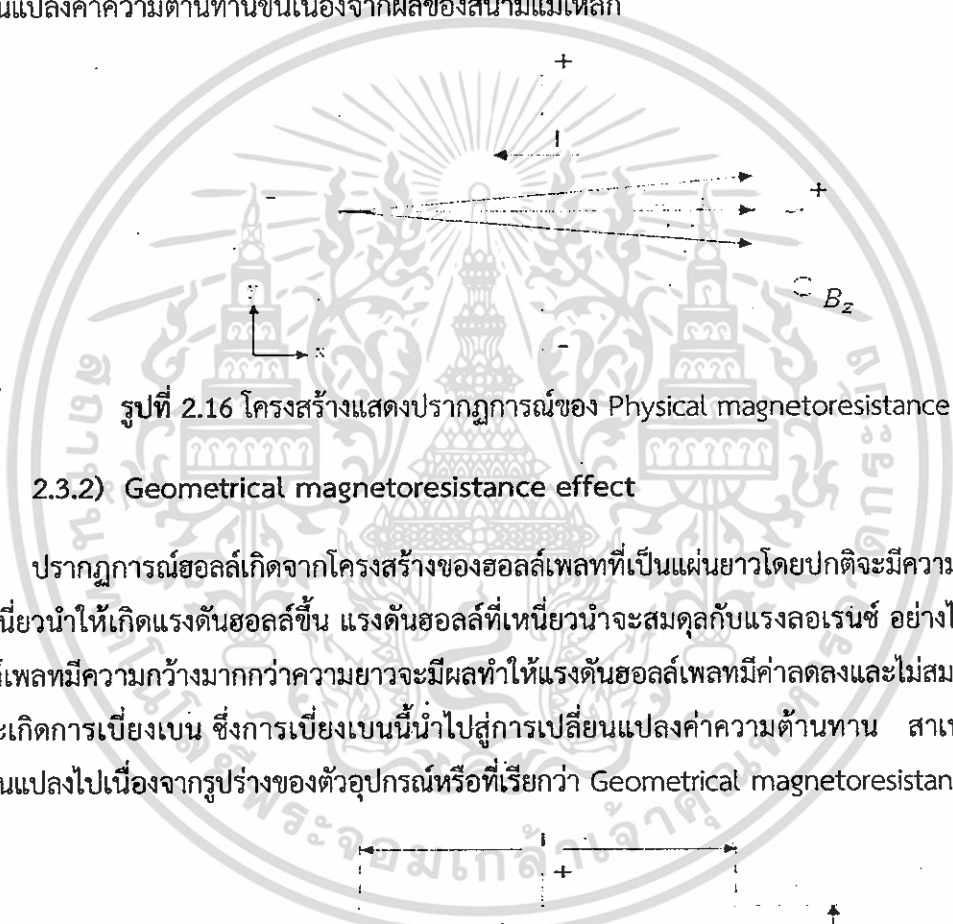


(ข).

รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก).มุมมองด้านบน และ (ข). ภาคตัดขวาง

2.3.1) Physical magnetoresistance effect

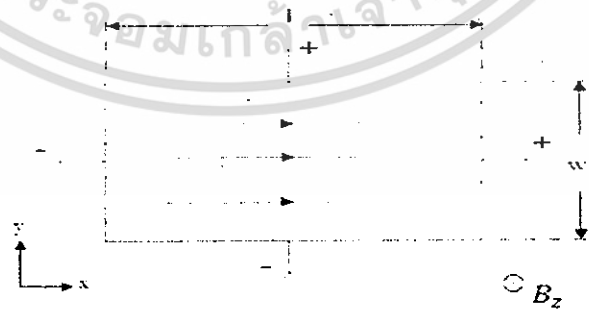
จากที่กล่าวมาเป็นการสมมุติว่าพาหะประจุทั้งหมดมีการกระจายความเร็วที่เท่ากัน แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้นซึ่งในกรณีของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพาหะประจุจะมีการกระจายความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำและอุณหภูมิ ดังนั้นจึงมีผลทำให้พาหะประจุมีแรงลอเรนซ์ที่ต่างกัน ในกรณีนี้พาหะประจุบางตัวแรงลอเรนซ์จะใหญ่กว่าแรงเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าฮอลล์แต่พาหะประจุบางตัวอาจไม่เป็นเช่นนั้น สิ่งนี้มีผลทำให้พาหะประจุบางตัวเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นส่วนพาหะประจุบางตัวเกิดการเบี่ยงเบนลงซึ่งแสดงในรูปที่ 2.16 ปรากฏการณ์นี้นำไปสู่ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขึ้นเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.16 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Physical magnetoresistance effect

2.3.2) Geometrical magnetoresistance effect

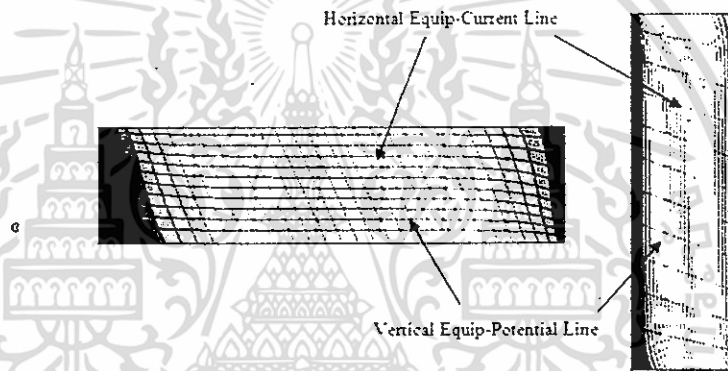
ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากโครงสร้างของฮอลล์เพลทที่เป็นแผ่นยาวโดยปกติจะมีความยาวมากกว่าความกว้าง จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันฮอลล์ขึ้น แรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำจะสมดุลกับแรงลอเรนซ์ อย่างไรก็ตามเมื่อออกแบบให้ฮอลล์เพลทมีความกว้างมากกว่าความยาวจะมีผลทำให้แรงดันฮอลล์เพลทมีค่าลดลงและไม่สมดุลกับแรงลอเรนซ์ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบน ซึ่งการเบี่ยงเบนนี้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน สาเหตุของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากรูปร่างของตัวอุปกรณ์หรือที่เรียกว่า Geometrical magnetoresistance effect จากรูปที่



รูปที่ 2.17 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Geometrical magnetoresistance effect

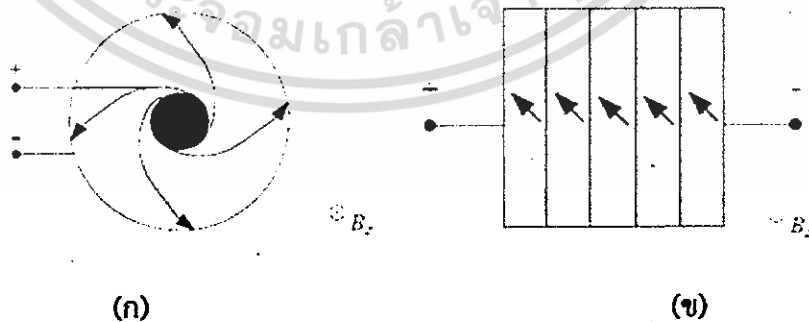
2.17 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์จะแสดงออกมามากเมื่อฮอลล์เพลทมีขนาดของความยาวที่สั้นเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างและผลแมกนีโตรีซิสแดนท์จะแสดงออกมามากที่สุดบริเวณขั้วสัมผัส

รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์และความหนาแน่นกระแสในฮอลล์เพลท จากตัวอย่างแสดงฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาวและขนาดสั้น ความหนาแน่นกระแสถูกแทนที่ด้วยเส้นกระแส (Equip-current lines) (เส้นตรงมีหัวลูกศร) และสนามไฟฟ้าฮอลล์ถูกแทนที่ด้วยเส้นศักย์ไฟฟ้า (Equip-potential lines) (เส้นตรงไม่มีหัวลูกศร) ในบริเวณตรงส่วนกลางของฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาวเส้นกระแสยังคงไหลโดยไม่มี การเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ซึ่งสังเกตได้จากเส้นศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นดังรูป 2.18(ก) และในบริเวณส่วนกลางของแผ่นฮอลล์เพลทที่มีขนาดสั้นเส้นศักย์ไฟฟ้ายังคงขนาดเท่ากับหน้าสัมผัสไฟฟ้าซึ่งแสดงว่าไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นจึงทำให้เส้นกระแสเกิดการเบี่ยงเบนตามแรงลอเรนซ์ซึ่งสังเกตจากรูปที่ 2.18(ข)



รูปที่ 2.18 แสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาว (l) และขนาดสั้น (s)

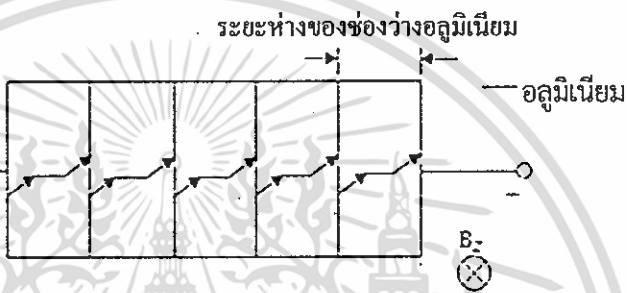
ซึ่งการทำให้ผลปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์มีค่ามากขึ้นจะต้องทำการออกแบบให้แรงดันฮอลล์มีค่าลดลงหรือไม่สามารถเกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นได้เพื่อให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์อย่างเต็มที่ ซึ่งมีสองวิธีดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสแดนท์ (ก) แบบวงกลม (ดิสก์) และ (ข) แบบอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 2.19(ก) แบบติสก์จะมีวงกลมวงนอกและวงใน การออกแบบนี้มีผลทำให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ไม่สามารถเกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นมาได้ ส่วนอีกหนึ่งวิธีแสดงในรูปที่ 2.19(ข) เป็นการอนุกรมค่าความต้านทานรวมของฮอลล์เพลทโดยอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (l/w) มีค่าน้อยนำมาต่ออนุกรมกัน ส่งผลให้ไม่มีแรงดันฮอลล์เกิดขึ้นมาได้ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนตามแรงลอเรนซ์เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กอย่างไรก็ตาม โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลทมีข้อเสียเปรียบในเรื่องการออกแบบที่ค่อนข้าง

ยุ่งยากซับซ้อนและระยะห่างระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมมีผลกระทบกับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนที่ดังแสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.20 โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 2.20 โดยถ้าช่องว่างของอลูมิเนียมมีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมที่มากขึ้นก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นในระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมได้ ซึ่งอาจส่งผลกับค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มีค่าลดลง โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะลดลง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเราจึงทำการออกแบบโครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่ โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเพื่อช่วยในเรื่องของการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากเกี่ยวกับระยะห่างดังกล่าว

2.8 แมกเฟท (MAGFET)

อุปกรณ์มอสเฟทสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยนำส่วนช่องทางเดินกระแสหรือชั้นกลับมาใช้เป็นแผ่นชั้นสารกึ่งตัวนำ โดยการทำงานสามารถใช้ได้ทั้งแบบหลักการฮอลล์โหมดแรงดันและโหมดกระแส สำหรับชื่อMAGFET ต้องการสื่อให้รู้ว่ามิโครงสร้างเป็นแบบมอสเฟท

HALL MAGFET

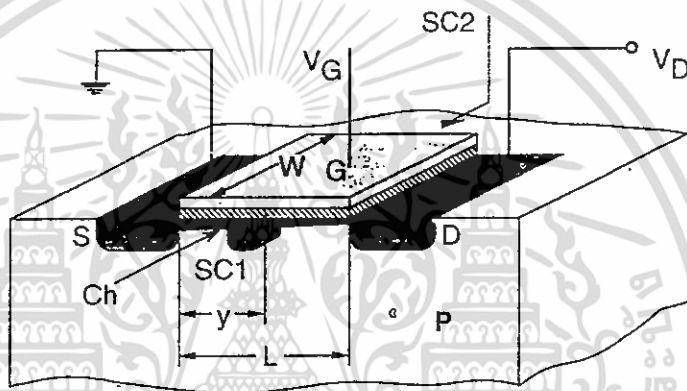
โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แมกเฟทแสดงได้ดังรูป 2.21 ช่องทางเดินกระแสที่อยู่ใต้เกตจะมีความบางมากๆ ความหนาแน่นประจุที่ช่องทางเดินกระแส Q_{ch} มีค่าเท่ากับ $C_{ox}(V_G - V_T)$ ซึ่งค่า C_{ox} คือความหนาแน่นตัวเก็บประจุที่เกตออกไซด์ V_G คือค่าแรงดันที่ใส่ที่เกต และ V_T คือค่าแรงดันขีดเริ่ม ขอส (S) และเดรน (D) ทำหน้าที่เหมือนคอนแทกกระแส บริเวณ n^+ ที่เพิ่มเข้ามาคือ sc1 และ sc2 มีหน้าที่นำค่าแรงดันฮอลล์ออกมาซึ่งจะถูกสร้างในชั้นตอนที่สร้างเดรนและขอส ความยาวช่องทางเดินกระแสคือ L ความกว้างคือ W ตำแหน่งคอนแทกที่นำค่าแรงดันฮอลล์ออกมาอยู่ที่ตำแหน่งห่างจากขอส y การทำงานของมอสเฟทจะทำงานช่วงไม่อิ่มตัว ($V_D < V_G - V_T$) ซึ่งมีการทำงานลักษณะคล้ายคลึง

กับอุปกรณ์ฮอลล์ โดยการแทนประจุฮอลล์ด้วย Q_{ch} แทนค่ากระแสไบแอสด้วยค่ากระแสเดรน I_D แทนค่าการสแคทเทอริงในเนื้อสารตัวการสแคทเทอริงที่ช่องทางเดินกระแส r_{ch} ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_H = GI_D Br_{ch}/Q_{ch} \quad (2.44)$$

ค่าความไวของอุปกรณ์แสดงได้ดังสมการ

$$S_I = \frac{Gr_{ch}}{Q_{ch}} = Gr_{ch}/(V_G - V_T) \quad (2.45)$$



รูป 2.21 โครงสร้างแมกเฟทแบบแรงดัน

Dual-Drain MAGFET

การทำงานของอุปกรณ์ MAGFET อีกอย่างคือการทำงานในโหมดกระแสแทนการใช้งานในโหมดแรงดัน โครงสร้างอุปกรณ์ในโหมดกระแสแสดงได้ดังรูป 2.22 โครงสร้างประกอบด้วยเดรนที่แยกจากกันสองส่วนคือ D_1 และ D_2 สนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับกระแสจะเหนี่ยวนำแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่ทำให้เกิดกระแสให้เสียความสมดุล จะเกิดความต่างกระแสเดรน $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$ ระหว่างขั้วเดรนทั้งสองในการทำงานช่วงไม่อิ่มตัวสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Delta I_D = G\mu_{ch}^*(L/W)BI_D \quad (2.46)$$

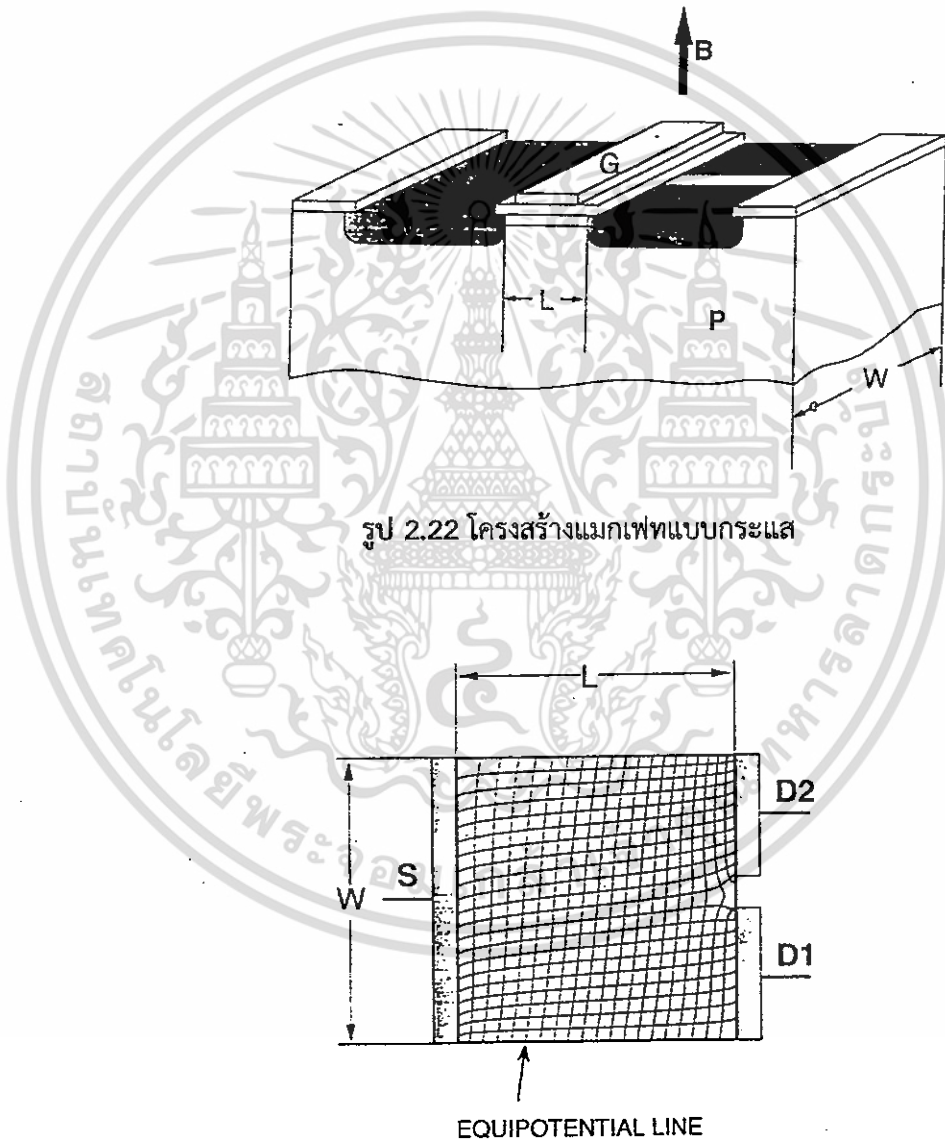
I_D คือค่ากระแสเดรนขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก G คือค่าแฟคเตอร์ทางรูปร่างเรขาคณิต G จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $L \ll W$ และช่องว่างระหว่างเดรนมีค่าแคบๆ ในรูป 2.23 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์โดยแสดงเส้นศักดาและกระแสที่เท่ากันของแมกเฟท ค่าความหนาแน่นกระแสในรูปที่ให้สนามแม่เหล็กแสดงความหนาแน่นกระแส D_2 มีค่ามากกว่า D_1 และในรูป 2.24 แสดงการกระจายตัวของอิเล็กตรอนตามแนวช่องทางเดินกระแส ความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงเมื่ออยู่ใกล้ขอสและจะลดลงตามแนวช่องทางเดินกระแสไปยังเดรนทั้งสอง ค่าความไวของอุปกรณ์นิยามได้ดังนี้

$$S = \left| \frac{\Delta I}{I_D B} \right| \quad (2.47)$$

สำหรับเพทปกติมีค่า $0.05 T^{-1}$ และค่าความไวสูงสุดคือ

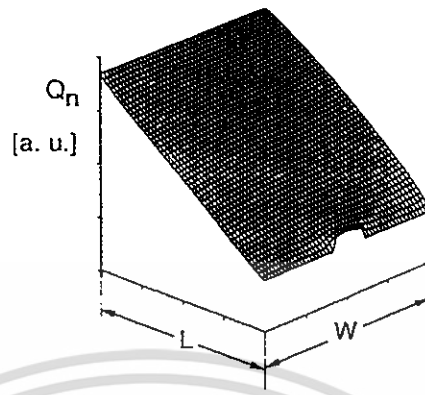
$$S_{max} = 0.74 \mu_{nch}^* \quad (2.48)$$

ซึ่งในกรณีที่ช่องทางเดินกระแสมีค่า $W \gg L$ และค่าระยะห่างระหว่างเดรนทั้งสองมีค่าแคบๆ



รูป 2.22 โครงสร้างแมกเฟทแบบกระแส

รูป 2.23 แบบจำลองแมกเฟทแสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์เท่ากัน



รูป 2.24 การกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนตามแนวช่องทางเดินกระแส



บทที่ 3

โปรแกรม Sentaurus TCAD และการจำลองแบบ

ในเนื้อหาของบทนี้เราจะกล่าวถึงเครื่องมือที่สำคัญในการจำลองแบบการทำงาน และการจำลองแบบที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โปรแกรม Sentaurus TCAD (Technology CAD) คือโปรแกรมหนึ่งที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงาน เพื่อพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างหรือพัฒนาตัวอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำให้ดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้เราจึงใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการดำเนินการทดสอบ เพื่อพัฒนาและปรับปรุงผลของแมกนีโตรีซิสแตนท์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท ตลอดถึงการออกแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท เช่นการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์ให้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นด้วย

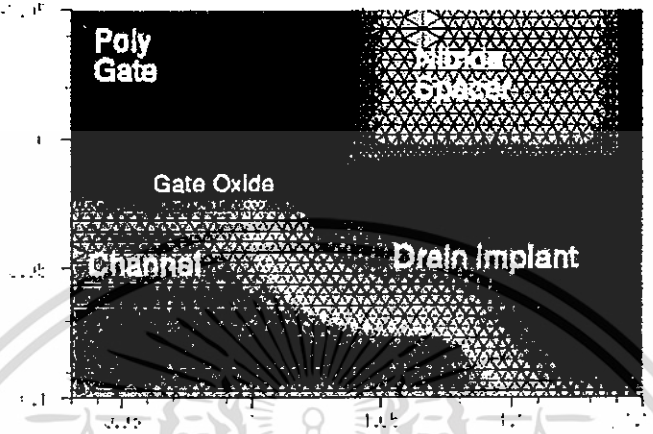
3.1 บทนำ TCAD

การจำลองการทำงาน TCAD ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะกับงานด้านอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ (semiconductor Industry) เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความเร็วในการค้นคว้าวิจัยหรือพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้ผลิตตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor device) ใช้ TCAD สำหรับการวิเคราะห์ผลซึ่งก็คือการตรวจสอบ, วิเคราะห์, การศึกษาวิธีที่ดีที่สุดขั้นตอนกระบวนการสร้างและยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนกระบวนการสร้างในวงจรรวมได้อีกด้วย โดย TCAD แสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ เช่น โครงสร้าง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, การฉีดพาหะ และการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก โดย TCAD ประกอบด้วยส่วนหลักๆ อยู่ 2 ส่วนในการจำลองการทำงานได้แก่ การจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง (process simulation) และการจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation) ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดต่างๆ ต่อไป

3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation)

ในการจำลองแบบกระบวนการสร้างประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งเป็นการจำลองแบบที่อยู่บนพื้นฐานของสมการทางฟิสิกส์ ในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่บนแผ่นฐานรอง เช่น ซิลิคอน จากนั้นส่วนของการจำลองแบบจะถูก

เมส (mesh) หรือกริด(grid) และถูกแทนที่ด้วย finite-element structure เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป ซึ่งในส่วนการจำลองแบบกระบวนการสร้างแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการจำลองแบบกระบวนการสร้าง

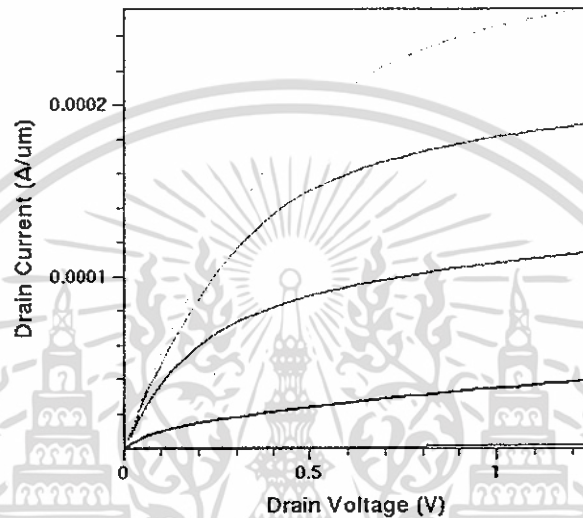
3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD เราสามารถที่จะจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ เช่น คุณสมบัติทางแสงหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกเมส จากนั้นจะถูกแทนที่ด้วย finite-element structure ซึ่งแต่ละโนดของตัวอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติทางด้านต่างๆ ที่ร่วมกันอยู่ เช่น ชนิดของวัสดุ (material type), ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (doping concentration), ความหนาแน่นกระแส (current density), สนามไฟฟ้า (electric field), อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ (generation and recombination rates) และคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งแต่ละโนดคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ จะถูกนำมาคำนวณซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD

ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ชีวไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นและกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เช่น แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นต้น การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD จะแก้ปัญหาสมการต่างๆมากมายที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบ เช่น สมการปัวซอง (Poisson equation), สมการความต่อเนื่องของพาหะ (carrier continuity equation) และสมการอื่นๆ หลังจากการแก้สมการเหล่านี้ ผลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

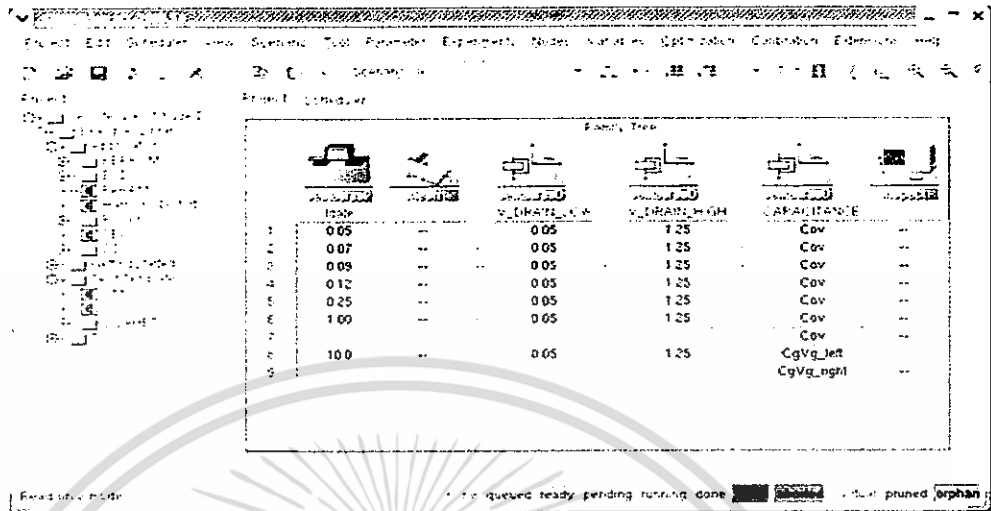
3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD

โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD จะมีส่วนประกอบย่อยๆ อยู่ 7 ส่วนดังนี้

- 3.2.1 Sentaurus Workbench
- 3.2.2 Sentaurus Process
- 3.2.3 Sentaurus Structure Editor
- 3.2.4 Sentaurus Device
- 3.2.5 Tecplot SV
- 3.2.6 Inspect

3.2.1 Sentaurus Workbench

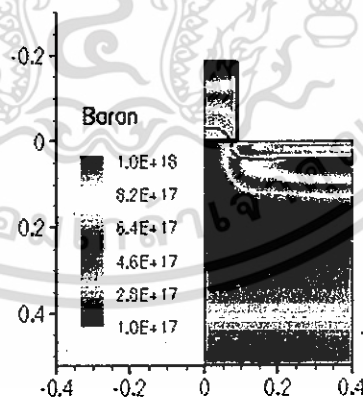
Sentaurus Workbench เป็นโปรแกรมส่วนหลักที่รวบรวมส่วนต่างๆในโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เข้าไว้ด้วยกันเช่น การจำลองแบบกระบวนการสร้าง(Sentaurus Process)^[29], การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Device)^[30] และเครื่องมือในการวิเคราะห์(Inspect) เป็นต้น โดยโปรแกรม Sentaurus Workbench สามารถให้ผู้ใช้กำหนดและเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ต้องการได้เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการจำลองการทำงาน โดย TCAD ในส่วนของ Sentaurus Workbench แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงโปรแกรมการจำลองแบบส่วนต่างๆใน Sentaurus Workbench

3.2.2 Sentaurus Process

Sentaurus Process เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนขบวนการสร้าง เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งใน Sentaurus Process จะใช้คำสั่งในการจำลองแบบการทำงานซึ่งจะประกอบไปด้วยคำสั่งต่างๆ เช่น การกำหนดชนิดและตำแหน่งฐานรอง, กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) หรือกระบวนการอิมพลาแทนท์ (implantation) เป็นต้น โดยรูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการจำลองแบบการอิมพลาแทนท์

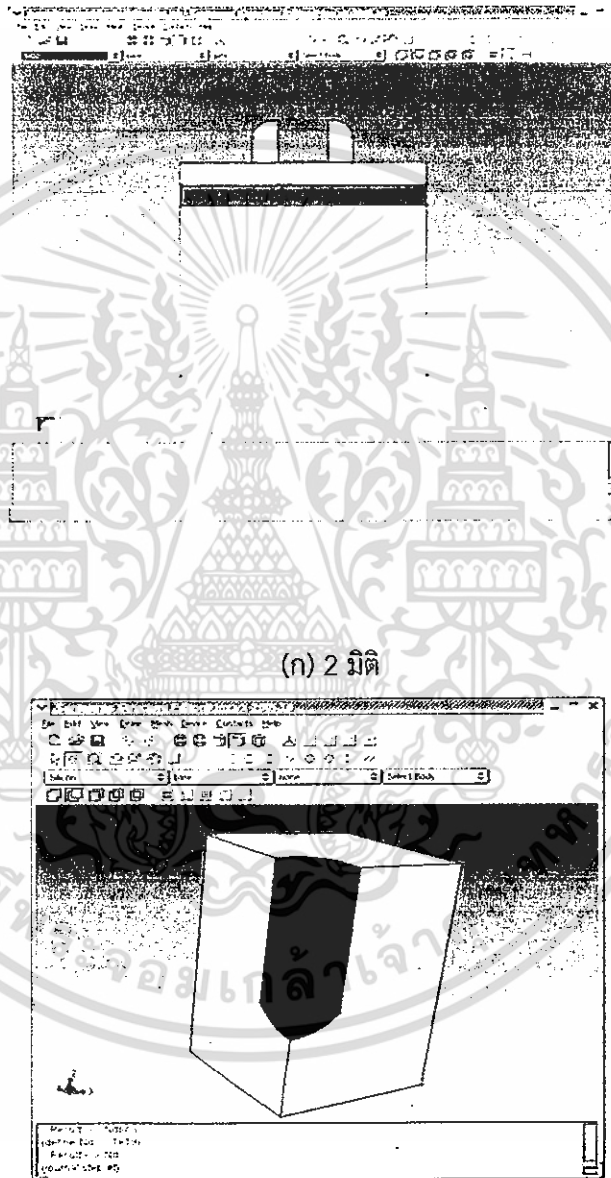


รูปที่ 3.5 แสดงส่วนของการอิมพลาแทนท์ใน Sentaurus Process

3.2.3 Sentaurus Structure Editor

Sentaurus Structure Editor เป็นส่วนของการออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยสามารถที่จะทำการจำลองแบบรูปร่างและขนาดของตัวอุปกรณ์ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ โดยขั้นตอนแรกของการจำลองการทำงานทั้งใน

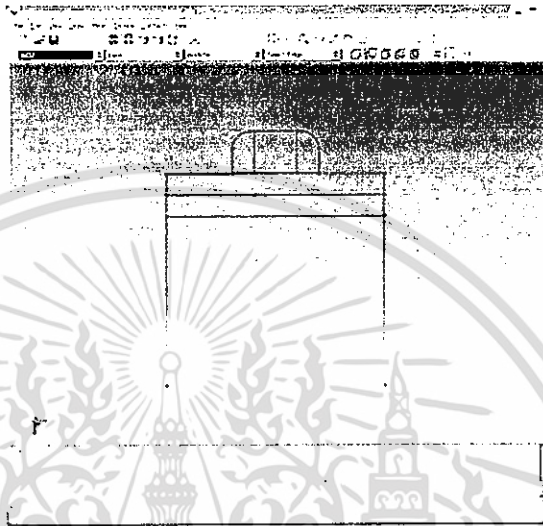
รูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เราจะทำการสร้างรูปร่างของตัวอุปกรณ์ เช่น สี่เหลี่ยมมุมฉาก(rectangles), รูปหลายเหลี่ยม (polygons), ลูกบาศก์(cuboids), รูปทรงกระบอก(cylinders), รูปทรงกลม(spheres) และรูปร่างๆ เป็นต้น ซึ่งรูปร่าง และโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเกิดจากรูปร่างง่ายๆเหล่านี้ ซึ่งหน้าต่างในส่วนของ Sentaurus Structure Editor^[31] แสดงในรูปที่ 3.6



(ข) 3 มิติ

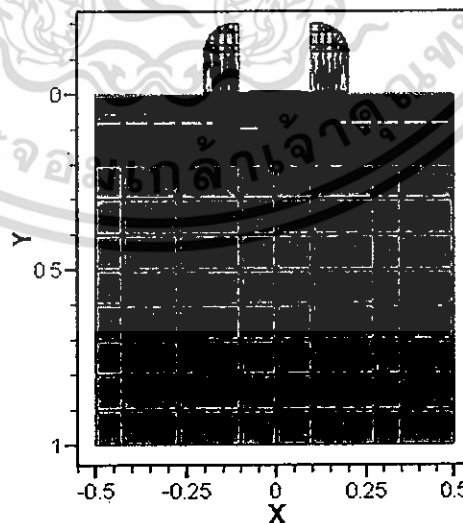
รูปที่ 3.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของ Sentaurus Structure Editor

ในส่วนการจำลองแบบทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เราสามารถที่จะกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันจากภายนอกโดยหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน

จากนั้นในส่วนของ Sentaurus Structure Editor เราสามารถกำหนดความเข้มข้นอะตอมสารเจือในบริเวณหรือส่วนต่างๆที่สร้างขึ้นมา ต่อจากนั้นจะเป็นการแบ่งกริด(grid) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์เคมีคอนดักเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ รูปที่ 3.8 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างรูปร่างตัวอุปกรณ์และการแบ่งกริดเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.8 แสดงการจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการแบ่งกริด

หลังจากการกำหนดกริดเสร็จแล้วก็จะเป็นการสร้างตัวอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ต่อจากนั้นก็เข้าสู่ในส่วนของการกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ ซึ่งในส่วนนี้จะอยู่ในส่วนของ Sentaurus Device ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

3.2.4 Sentaurus Device

Sentaurus Device คือการจำลองแบบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่นคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical), ความร้อน(thermal) หรือแสง(optical) ในตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งในคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆมากมายที่เราสามารถที่จะนำมาใช้กับตัวอุปกรณ์ เซมิคอนดักเตอร์หรือคุณสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสภาพเงื่อนไขในการจำลองแบบ Sentaurus Device จึงถูกใช้ในการประเมินตัวอุปกรณ์และเพื่อความเข้าใจในการทำงานของตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ภายใต้คุณสมบัติต่างๆทำงานได้ดีที่สุด ซึ่งในส่วน Sentaurus Device จะประกอบด้วยส่วนคำสั่งต่างๆมากมาย เช่น

3.2.4.1 File

3.2.4.2 Electrode

3.2.4.3 Physics

3.2.4.4 Plot

3.2.4.5 Solve

3.2.4.1 File

ในส่วน file จะเป็นการกำหนดไฟล์อินพุต และเอาต์พุต ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เช่น

File {

* Input Files

Grid = "nmos_msh.tdr"

* Output Files

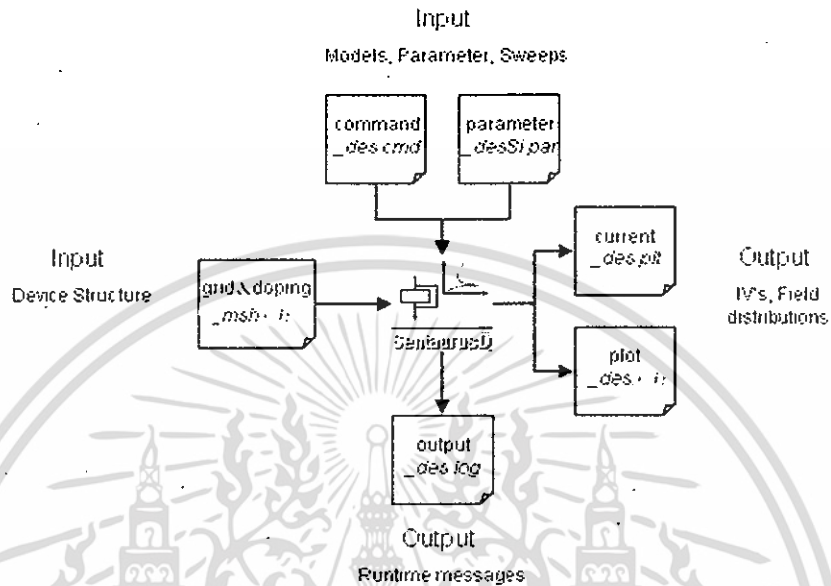
Current = "n1_des.plt"

Plot = "n1_des.tdr"

}

ในส่วนของ Input Files จะเป็นไฟล์ที่ได้หลังจากการสร้าง Sentaurus Structure Editor เสร็จแล้ว เช่นรูปร่างของตัวอุปกรณ์ก็จะประกอบไปด้วยขนาดและวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอุปกรณ์, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, ลักษณะการได้ป, ตำแหน่งของหน้าสัมผัสไฟฟ้า และขนาดของการแบ่งกริด(grid) หรือเมส(mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณ และในส่วน Output Files ก็จะเป็นข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูลต่างๆที่ต้องการหลังจาก Sentaurus Device ดำเนินการเสร็จแล้ว ซึ่งไฟล์เอาต์พุตเหล่านี้ก็จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณแล้ว เช่น ไฟล์ Current ก็

จะประกอบไปด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนไฟล์ `_des.log` เราใช้สำหรับตรวจสอบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งไฟล์อินพุต เอาต์พุต ต่างๆแสดงดังในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device

3.2.4.2 Electrode

ในส่วนของ Electrode เป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้า ซึ่งแต่ละหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดอยู่ที่นี่จะต้องสอดคล้องกับชื่อหน้าสัมผัสที่กำหนดไว้ใน Sentaurus Structure Editor ในส่วนของ Electrode เราสามารถที่จะกำหนดคุณสมบัติของหน้าสัมผัสไฟฟ้าเช่น แรงดัน, กระแส, หน้าสัมผัสไฟฟ้าแบบชนิดกัก, และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น

```
Electrode {
    { Name="source" Voltage=0.0 }
    { Name="drain" Voltage=0.0 Resistor=100}
    { Name="gate" Voltage=0.0 Barrier=-0.55}
    { Name="base" Voltage=0.0 Current=0 Barrier=-0.55}
    { Name="HEMTgate" Voltage=0.0 Schottky Barrier=0.78}
}
```

3.2.4.3 Physics

ในส่วนของ Physics จะเป็นส่วนที่โมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานจะถูกนำมาประกาศไว้ในส่วนนี้ ซึ่งตัวอย่างของโมเดลทางฟิสิกส์ เช่น โมเดลที่เกี่ยวกับสภาพคล่องของพาหะ (carrier mobility model), การเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ (band-gap narrowing model), การไอออไนซ์เนื่องจากการชน (impact ionization model) เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างโมเดลทางฟิสิกส์เช่น

Physics {

Mobility(DopingDep HighFieldSat)

}

ซึ่ง DopingDep หมายถึง การลดลงของสภาพคล่องของพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นอะตอมสารเจือ

HighFieldSat หมายถึง ความเร็วอิ่มตัวของพาหะ (velocity saturation) เมื่ออยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง

3.2.4.4 Plot

ในส่วน Plot เป็นส่วนที่เราใช้สำหรับดูการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้นหลังจากทำการจำลองในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จ โดยเราสามารถที่จะกำหนดในสิ่งที่เราต้องการทราบได้ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะหรือ ความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่ได้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงหลังจากการดำเนินการในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จแล้วซึ่งถูกเก็บไว้ในไฟล์เอาต์พุตในส่วนของ File ที่กล่าวไว้ในตอนต้น ซึ่งตัวอย่างในส่วนของ Plot เช่น

Plot {

eDensity hDensity eCurrent hCurrent

Potential SpaceCharge ElectricField

eMobility hMobility eVelocity hVelocity

Doping DonorConcentration AcceptorConcentration

}

3.2.4.5 Solve

ในส่วนของ Solve จะเป็นส่วนในการกำหนดค่าแรงดันหรือกระแสให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้า และ สมการทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น สมการปัวซอง(Poisson equation), สมการความต่อเนื่องของพาหะ(carrier continuity equations) และสมการอื่นๆที่จำเป็นในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการจำลองการทำงาน ซึ่งตัวอย่างของ Solve เช่น

```

Solve {
  Coupled(Iterations=100){ Poisson }

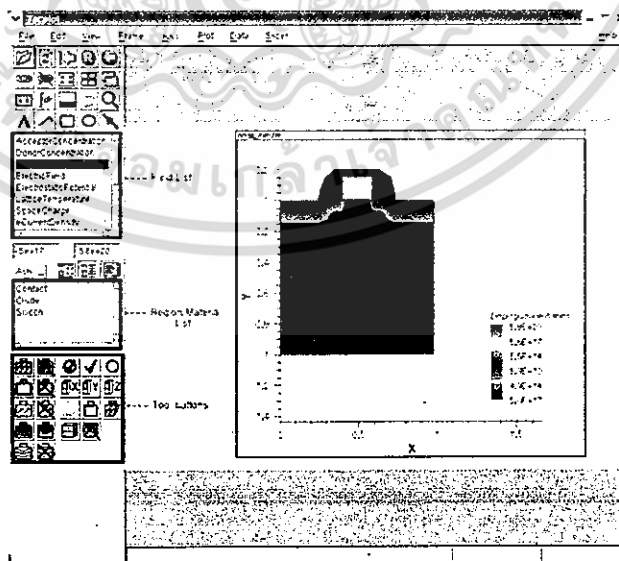
  Coupled{ Poisson Electron Hole }

  Quasistationary(
    Goal{ Name="contact name" Voltage= voltage value }
  ){ Coupled{ Poisson Electron Hole } }
}

```

3.2.5 Tecplot SV

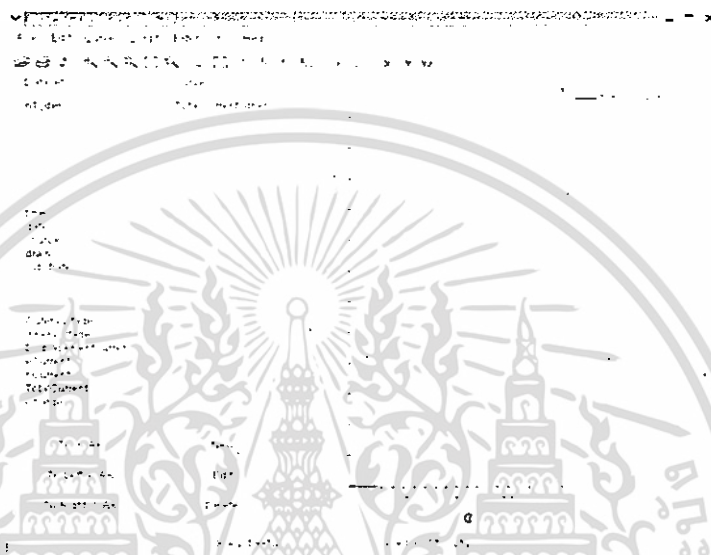
ส่วนของ Tecplot SV เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ในส่วนต่างๆที่ต้องการทราบซึ่งจะถูกกำหนดไว้แล้วในส่วน Plot โดย Tecplot SV จะแสดงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะ หรือ ความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งในส่วน Tecplot SV แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงส่วนโปรแกรม Tecplot SV

3.2.6 Inspect

Inspect คือเครื่องมืออีกชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานในรูปของกราฟ x-y (x-y data) เช่น ปริมาณความหนาแน่นการแพร่, ปริมาณกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect



รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect

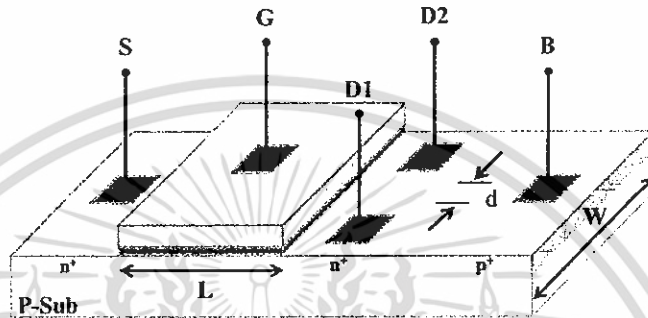
โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เราใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ในส่วนของการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทแบบต่างๆ เช่น ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท, การออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ให้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ดีขึ้นด้วย โดยพารามิเตอร์ที่เราใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ โดยในการจำลองแบบเราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน

3.3 โครงสร้างเพื่อศึกษาที่ใช้ในการจำลองแบบและการออกแบบ

ในการศึกษาวิจัยนี้เราใช้เครื่องมือ TCAD ในหลายวัตถุประสงค์คือ ประการแรกเพื่อศึกษาเพื่อการออกแบบอุปกรณ์เบื้องต้น ประการที่สองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์จริง ประการที่สามเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ประการสุดท้ายเพื่อช่วยอธิบายกลไกการทำงานของอุปกรณ์ โดยโครงสร้างที่เราทำการศึกษามี 3 โครงสร้างหลักดังต่อไปนี้

3.3.1 โครงสร้างแมกเฟต (MAGFET)

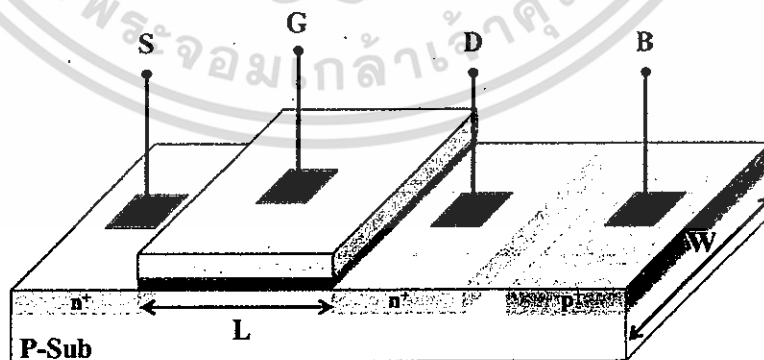
โครงสร้างแมกเฟตที่นำมาศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์แมกเฟต โดยเป็นการรวมสองปรากฏการณ์จากอุปกรณ์สองอุปกรณ์คือ ฮอลล์เพลทและมอสเฟตเข้าด้วยกัน โดยผลการจำลองแบบเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในบทความทั่วไปจะเป็นการยืนยันความถูกต้องโมเดลทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรม โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองแบบแสดงได้ดังรูป 3.12 โครงสร้างประกอบด้วยส่วนซอส ส่วนเกต ส่วนเดรนสองชิ้นแยกกันและฐานรอง



รูปที่ 3.12 โครงสร้างแมกเฟตแบบแยกเดรน (split-drain MOSFET)

3.3.2 โครงสร้างมอสเฟต

โครงสร้างมอสเฟตที่ทำการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทดสอบหลักการการนำโครงสร้างมอสเฟตปกติทั่วไปใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวขนาน โดยมอสเฟตที่ทำการศึกษานี้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.13 โครงสร้างประกอบด้วยส่วนเดรน เกต ซอส และฐานรอง โดยส่วนฐานรองทั่วไปแล้วจะอยู่ใกล้ซอสเพื่อสามารถเชื่อมต่อกันได้ง่ายที่สุด แต่โครงสร้างมอสเฟตที่ทำการศึกษา เพื่อให้สามารถพิสูจน์การนำไปประยุกต์ใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็ก เราออกแบบให้ส่วนฐานรองจะอยู่ฝั่งเดียวกับเดรนเพื่อให้ทิศทางกระแสวิ่งจากซอสไปยังเดรนและฐานรองมีทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 3.13 โครงสร้างมอสเฟตมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

3.3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟตที่ทำการสร้างขึ้น

อุปกรณ์มอสเฟตที่ทำการสร้างขึ้นมีโครงสร้างที่แสดงได้ดังรูป 3.14 โครงสร้างประกอบด้วยเดรน เกท ซอส และฐานรอง โดยอุปกรณ์จริงจะมีขั้วฐานรองที่แยกออกไปเนื่องจากอุปกรณ์จริงจะมีพื้นที่ของแพดอลูมิเนียมทำให้ขั้วฐานรองอยู่ไกลออกไป ทั้งนี้เป็นการพิสูจน์การนำหลักการไปใช้กับอุปกรณ์จริงในลักษณะที่มีความแตกต่างกันในการออกแบบ มิติต่างๆเป็นไปตามมิติจริงของอุปกรณ์



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟตที่สร้างขึ้น

บทที่ 4

กระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์และเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง

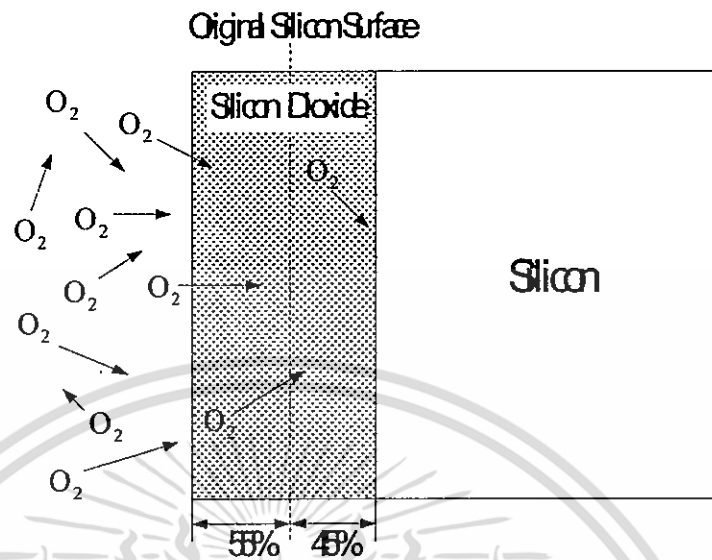
ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์และเทคโนโลยีการผลิตขั้นพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยประกอบด้วย กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ (Oxidation process), การฉายแสง (Photolithography), การแพร่สารเจือ (Diffusion), การยิงฝังประจุ (Ion implantation), การสร้างชั้นโลหะ (Metallization) และ การออกแบบและการสร้างมาสก์ (Design and Masks) ซึ่งกระบวนการผลิตที่กล่าวมานี้จะประกอบไปด้วยกระบวนการผลิตต่างๆ แยกย่อยลงไปอีกทีหนึ่ง ในการผลิตอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำขึ้นมาชิ้นหนึ่งนั้น อาจจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตแบบเดิมซ้ำกันไปมาหลายๆ รอบก่อนที่จะสร้างอุปกรณ์สำเร็จได้ ในส่วนของกระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์ก็เช่นเดียวกัน จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตจากหลายส่วนและมีการวนลูปในบางกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับรายละเอียดของกระบวนการสร้างอุปกรณ์จะได้กล่าวถึงในข้อหัวของ กระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์ต่อไป [17]

4.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process)

กระบวนการออกซิเดชันเป็นกระบวนการทางความร้อน (Thermal process) ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการสร้างอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ โดยเป็นกระบวนการของการสร้างชั้นออกไซด์ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซออกซิเจน (O_2) ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์หรือออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ (H_2O) กับซิลิคอน (Si) เกิดเป็นสารประกอบ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) แสดงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2



เริ่มต้นออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนที่ผิวเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งจะปกคลุมอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) อย่างหนาแน่น โดยชั้นออกไซด์ที่ผิวจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้โมเลกุลของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนส่วนที่อยู่ลึกลงไปได้ อย่างไรก็ตาม อาจมีออกซิเจนบางส่วนที่สามารถแพร่ข้ามชั้นออกไซด์ที่ผิวเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิคอนได้ ดังรูปที่ 4.1 ชั้นออกไซด์จะมีความหนาเพิ่มขึ้นและทำหน้าที่ป้องกันหรือลดการแพร่ของออกซิเจนให้ลดลง โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ขยายออกจากผิวหน้าเดิมของแผ่นเวเฟอร์ซึ่งมีความหนาประมาณ 55% และส่วนที่เกิดลึกลงไปในเนื้อซิลิคอน ซึ่งมีความหนาประมาณ 45% จากผิวเดิมของแผ่นเวเฟอร์



รูปที่ 4.1 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน

กลไกของการเกิดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน เกิดเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนกับซิลิคอนดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยกระบวนการในการสร้างชั้นออกไซด์นี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

การออกซิเดชันแบบแห้งเป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาทางเคมีกันระหว่างก๊าซออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง (high-purity) กับอะตอมของซิลิคอน ดังสมการที่ 4.1 โดยกระบวนการสร้างจะทำในสถานะที่มีก๊าซไนโตรเจน (N_2) และไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCL) ซึ่งช่วยกำจัดไอออนของโลหะ เช่น Na^+ ที่อาจมีเหลืออยู่ออกไป ปฏิกิริยากระทำที่อุณหภูมิประมาณ $1000\text{ }^{\circ}C$ ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งจะเกิดชั้นออกไซด์ที่มีคุณภาพดีกว่ากระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก แต่เกิดออกไซด์ได้ช้ากว่า

4.1.2 การออกซิเดชันแบบเปียก (Wet Oxidation)

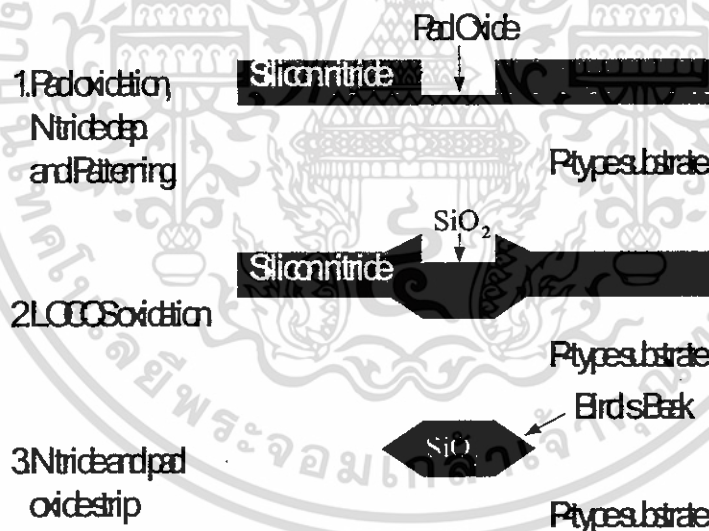
กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก เป็นการทำปฏิกิริยากันทางเคมีระหว่างออกซิเจนกับซิลิคอน เพื่อให้เกิดเป็นออกไซด์เช่นเดียวกับกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง แต่แตกต่างกันตรงที่การออกซิเดชันแบบเปียก ออกซิเจนที่เกิดขึ้นมาจากโมเลกุลของน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 คือที่อุณหภูมิสูงๆ โมเลกุลของน้ำสามารถแตกตัวเกิดเป็นก๊าซไฮโดรคลอไรด์ (HO) ซึ่งสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนได้ออกไซด์ได้เร็วกว่าโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน ดังนั้นกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกจึงสามารถที่จะสร้างชั้นออกไซด์ได้รวดเร็วกว่ากระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง การออกซิเดชันแบบเปียกถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่างๆ เช่น การสร้างมาส์คออกไซด์, การสร้างชั้น LOCOS ออกไซด์ เป็นต้น ตารางที่ 4.1 แสดงการเกิดชั้นออกไซด์ขนาดความหนา 1000 อังสตรอม ที่เวลาแตกต่างกันของกระบวนการออกซิเดชันทั้งสองชนิด

ตารางที่ 4.1 กระบวนการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน

Process	Temperature	Filme thickness	Oxidation time
Dry oxidation	1000 °C	1000 °A	~ 2 hours
Wet oxidation	1000 °C	1000 °A	~ 10 hours

4.1.3 การสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxidation)

การสร้างออกไซด์เฉพาะที่หรือการสร้างชั้น LOCOS (Local oxidation of silicon) เป็นการสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะบริเวณตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการแยก (isolate) ส่วนที่ไม่ต้องการให้เชื่อมถึงกันออกจากกัน วิธีการเริ่มจากการสร้างชั้นออกไซด์ที่ผิวของซิลิคอนให้มีความหนาประมาณ 200 – 500 อังสตรอม จากนั้นปกคลุมชั้นออกไซด์ด้วยชั้นของไนไตรด์ (Nitride) อีกชั้นหนึ่งและเมื่อทำการกัดชั้นไนไตรด์ออกตรงตำแหน่งที่ต้องการแล้ว หลังจากนั้นจะทำการปลูกออกไซด์ขึ้นมาด้วยกระบวนการออกซิเดชันตรงบริเวณที่เป็นช่องเปิด โดยส่วนที่มีชั้นไนไตรด์ปกคลุมอยู่ออกซิเจนจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปยังซิลิคอนได้ ขณะที่ส่วนที่เป็นช่องเปิดจะเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างออกซิเจนกับซิลิคอนได้เป็นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยความหนาของออกไซด์ที่เกิดขึ้นอยู่ที่ประมาณ 3000 – 5000 อังสตรอม และชั้นออกไซด์จะเกิดการพองตัวที่บริเวณขอบ ซึ่งเรียกการพองตัวนี้ว่า “Bird’s Beak”



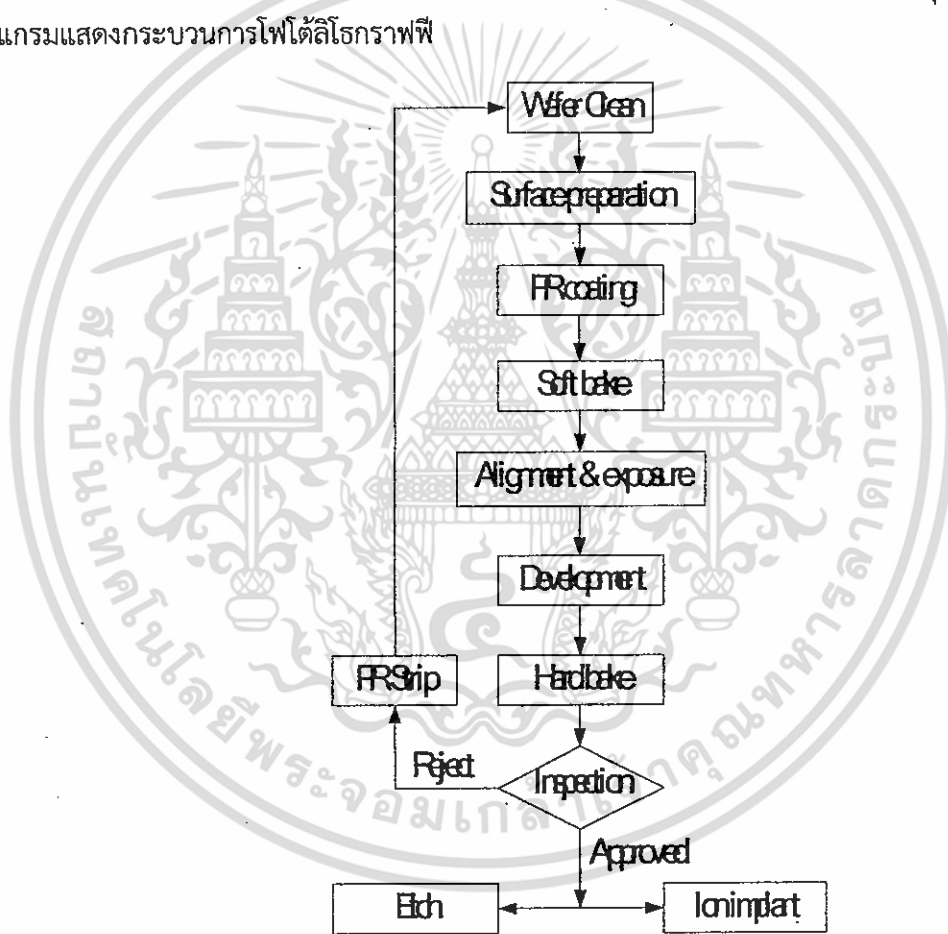
รูปที่ 4.2 การสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่จากกระบวนการออกซิเดชัน

4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการของการถ่ายแบบ (Patterning) จากมาสก์ (mask) หรือ เรติเคิล (reticle) จากการออกแบบ ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเมื่อฉายแสงลงบนผิวของแผ่นเวเฟอร์ จะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเริ่มแรกถูกใช้ในอุตสาหกรรมทางการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมาถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตทรานซิสเตอร์

และแผ่นวงจรรวม (Integrated circuit) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิต IC โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างลวดลายต่างๆ ลงบนแผ่นเวเฟอร์ ก่อนทำการกัด (etching), การยิงฝังประจุ (ion implantation) หรือการแพร่สารเจือ (Diffusion) เพื่อทำเป็นชั้นต่างๆ ต่อไป

โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือเริ่มต้นจากการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer clean) เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ออกจากผิวหน้า ต่อมาเป็นการเตรียมผิวหน้า (Preparation) เพื่อกำจัดความชื้นออกไป หลังจากนั้นจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist coating) และทำการอบ (soft bake) เพื่อให้ น้ำยาไวแสงติดกับแผ่นเวเฟอร์ได้ดียิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นกระบวนการฉายแสง (Development) ซึ่งเป็นการถ่ายแบบจากมาสก์ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนแผ่นเวเฟอร์ และขั้นตอนสุดท้ายจะทำการอบอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นจะส่งต่อไปยังขั้นตอนของการกัด หรือกระบวนการยิงฝังประจุต่อไป ดังรูปที่ 4.3 เป็นไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

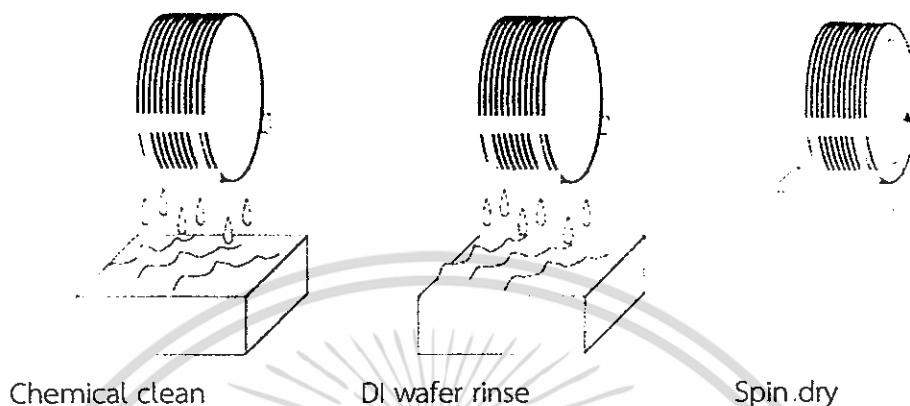


รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

4.2.1 ทำความสะอาดผิวหน้า (Wafer clean)

ก่อนที่จะเริ่มต้นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการผลิตอื่นๆ จำเป็นที่จะต้องมีการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์เสียก่อน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ เช่น คราบไขมันที่ติดมาหรือคราบฝุ่นละอองต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ออกไป ซึ่งหลังจากที่ทำความสะอาดด้วยสารเคมีแล้ว

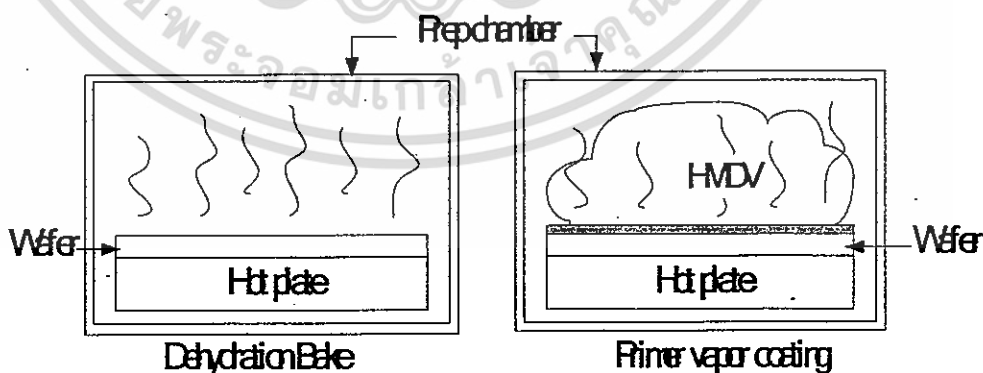
ต่อจากนั้นจะนำไปล้างด้วยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงที่เรียกว่าน้ำ ดีไอ (DI, deionized) เพื่อทำการล้างสารเคมีที่ใช้ทำ ความสะอาดผิวหน้าออกไป และขั้นตอนสุดท้ายนำไปสปินให้แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์

4.2.2 การเตรียมผิวหน้า (Surface preparation)

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึก ก่อนที่จะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงบนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน โดยผิววัสดุที่ใช้กันมากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้น หรือ โมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์ออกไป เพราะผิวของชั้นออกไซด์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำหรือความชื้นจาก อากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิ ราว 200-250 °C นาน 30 นาที ภายหลังจากอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้นานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซึมน้ำความชื้น เข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้นเมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการเคลือบ



รูปที่ 4.5 กระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง

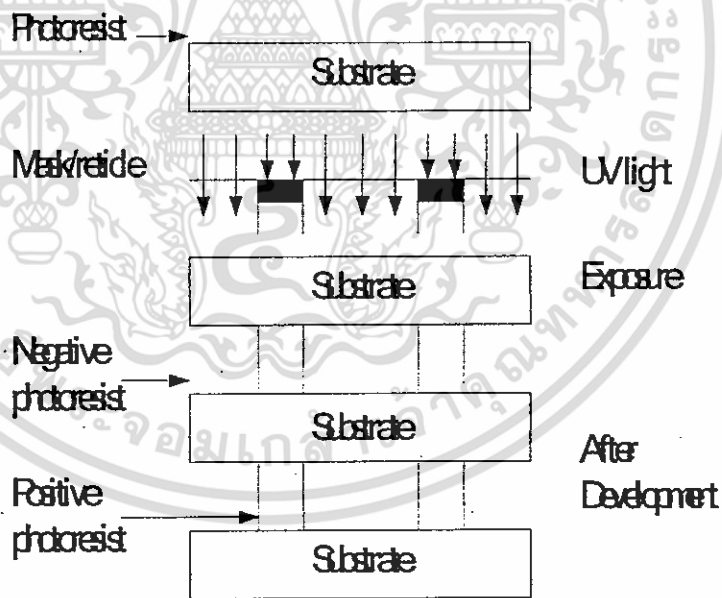
น้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ ก่อนทำการเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexamethyl-disilazane (HMDS, $(\text{CH}_3)_3\text{SiNHSi}(\text{CH}_3)_3$) ฉีดพ่น หรืออบไอรระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากชั้นผิวของออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยทั่วไปแล้วในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่น หรือหมุนให้แห้ง จากนั้นจึงจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงต่อไป

4.2.3 การเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงเป็นขั้นตอนการเคลือบชั้นฟิล์มบางของน้ำยาไวแสงที่ผิวด้านบนของแผ่นเวเฟอร์ โดยน้ำยาไวแสงจะมีด้วยกันสองแบบคือ แบบ Positive และแบบ Negative ซึ่งมีวิธีการใช้ที่แตกต่างกัน ในขณะที่กระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงก็จะมีด้วยกันหลายวิธี แล้วแต่ความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน ซึ่งอาจสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.2.3.1 น้ำยาไวแสง (Photoresist)

น้ำยาไวแสงเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติทางแสงคือ สามารถเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีได้เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านการสร้างลวดลายวงจรรีเล็กทรอนิกส์ หรือใช้ในอุตสาหกรรม IC สำหรับถ่ายแบบจากมาสก์ที่ออกแบบไว้ไปยังแผ่นเวเฟอร์



รูปที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด

โดยน้ำยาไวแสงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสง คือ 1. Negative photoresist น้ำยาไวแสงชนิดนี้ หลังจากกระบวนการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายตรงกับข้ามกับ

ต้นแบบ นั้นคือส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกกัดออก เหลือเฉพาะบริเวณที่ถูกแสงเท่านั้น และ 2.Positive photoresist เป็น น้ำยาไวแสงที่หลังจากการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลลายแบบเดียวกับกับมาสค์หรือว่าต้นแบบ นั้นคือ ส่วนที่ได้รับแสงจะถูกกัดออก ในขณะที่ส่วนที่ไม่ได้รับแสงจะคงเหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ของน้ำยาไวแสงทั้งสองชนิด โดยอุตสาหกรรมทางด้านเซมิคอนดักเตอร์ในปัจจุบันจะนิยมใช้น้ำยาไวแสงชนิด Positive เนื่องจากมีความละเอียดสูงกว่าชนิด Negative

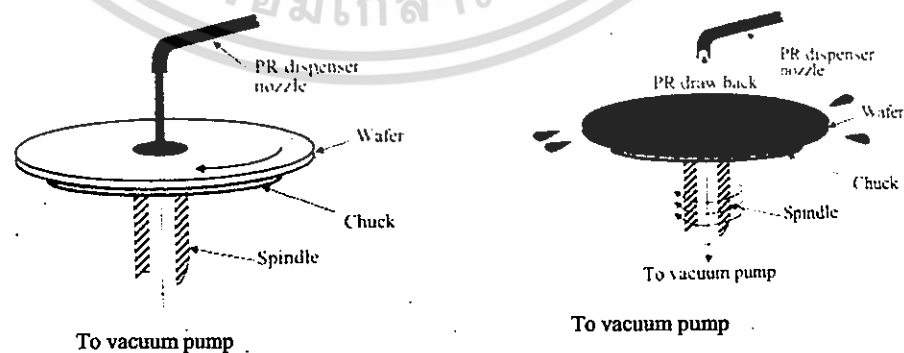
4.2.3.2 วิธีการเคลือบ (Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกหรือแผ่นเวเฟอร์ ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ที่ผิว ด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมหรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้

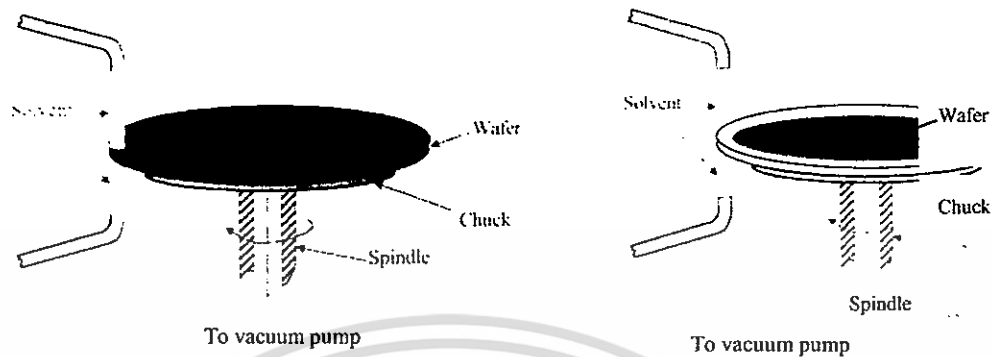
- แบบสปินเนอร์ (Spinner coating)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกแบบวงกลม ซึ่งการเคลือบน้ำยาไวแสง ด้วยวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือสปินเดิล (Spindle) โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วย มอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูกวางลงบนแท่นหมุน และทำให้ยึดติดได้ด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นน้ำยาไว แสงจะถูกหยดลงบริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (spin) ด้วยความเร็วรอบ ราว 3000-6000 rpm/min ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที น้ำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยความหนาของฟิล์มบางไวแสงที่ได้มีค่าอยู่ที่ ประมาณ 1000– 2000 อังสตรอม ถ้าหากความเร็วรอบต่ำเกินไป จะได้ชั้นของฟิล์มไวแสงที่หนามาก ในขณะที่ถ้า ความเร็วรอบสูงๆ ความหนาของชั้นฟิล์มจะไม่เท่ากัน โดยบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะหนามากกว่าส่วนอื่นๆ หลังจากที่ เคลือบน้ำยาไวแสงที่ผิวของแผ่นผลึกเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการลอกฟิล์มที่บริเวณขอบแผ่นออก เพื่อไว้ใช้สำหรับใน การจับหรือเคลื่อนย้ายแผ่นผลึก ดังในรูปที่ 4.8 โดยขั้นตอนกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ต้องมีการระมัดระวังฝุ่นละออง เป็น

พิเศษ ดังนั้นต้องทำภายในห้องสะอาดที่มีการควบคุมปริมาณของฝุ่นละออง หรือ Clean room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศ ในห้องนี้ จะถูกควบคุมให้มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้ระบบกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter)



รูปที่ 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์



รูปที่ 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์

- แบบสเปรย์ (Spray coating)

วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสงแบบสเปรย์ น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึก และยึดเกี่ยวกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท ซึ่งการควบคุมความหนาของฟิล์มที่ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ ด้านล่างของแผ่นผลึก

- แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้ง จะนิยมใช้ในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นชิพ (Chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันเศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่นที่จะเกิดขึ้นขณะทำการตัดแยกชิพ ด้วยเลื่อย (sawing) หรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก

4.2.4 การอบ (Prebake or Soft back)

ภายหลังการเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบเพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นนี้ เรียกว่า Prebake หรือ Soft bake ซึ่งใช้อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ $90-100^{\circ}\text{C}$ สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ และถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเล็กน้อยคือที่ประมาณ $80-90^{\circ}\text{C}$ สำหรับการอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรือใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดมีปฏิกิริยาเคมี - ความร้อน หรืออาจทำให้ไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีที่สามารถกระทำได้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (Convection Oven) ซึ่งในตู้อบจะมีพัดลมช่วยพัดไอร้อนจากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นผลึกทำให้แผ่นผลึกร้อน การอบสามารถทำได้จำนวนหลายแผ่นพร้อมๆ กันโดยแผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่องคาสเซ็ทพิเศษ ซึ่งวิธีการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้แผ่นผลึกจะได้รับความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน ที่อาจเป็นสาเหตุของการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งถือเป็นข้อเสีย และไม่เหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง สำหรับในสายการผลิต

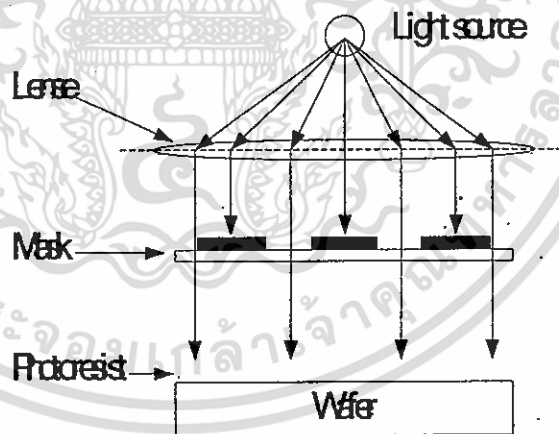
วงจรรวมในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกที่ละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการนี้ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อนเช่นนี้ เรียกว่า “Bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (Hot Plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางบนแผ่นร้อน หรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

4.2.5 การปรับมาส์คและการฉายแสง (Alignment and Exposure)

ขั้นตอนการปรับมาส์คและการฉายแสงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งกระบวนการนี้จะทำหน้าที่ในการถ่ายแบบจากมาส์คหรือเรติเคิล ไปยังผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้

4.2.5.1 การปรับมาส์ค

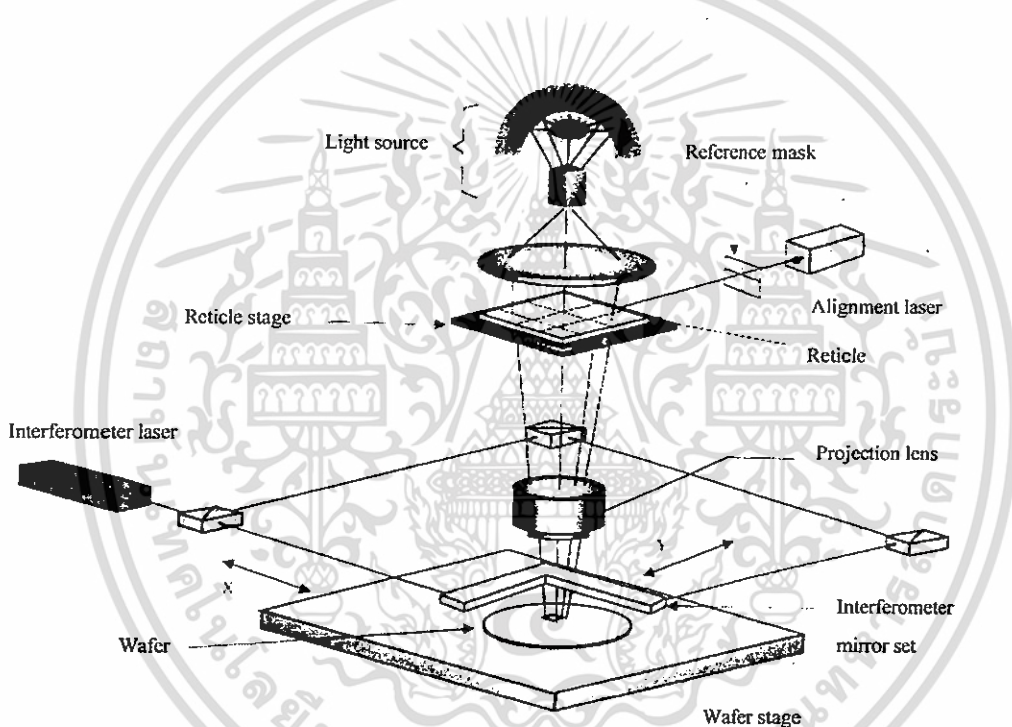
วิธีการฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์ค โดยปกติจะถูกวางสัมผัส(Contact) ลงไปบนแผ่น เวเฟอร์ที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่กระจกโฟโตมาส์คชิ้นแรก หรือมาส์คที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซ้อนมาส์ค (Mask alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นเวเฟอร์เลย ดังในรูปที่ 4.9 แต่ในกรณีที่แผ่นเวเฟอร์นั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่ง หรือบริเวณที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.9 แสดงกระบวนการถ่ายแบบจากมาส์คไปยังผิวของแผ่นเวเฟอร์

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาส์คตั้งแต่มาส์ค 2 แผ่นขึ้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับตำแหน่งมาส์ค เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาส์ค สอดกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่น เวเฟอร์อย่างถูกต้องเสียก่อน เพื่อให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง ทำให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ อย่งไรก็ดี เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ้อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า

“ตัวปรับชั้นมาส์ค” ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือแผ่นเวเฟอร์จะถูกลำแสงและติดไว้กับแท่นเลื่อน (X-Y-Z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (X) แนวตั้งฉาก (Y) และแนวสูง (Z) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว X, Y, Z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนตำแหน่งของกระจกโฟโต้มาส์คจะถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือแผ่นเวเฟอร์เล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำให้สามารถสังเกตเห็นภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นเวเฟอร์และบนโฟโต้มาส์ค พร้อมทั้งทำการปรับเลื่อนฐานที่ยึดแผ่นเวเฟอร์ไว้ทั้งแกน X, Y และมุม θ จนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นเวเฟอร์และบนโฟโต้มาส์คซ้อนกันตรงตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นทำการปรับให้ตำแหน่งของแผ่นเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน Z จนแนบสนิท กับกระจกโฟโต้มาส์ค ในกรณีที่ภาพลวดลายมีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับชั้นภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไปภาพลวดลายของวงจรรวมจะมีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 4.10 แสดงกระบวนการปรับมาส์คและการฉายแสงด้วยระบบสเต็ปเปอร์ (Stepper)

เนื่องจากการยากในการที่จะสังเกตว่าภาพลวดลายในมาส์คกับแผ่นโฟโต้มาส์คตรงกันหรือยัง ดังนั้นในทางปฏิบัติ เพื่อให้การปรับชั้นทำได้ง่ายขึ้น จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับชั้นมาส์คโดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับชั้น” ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (square in box), กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากบาท เช่น ภาพลวดลายบนแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับชั้น” เป็นรูปจัตุรัส และภาพลวดลายบนกระจกมาส์ค เป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น การปรับชั้นทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพ จัตุรัสเข้าไปซ้อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยม ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมบนแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโต้มาส์ค จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ต้องการทุกประการ ถ้าหากการปรับชั้นตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้องและเกิดการเสียหายได้ ดังนั้นขั้นตอนของการปรับชั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก

4.2.5.2 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับชั้นภาพระหว่างกระจกโฟโต้มาสก์ และแผ่นเวเฟอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโต้มาสก์ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่ชั้นของน้ำยาไวแสง โดยปกติ น้ำยาไวแสงที่ใช้ใน เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น λ ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วง และสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ ถ้าเป็นฟิล์มถ่ายรูปจะต้องใช้แสงในท้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (Mercury lamp) ซึ่งหลอดนี้จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความยาวคลื่นราว 365, 405 และ 436 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยทั่วไปโครงสร้างที่มีลวดลาย

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (Exposure Light Source) ชนิดต่างๆ

Type	Name	Wavelength (nm)	Application feature size (μm)
Mercury lamp	G-line	436	0.5
	H-line	405	0.4
	I-line	365	0.35 to 0.25
Excimer laser	Xef	351	
	XeCl	308	
	KrF (DUV)	248	0.25 to 0.13
	ArF	193	0.15 to 0.07
Fluorine laser	F2	157	0.10 and smaller

ขนาดประมาณ 0.50 μm และ 0.35 μm จะใช้หลอดไอปรอทชนิด G - line และ I -line ที่ให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 436 nm และ 365 nm ตามลำดับ สำหรับขนาดโครงสร้างอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 4.2

นอกจากนี้ยังสามารถนำคลื่นรังสีเอ็กซ์ (X - Ray) หรือลำอิเล็กตรอน (Electron beam) มาใช้แทนแสงได้ด้วย ทำให้สามารถพิมพ์ภาพลวดลายวงจรรวมที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ซึ่งเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า “เอ็กซ์เรย์ลิโธกราฟี” (X-Ray Photolithography) และ Electron-beam Lithography ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม น้ำยาไวแสงที่จะใช้จะต้องแตกต่างจากธรรมดา เพราะรังสีเอ็กซ์ และลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่าแสงจากแบบทั่วไป

4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

ขั้นตอนนี้เป็นการใช้น้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) ละลาย หรือล้างน้ำยาไวแสง ที่ผ่านการฉายแสงมาแล้ว ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกละลายออก แต่ถ้ากรณีน้ำยาไวแสงชนิดบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลาย

ออกไป การล้างน้ำยาไวแสงนี้ถ้าเป็นกรณีน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะใช้วิธีการพื้นฐานคือ นำแผ่นเวเฟอร์ลงไปหมุนบนสปินเนอร์ (spinner) คล้ายกับการเคลือบน้ำยาไวแสง โดยขณะที่แผ่นเวเฟอร์กำลังหมุน น้ำยาล้างจะถูกฉีดพ่นลงไปบนแผ่น โดยน้ำยาไวแสงที่ถูกละลายก็จะถูกแรงเหวี่ยงกระจายออกไปรอบๆ จากนั้นล้างแผ่นเวเฟอร์ให้สะอาดด้วยสารละลายอื่นๆ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ในกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดบวก อาจทำได้ครั้งละหลายๆ แผ่นพร้อมกัน โดยจุ่มลงในน้ำยาล้าง หรืออาจใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำยาล้าง คล้ายกับวิธีการล้างน้ำยาไวแสงชนิดลบ

4.3 กระบวนการกัด (Etching)

การกัดหรือการเอตซิง (Etching) เป็นกระบวนการในการกำจัดสารออกจากผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ เช่น การกัดชั้นออกไซด์ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์, การกัดน้ำยาไวแสงในขั้นตอนของการล้างฟิล์มน้ำยาไวแสง เป็นต้น โดยกระบวนการกัดอาจจะกัดตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ หรืออาจจะกัดสารทั้งหมดที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ก็ได้ กระบวนการกัดสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามวิธีหรือเทคนิคของการกัด คือ การกัดแบบเปียก (Wet etch) และ การกัดแบบแห้ง (Dry etch) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

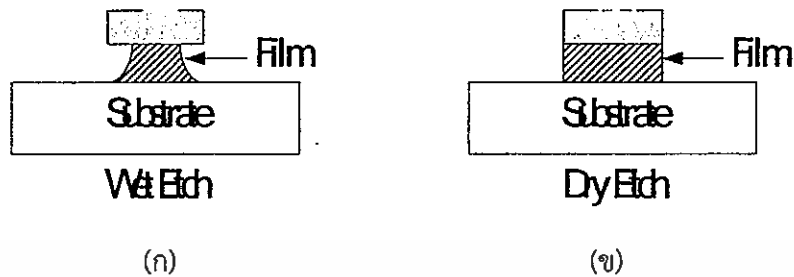
4.3.1 การกัดแบบเปียก (Wet Etch)

การกัดแบบเปียกเป็นวิธีการกัดสารที่เคลือบผิวออกจากแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารละลายทางเคมี โดยกระบวนการนี้ นิยมใช้กับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่กว่า $3 \mu\text{m}$ ขึ้นไป ซึ่งอัตราการกัดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ในการกัดออกไซด์จะใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่มีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ผสมอยู่ เพื่อควบคุมปฏิกิริยาเคมีให้เกิดสม่ำเสมอ โดยกรดไฮโดรฟลูออริกจะทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เป็น H_2SiF_6 กับน้ำ H_2O สมการปฏิกิริยาแสดงได้ดังสมการที่ 4.3 สำหรับข้อดีของกระบวนการกัดแบบเปียกคือ อัตราการกัดที่สูง, ราคาประหยัด แต่ข้อเสียคือไม่สามารถกัดโครงสร้างที่มีขนาดเล็กๆ ได้ และมีปัญหาเรื่องการกัดลึกเข้าไปใต้ชั้นป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11(ก)



4.3.2 การกัดแบบแห้ง (Dry Etch)

การกัดแบบแห้งหรือกระบวนการกัดโดยใช้พลาสมา (Plasma Etch) เป็นวิธีการกัดโดยการใช้ไอออนของแก๊ส (Ionized gas) หรือที่เรียกว่า “พลาสมา” เข้าไปทำลายพันธะเคมีของสารที่เคลือบอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ โดยอนุภาคไอออนของพลาสมาอาจเข้าไปรวมตัวกับสารที่เคลือบอยู่เกิดเป็นสารใหม่แล้วหลุดออกไป การกัดแบบแห้งนี้สามารถกัดลวดลายได้คมชัดและเล็กกว่าการกัดแบบเปียกมาก ซึ่งเหมาะสมกับงานที่มีลวดลายขนาดเล็กหรือมีความละเอียดสูง และไม่มีปัญหาเรื่องการกัดลึกเข้าไปใต้ชั้นป้องกัน ดังในรูปที่ 4.11(ข) แต่ข้อเสียของการกัดแบบคือ กัดได้ช้ากว่าการกัดแบบเปียก และมีการใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาแพงกว่าแบบแรกมาก



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลจากการกัดด้วยกระบวนการสองแบบ (ก) การแบบเปียก (Wet etch) และ (ข) การกัดแบบแห้ง (Dry etch)

4.4 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

การแพร่ของสาร เป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่สารจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทุกที่ทุกขณะ เช่น การแพร่ของสารเคมีในอากาศ, การแพร่ของน้ำหรือน้ำมันเข้าไปในของแข็งอย่างไม้ เป็นต้น

สำหรับเทคนิคของการเติมสารเจือด้วยวิธีการแพร่สาร (Diffusion) เป็นวิธีการเจือสารซึ่งถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับงานทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก ง่ายต่อการควบคุมใช้งาน สามารถทำได้ด้วยความร้อนสูง (Furnace) ทั่วไป และสามารถแพร่สารเจือพร้อมกันได้คราวละมาก ๆ ที่สำคัญคือเป็นวิธีที่ประหยัด กระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามชนิดของการแพร่สารเจือคือ การแพร่สารเจือชนิดพี และการแพร่สารเจือชนิดเอ็น โดยหลังจากที่ทำการแพร่สารเจือเรียบร้อยแล้วนั้น จะทำให้ได้สารเจือตรงบริเวณที่เป็นช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ

4.4.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่สามารถนำมาใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี (p-type) ในงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอน ได้แก่ แกลเลียม (Gallium), อะลูมิเนียม (Aluminium), โบรอน (Boron) และอินเดียม (Indium) ซึ่งในทางปฏิบัติจริงๆ นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกธาตุที่ใช้เป็นสารเจืออย่างพิถีพิถัน ไม่ใช่สามารถใช้ได้ทุกกรณี ตัวอย่างเช่น จะไม่ใช่ธาตุแกลเลียมเป็นสารเจือชนิดพีเนื่องจากแกลเลียมสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี หรือก็คือ แกลเลียมมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นออกไซด์ที่สูงนั่นเอง ทำให้การใช้ชั้นออกไซด์ป้องกันผิวของซิลิคอนใช้ไม่ได้ผล นอกจากนี้แล้วการเลือกใช้ธาตุใดเป็นสารเจือยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ด้วย อย่างเช่น อะตอมของโบรอนจะทำให้เกิดโฮลได้ดีกว่าอะตอมของอินเดียม เนื่องจากระดับพลังงานผู้รับของโบรอนอยู่ที่ 0.01 eV ขณะที่ของอินเดียมอยู่

ที่ระดับ 0.16 eV ส่วนอะลูมิเนียมมีข้อเสียคือ สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี ทำให้กลายเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ง่าย จากเหตุผลต่างๆ ที่กล่าวมานี้ จึงทำให้โบรอนเป็นธาตุที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดพีมากที่สุด โดยโบรอนมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่อยู่ที่ประมาณ $10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 1150°C ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้สะดวก

เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนอาจสามารถทำได้ 3 แบบคือ อะตอมของโบรอนสามารถสังเคราะห์มาได้จากสารประกอบ 3 ชนิดในสถานะของแข็งคือโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) หรือในสถานะของเหลวคือ โบรอนไตรโบรไมด์ (BBr_3) และในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ (BCl_3) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมโบรอนออกมาจาก B_2O_3 ที่ผิวของซิลิคอน โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้คือ



จากนั้นโบรอนจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน แต่ในงานทางด้านอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบโบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่ แผ่นโบรอนไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่นโบรอนไนไตรด์กลายเป็นโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่นโบรอนไนไตรด์นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1100°C (ในสถานะของก๊าซไนโตรเจน)

4.4.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

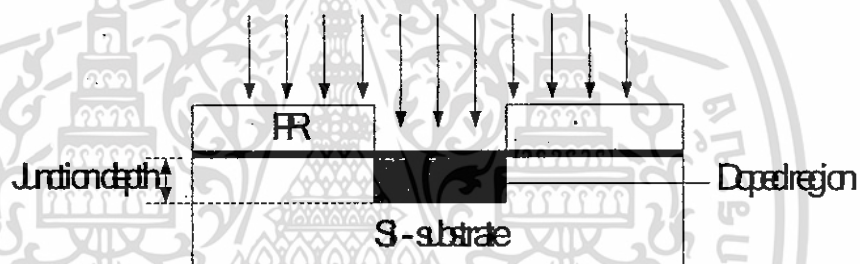
ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดเอ็น (n-type) ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus), พลวง (Antimony) และสารหนู (Arsenic) การจะเลือกธาตุที่จะนำไปเป็นสารเจือทำได้โดยไม่จำกัด ซึ่งต่างจากกรณี สารเจือชนิด p กล่าวคือ ธาตุเหล่านี้ใช้งานได้ดี ในแต่ละลำดับชั้น ตัวอย่างเช่น พลวงและสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างชั้นฝัง (buried layer) n+ ซึ่งเป็นการแพร่ครั้งแรกในงานสร้างวงจรรวม ส่วนการแพร่อื่นๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ธาตุ ฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิดเอ็น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟอสฟอรัสสูงกว่าพลวงและสารหนู ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อความประหยัด คือสามารถแพร่ได้เร็วในช่วงเวลาอันสั้น การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถกระทำที่ 3 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ฟอสฟอรัส อาจนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิด เช่นในสถานะของแข็งได้แก่ ฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P_2O_5) หรือในสถานะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสออกซิดคลอไรด์ (POCl_3) หรือในสถานะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) ซึ่งเป็นก๊าซพิษ และอาจจะเปิดได้ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P_2O_5) และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก P_2O_5 ที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



โดยธาตุฟอสฟอรัสจะแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ POCl_3 เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัสโดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1200°C ในช่วงเวลาตามต้องการในสภาวะของก๊าซไนโตรเจน

4.5 การยิงฝังประจุ (Ion implantation)

การยิงฝังประจุเป็นอีกหนึ่งวิธีในกระบวนการเจือสารเจือสำหรับการผลิตอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในปัจจุบันถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม (IC) อย่างแพร่หลาย โดยการเจือสารด้วยวิธีการยิงฝังประจุ ถือเป็นวิธีการเจือสารที่มีคุณภาพดีกว่าการเจือสารด้วยวิธีการแพร่ อย่างเช่น ความเข้มข้นของสารเจือ (concentration) และความลึกของรอยต่อ (Junction depth) จะไม่สามารถควบคุมขนาดได้ด้วยวิธีการแพร่ เนื่องจากความเข้มข้นและความลึกของรอยต่อจะสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการแพร่ ขณะที่การเจือสารด้วยวิธีการยิงฝังประจุสามารถที่จะควบคุมค่าทั้งสองอย่างได้อย่างอิสระ โดยความเข้มข้นของสารเจือสามารถควบคุมได้ด้วยปริมาณความเข้มข้นของกระแส Ion beam และเวลาที่ใช้ ส่วนค่าความลึกของรอยต่อสามารถควบคุมได้จากพลังงานของไอออน (Ion energy) สำหรับกระบวนการยิงฝังประจุสามารถเจือสารได้ความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 10^{11} ถึง 10^{17} อะตอม/ลบ.ซม. การเจือสารด้วยวิธีการยิงฝังประจุแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการยิงฝังประจุ

4.5.1 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดพี (P-type)

ในการเจือสารเจือด้วยวิธีการยิงฝังประจุ ธาตุที่ถูกนำมาใช้จะเป็นแบบเดียวกันกับที่ใช้ในกระบวนการแพร่ แต่จะถูกทำให้อยู่ในรูปของไอออน ที่สามารถถูกเร่งได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง (high-voltage) ให้เคลื่อนที่ไปยังเป้าที่ต้องการจะเจือสาร ในการเจือสารด้วยกระบวนการยิงฝังประจุถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่างๆ เช่น การสร้าง n-well หรือ p-well ในการกระบวนการผลิตทรานซิสเตอร์แบบ CMOS เป็นต้น

โดยธาตุที่นำมาใช้สำหรับสารเจือชนิดพี ได้แก่ โบรอน (Boron, B) ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ BF_3 ซึ่งจะถูกทำให้แตกตัวเกิดเป็นไอออนของโบรอน (B^+) อยู่ในรูปของพลาสมา และจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ระดับ 10 kV บังคับให้ไอออนของโบรอนเคลื่อนที่เข้าไปยังผลึกของซิลิคอนตรงตำแหน่งที่ต้องการสร้างเป็นสารชนิดพี ซึ่งความลึกของรอยต่อและความเข้มข้นของสารเจือที่ได้ จะสามารถควบคุมได้พลังงานของไอออนและเวลาของการยิงฝังประจุ

4.5.2 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็น (N-type)

ในการเจือสารชนิดเอ็น กระบวนการต่างๆ ที่ใช้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเจือสารชนิดพี แต่ธาตุที่นำมาใช้จะเปลี่ยนไปคือ ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P), อาร์เซนิก (Arsenic, As) หรือ พลวง (Antimony, Sb) เป็นต้น สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานก็มีลักษณะเช่นเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

สำหรับกระบวนการในการสารเจือทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาคือ กระบวนการแพร่และการยิงฝังประจุ สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้ดังในตารางดังต่อไปนี้

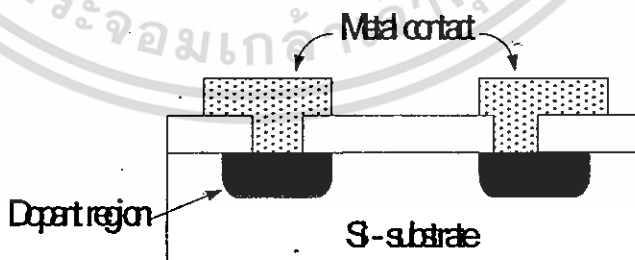
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ระหว่างกระบวนการแพร่สารเจือกับการยิงฝังประจุ

การแพร่ (Diffusion)	การยิงฝังประจุ (Ion Implantation)
- High temperature, hard mask	- Low temperature, photoresist mask
- Isotropic dopant profile	- Anisotropic dopant profile
- Cannot independently control the dopant concentration and junction depth	- Can independently control the dopant concentration and junction depth
- Batch process	- Both batch and single-wafer processes

4.6 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization)

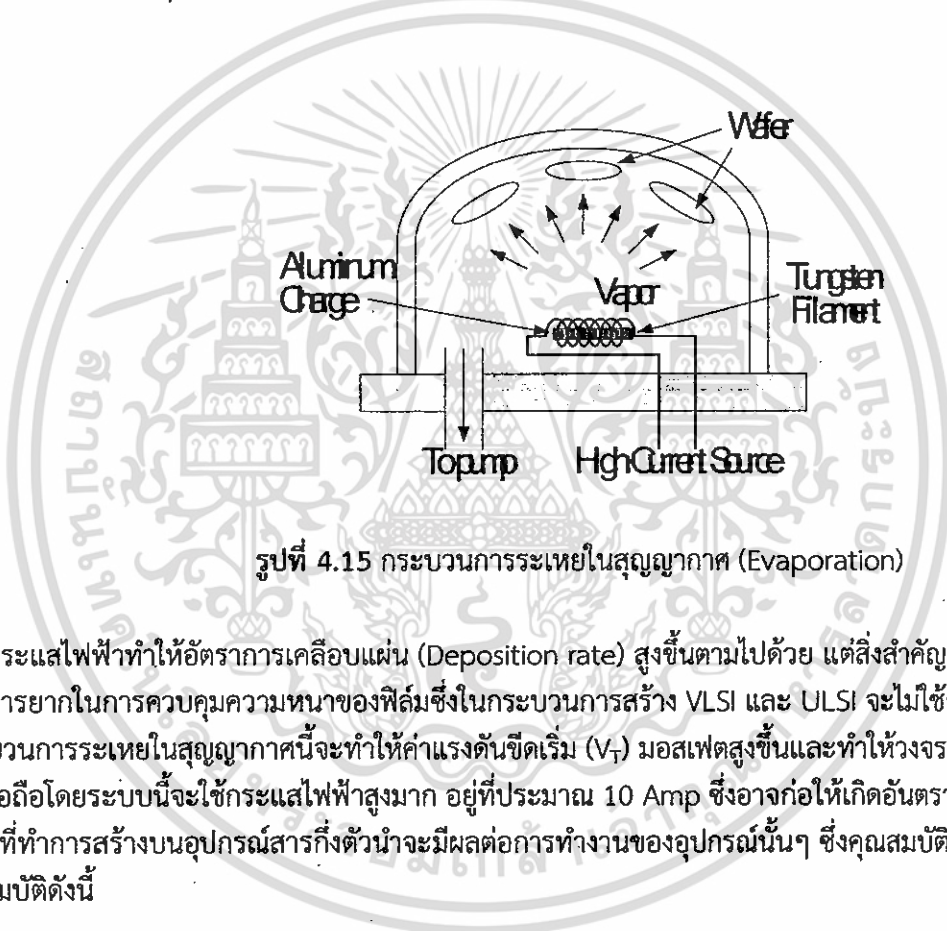
การสร้างชั้นโลหะหรือ การเมทัลไลเซชัน (Metallization) เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อขาอุปกรณ์เข้ากับขั้วไฟฟ้าภายนอกเข้า โดยโลหะที่ถูกนำมาใช้จะมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum), ไททาเนียม (Titanium) ทองแดง (Copper), หรือโลหะผสมระหว่าง อะลูมิเนียมกับทองแดง (Al-Cu) เป็นต้น และอาจจะเลือกใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) หรือสารประกอบของซิลิคอนกับธาตุอื่นอย่าง ไททาเนียมซิลิไซด์ (TiSi₂) ที่มีความต้านไฟฟ้าน้อยกว่าโพลีซิลิคอน โดยการเลือกใช้โลหะสำหรับการทำเป็นขั้วโลหะนั้นแล้วแต่คุณสมบัติและความเหมาะสมต่องานที่นำไปใช้

สำหรับโลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นโลหะที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อตัวขาอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก

กระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมโดยให้อะลูมิเนียมกลายเป็นไอด้วยความร้อน และทำให้ไอระเหยไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของแผ่นเรียกว่ากระบวนการระเหยในสุญญากาศ (evaporation) ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมทัลไลเซชันในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ การเปลี่ยนอะลูมิเนียมให้กลายเป็นไอภายใต้ความดันต่ำโดยระบบต้องการความดันประมาณ 10^{-6} Torr เป็นการทำให้ออกซิเจนและความชื้นเหลือน้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลให้อะลูมิเนียมมีความต้านทานสูงได้ สำหรับกระบวนการระเหยในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยเส้นลวดถูกทำให้ร้อนจนละลายตลอดขณะที่ระบบอยู่ภายใต้ความดันต่ำ หลังจากนั้นอุณหภูมิของอะลูมิเนียมจะระเหยแพร่ไปเคลือบบนแผ่นผลึก ทำให้มีชั้นอะลูมิเนียมบางๆเคลือบบนแผ่นผลึก การควบคุมความหนาของโลหะนั้นจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมโดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยการเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation)

ของกระแสไฟฟ้าทำให้อัตราการเคลือบแผ่น (Deposition rate) สูงขึ้นตามไปด้วย แต่สิ่งสำคัญของระบบการผลิตนี้คือการยากในการควบคุมความหนาของฟิล์มซึ่งในกระบวนการสร้าง VLSI และ ULSI จะไม่ใช้กระบวนการนี้เนื่องจากกระบวนการระเหยในสุญญากาศนี้จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) มอสเฟตสูงขึ้นและทำให้วงจรรวมถูกลดความน่าเชื่อถือโดยระบบนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก อยู่ที่ประมาณ 10 Amp ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ โดยโลหะที่ทำการสร้างบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติของโลหะที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ค่าความต้านทาน (Contact resistance) มีค่าต่ำหรือเป็นคอนแทคที่ดีและมีสภาพเป็นโอห์มมิกคอนแทค (Ohmic contact)
- ความน่าเชื่อถือ (Reliability) เช่น ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติจึงไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือโลหะมีอายุการใช้งานนาน
- ต้องสามารถทำการสกัด (Photo etching) ได้ และได้ลวดลายที่คมชัด และละเอียด
- ต้องยึดติดกับผิวของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งต้องเชื่อมกับลวดโลหะจากภายนอกได้ดี
- มีราคาถูก และสามารถสร้างได้โดยง่าย

4.17 โครงสร้างมอสเฟตที่สร้างขึ้น

เราทำการสร้างมอสเฟตด้วยกระบวนการสร้างที่ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทย โดยเป็นกระบวนการสร้าง ซีมอสเทคโนโลยีซึบไมครอน โดยได้พัฒนาเป็นกระบวนการสร้างมาตรฐานแห่งเดียวในประเทศไทย อุปกรณ์ที่สร้างได้ ตามขั้นตอนมาตรฐานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 จากรูปเป็นภาพถ่ายขยายด้านบนของอุปกรณ์ โดยจะเห็นลวดลาย อลูมิเนียมด้านบนของเดรน เกท ซอส และบอดี้ซึบสเตรท เมื่อต้องการทำการวัดคุณสมบัติได้นำมาบรรจุตัวถังและต่อขา รูปที่4.17 แสดงอุปกรณ์มอสเฟตที่บรรจุตัวถังพร้อมที่จะนำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและผลตอบสนองสนามแม่เหล็ก ต่อไป



รูป 4.16 ภาพถ่ายขยายด้านบนของอุปกรณ์มอสเฟตที่สร้างเสร็จแล้ว

รูป 4.17 อุปกรณ์ที่บรรจุตัวถังพร้อมใช้งาน

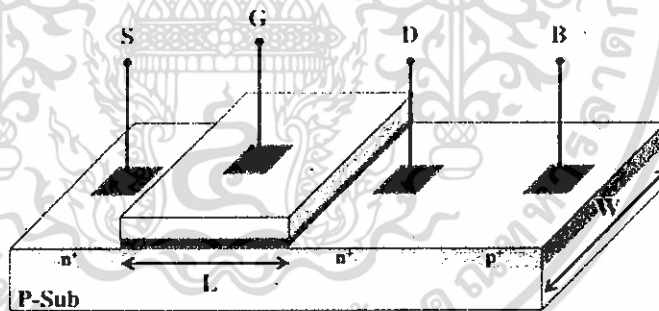
บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองทั้งหมด โดยการศึกษาครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนหลัก ส่วนแรกคือการจำลองแบบด้วย TCAD ที่ใช้ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์และอีกส่วนหนึ่งคือการวัดคุณสมบัติจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น การจำลองแบบมีเพื่อศึกษาหลักการพื้นฐาน เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อนำไปสู่กลไกการทำงานของอุปกรณ์ ส่วนการวัดอุปกรณ์จริงคือการยืนยันหลักการเมื่อนำไปปฏิบัติกับอุปกรณ์จริงว่ามีความสอดคล้องเป็นไปตามสมมุติฐานที่คาดคะเนไว้อย่างไร และการจำลองแบบเป็นการช่วยในการออกแบบเบื้องต้น หรือเป็นแนวการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

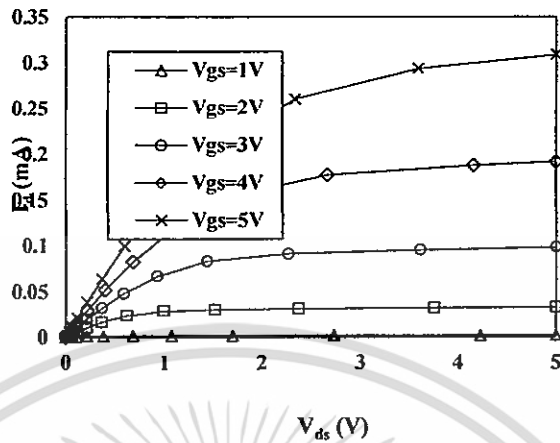
5.1 การศึกษาโครงสร้างมอสเฟตด้วยการจำลองแบบ

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติมอสเฟตมาตรฐานโดยการจำลองแบบเพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติมอสเฟตเบื้องต้น และเป็นการทดสอบโมเดลที่ใช้ในการจำลองแบบในเวลาเดียวกัน โครงสร้างของมอสเฟตที่ทำการศึกษาคือโครงสร้างมอสเฟตปกติทั่วไป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 จากในรูปโครงสร้างประกอบด้วยส่วนซอส (S) ส่วนเกต (G) ส่วนเดรน (D) และส่วนฐานรองหรือซึบสเตรทที่ถูกเรียกว่าบอดี้ (B) โดยปกติแล้วส่วนซอสและบอดี้จะต่อเข้าด้วยกันและจะอยู่ใกล้กัน แต่ในโครงสร้างนี้เราจะให้ซอสและบอดี้แยกกันละฝั่งของเกตทั้งนี้เพื่อผลบางประการในการใช้งานในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบเช่นนี้ไม่มีผลใดๆกับการทำงานของมอสเฟต



รูป 5.1 โครงสร้างมอสเฟตที่ใช้ในการศึกษา

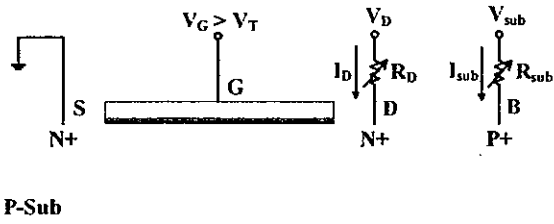
ผลของการจำลองแบบโครงสร้างมอสเฟตแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 รูปที่ 5.2 เป็นกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของมอสเฟต จากรูปแสดงให้เห็นการทำงานของมอสเฟตในช่วงกระแสไม่อิ่มตัว (non-saturation region) และช่วงกระแสอิ่มตัว (saturation region) ช่วงการทำงานไม่อิ่มตัวกระแสเดรน I_D จะแปรตามค่าแรงดันเดรนกับซอส V_{DS} และแรงดันเกตกับซอส V_{GS} ลักษณะกราฟจะมีค่าความชัน ส่วนการทำงานในช่วงอิ่มตัว กระแสเดรนจะขึ้นกับแรงดันเกตกับซอสเท่านั้นจะไม่ขึ้นกับแรงดันเดรนกับซอส ลักษณะของกราฟจะแบนราบ ซึ่งจากผลการจำลองแบบเป็นการยืนยันโมเดลมอสเฟตว่าสามารถใช้งานได้ตรงตามลักษณะของมอสเฟตทั่วไป



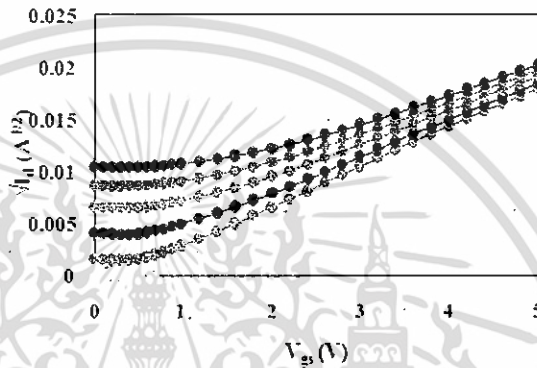
รูป 5.2 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟตที่ได้จากการจำลองแบบ

5.2 ค่าแรงดันฐานรอง (substrate bias voltage) ที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage)

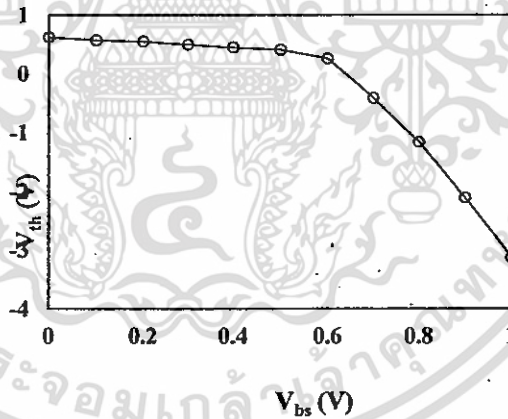
เนื่องจากมอสเฟตที่ทำการศึกษาต้องการประยุกต์ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงมีความจำเป็นที่จะต้องให้ค่าแรงดันระหว่างฐานรองกับซอสซึ่งจะมีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ΔV_T โดยปกติแล้วแรงดันฐานรองถ้ามีจะเป็นการให้แรงดันกลับทิศหรือรีเวอร์สไบแอส (reverse bias) จะมีผลทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มสูงขึ้นดังสมการ แต่การประยุกต์ใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็กในครั้งนี้เราจะต้องทำให้เกิดกระแสผ่านฐานรองที่เรียกว่า กระแสขั้วสเตรททำให้ต้องให้ค่าแรงดันฐานรองในทิศทางไบแอสไปข้างหน้าหรือฟอร์เวิร์ดไบแอส (forward bias) ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มลดลงตามสมการ วงจรที่ใช้ในการศึกษาค่าแรงดันฐานรองหรือกระแสขั้วสเตรทที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่มแสดงได้ดังรูป 5.3 โดยค่าแรงดันที่ซอสมีค่าเป็นศูนย์ ค่าแรงดันที่เดรนและบอดีจะมีค่าเป็นบวกทำให้เกิดกระแสเดรนผ่านตัวต้านทาน R_D และกระแสขั้วสเตรทผ่านตัวต้านทาน R_S ค่าตัวต้านทานทั้งสองสามารถปรับค่ากระแสให้มีค่าเหมาะสม เช่นเดียวกัน ผลของการจำลองแบบค่าแรงดันขีดเริ่มกับค่าแรงดันฐานรองแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 รูปที่ 5.4 เป็นการพลอตระหว่างค่ารากที่สองของค่ากระแสเดรน $\sqrt{I_D}$ กับแรงดันเกต V_{GS} ในขณะที่มอสเฟตทำงานช่วงอิ่มตัว ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานในการหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ส่วนค่าแรงดันขีดเริ่มหาได้จากการต่อกราฟรากที่สองของกระแสเดรนมาตัดแกน X ที่ค่า V_{GS} ค่าที่ได้คือค่าแรงดันขีดเริ่ม จะสังเกตว่าอุปกรณ์ที่เราใช้มีโครงสร้างเป็นเอ็นมอสเฟต ค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเป็นค่าบวก รูปที่ 5.5 เป็นการพลอตค่าแรงดันขีดเริ่มกับค่าแรงดันฐานรองที่ค่าต่างๆ จะเห็นว่าที่ค่าแรงดันฐานรองมีค่าเพิ่มขึ้นแต่น้อยกว่า 0.6 โวลต์ ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าลดลงเรื่อยๆ แต่ยังมีค่าเป็นบวก แต่ที่ค่าแรงดันฐานรองมากกว่า 0.6 โวลต์ ค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเป็นลบทำให้มอสเฟตที่ทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดกลับเป็นการทำงานแบบดีพลีชันโหมด จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าที่ค่าแรงดันฐานรองมีค่ามากกว่าศูนย์จะเกิดกระแสขั้วสเตรทไหลสังเกตได้จากค่ากระแสแนวราบที่วิ่งก่อนค่าแรงดันขีดเริ่ม การใช้งานมอสเฟตตรวจจับสนามแม่เหล็กต้องการให้เกิดค่ากระแสขั้วสเตรทขึ้น



รูป 5.3 วงจรการไบแอสมอสเฟตสำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก



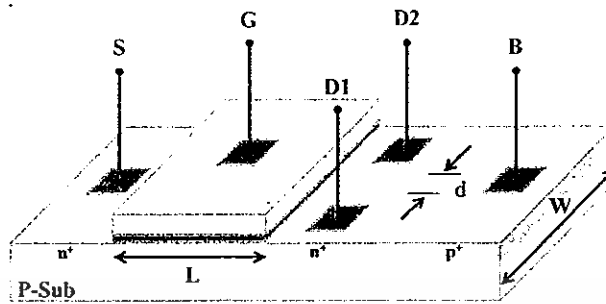
รูป 5.4 การพลอตระหว่าง $\sqrt{I_D}$ กับ V_{GS} ในช่วงการทำงานอิ่มตัว



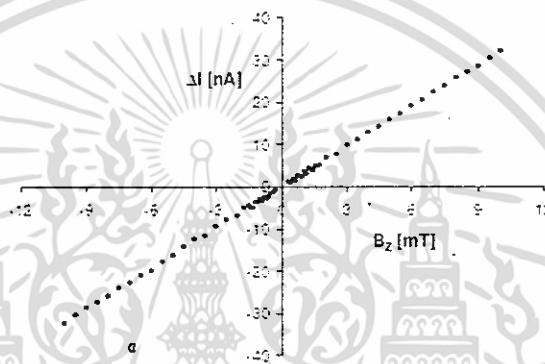
รูป 5.5 ค่าแรงดันขีดเริ่มที่ค่าแรงดันฐานรองค่าต่างๆ

5.3 การศึกษาแมกเฟต (MAGFET) ด้วยการจำลองแบบ

ในตอนนี้เราทำการศึกษาแมกเฟตทั่วไปโดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.6 จากรูปโครงสร้างแมกเฟตจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับมอสเฟตแต่จะแตกต่างกันตรงที่ส่วนเดรนของแมกเฟตจะมีสองส่วนแยกกันอย่างสมมาตรจึงทำให้แมกเฟตโครงสร้างนี้บางทีก็มีชื่อเรียกว่ามอสเฟตแบบแยกเดรน (split drain MOSFET) ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 โดยค่าเอาต์พุตคือค่าความแตกต่างของกระแสเดรนทั้งสอง ΔI_D ที่สัมพันธ์เชิงเส้นกับสนามแม่เหล็กจากกราฟคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กในรูป 5.7 เป็นการวัดคุณสมบัติที่ได้จากอุปกรณ์จริง

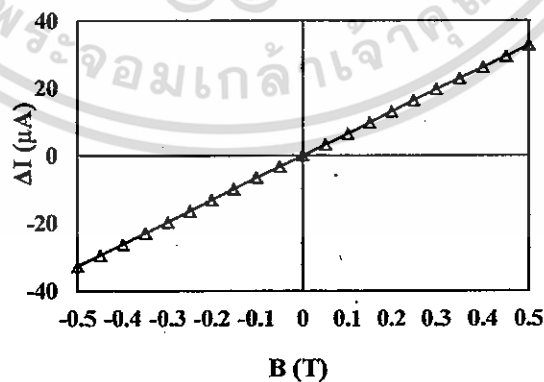


รูป 5.6 โครงสร้างมอสเฟตแบบแยกเดรน (split drain MOSFET)



รูป 5.7 ผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกเฟต

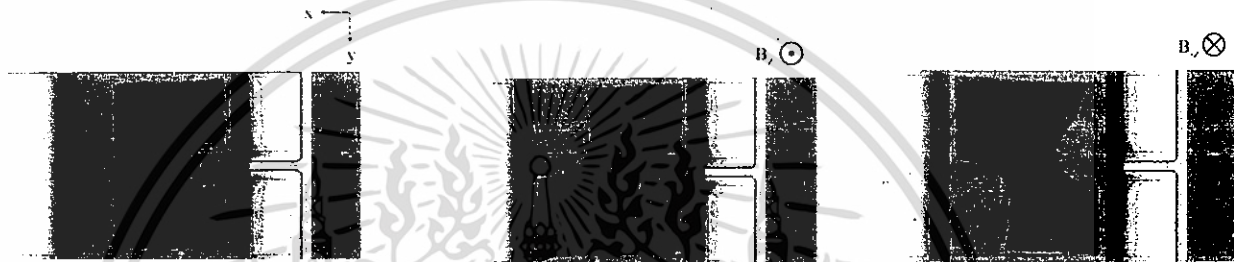
ในการจำลองแบบเพื่อศึกษาโครงสร้างแมกเฟตเราทำการจำลองแบบโครงสร้างในรูป 5.5 โดยผลการจำลองแบบที่ได้ถูกแสดงไว้ในรูป 5.8 จากผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่ามีลักษณะและความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกับผลที่ได้จากอุปกรณ์จริงในรูป 5.7 โดยผลตอบสนองแสดงความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่ค่าที่ได้จะแตกต่างกันเพราะขนาดของอุปกรณ์และพารามิเตอร์ที่ใช้จะแตกต่างกัน โมเดลที่ใช้ในการศึกษาสนามแม่เหล็กของโปรแกรม TCAD Sentaurus แสดงได้ดังนี้



รูป 5.8 ผลการจำลองแบบผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกเฟต

$$\vec{J}_a = \mu_a \vec{g}_a + \mu_a \frac{I}{1 + (\mu_a B)^2} \cdot [\mu_a \vec{B} \times \vec{g}_a + \mu_a \vec{B} \times (\mu_a \vec{B} \times \vec{g}_a)]$$

โดยที่ $\alpha = n$ หรือ p , \vec{J}_a = ความหนาแน่นกระแสพหุ, \vec{g}_a = เวกเตอร์กระแสที่ไม่มีค่าความคล่องตัว, μ_a = ค่าความคล่องตัวฮอลล์, \vec{B} = เวกเตอร์สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและ B = ขนาดของเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก รูปที่ 5.9 แสดงผลการจำลองแบบการกระจายตัวความหนาแน่นกระแสจากด้านบน โดยเมื่อยังไม่ให้ค่าสนามแม่เหล็ก ค่ากระแส ID1 และ ID2 จะมีค่าเท่ากัน เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กในทิศ +Z ค่ากระแส ID1 มีค่ามากกว่า ID2 ทำให้ค่าความแตกต่างกระแส ΔI มีค่าเป็นบวกและในทำนองเดียวกันสำหรับค่าสนามแม่เหล็กในทิศ -Z ค่ากระแส ID1 จะมีค่าน้อยกว่า ID2 ค่าความแตกต่างกระแส ΔI มีค่าเป็นลบ

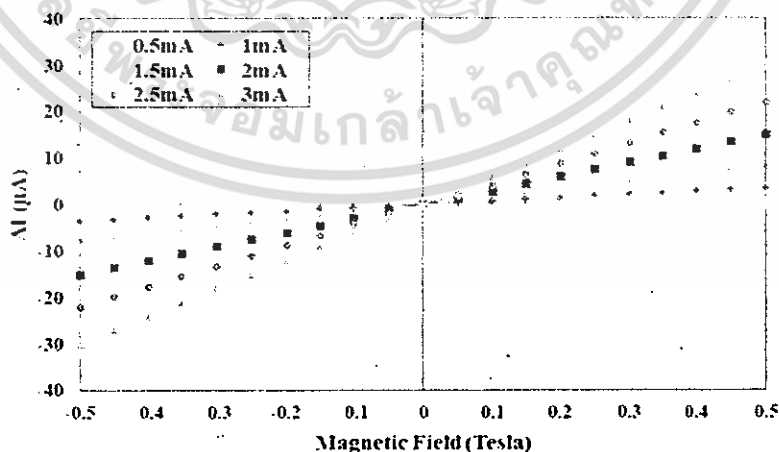


(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก (ข) ให้สนามแม่เหล็กแนว Z (ค) ให้สนามแม่เหล็กในแนว -Z

รูป 5.9 แสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสด้านบนจากการจำลองแบบ

5.4 การศึกษามอสเฟตมาใช้งานเป็น MAGFET ด้วยการจำลองแบบ

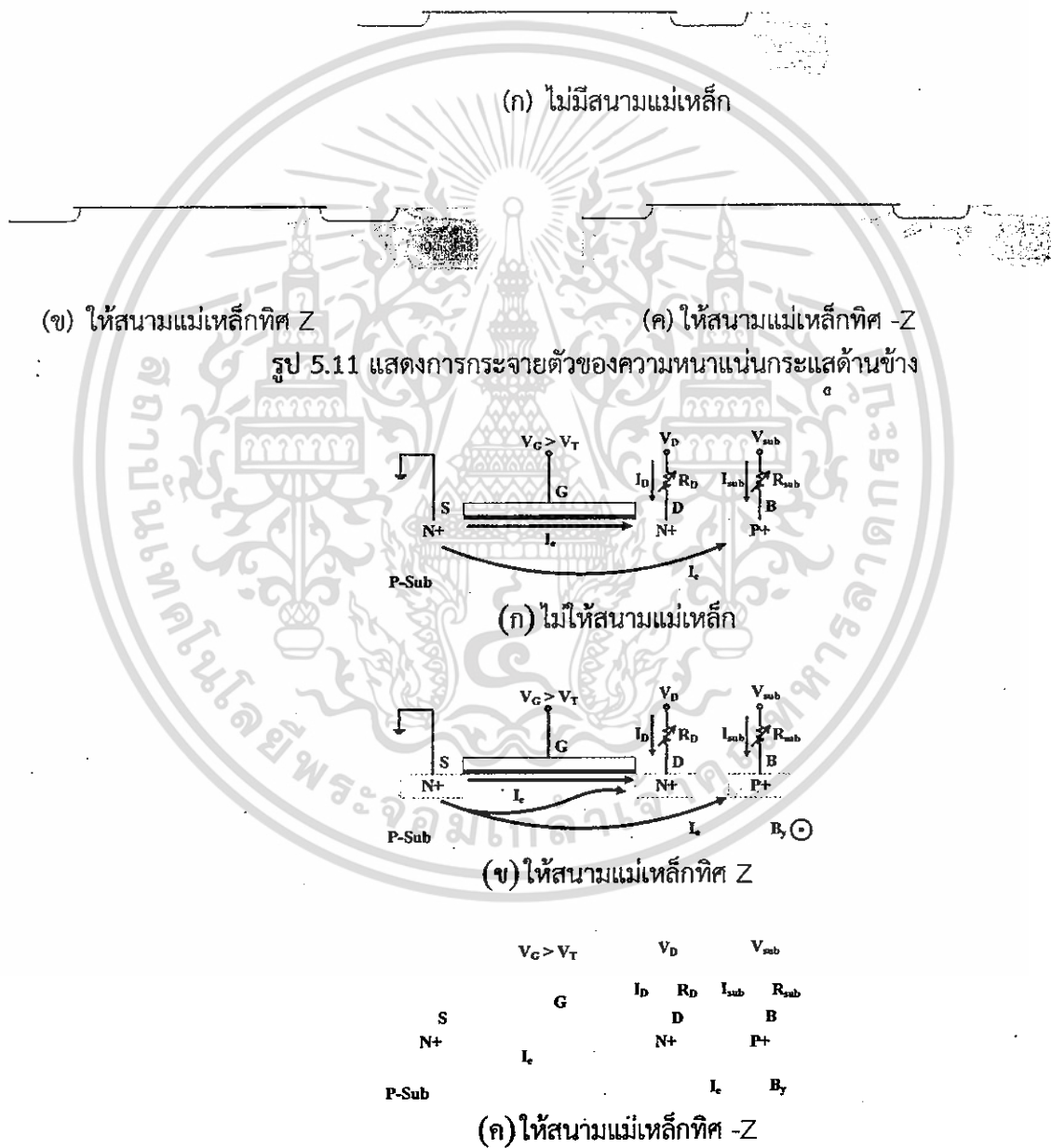
จากวงจรในรูป 5.3 เราทำการวัดคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กโดยการให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวขนานกับอุปกรณ์และตั้งฉากกับกระแส โดยในที่นี้เราไบแอสให้เกิดกระแสเดรนและกระแสซบสเตรท ผลของสนามแม่เหล็กจะทำให้ผลต่างของกระแส ($\Delta I = I_D - I_S$) เกิดการเปลี่ยนแปลง เรากำหนดให้ค่า ΔI มีค่าเป็นศูนย์ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ผลการจำลองแบบเมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศ +y และ -y แสดงได้ดังรูปที่ 5.10.



รูป 5.10 ผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของเอ็นมอสเฟตจากการจำลองแบบ

จากผลการจำลองแบบค่าสนามแม่เหล็ก(B) มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าเอาท์พุท (ΔI) เมื่อให้สนามแม่เหล็กทิศทาง +y จะให้ค่า ΔI มีค่าเป็นบวกซึ่งค่า I_D จะมากกว่าค่า I_S เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศ-y ค่าเอาท์พุทจะมีค่าเป็นลบหรือกระแส I_S มีค่ามากกว่า I_D ความชันของกราฟคือค่าความไวจะมีค่ามากขึ้นตามค่าไบแอสที่ให้

รูปที่ 5.11 แสดงการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสด้านข้างของอุปกรณ์ เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง +y จะสังเกตเห็นค่ากระแสขั้วสเตรทมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น และเมื่อสนามแม่เหล็กให้ในทิศทาง -y ค่าความหนาแน่นกระแสขั้วสเตรทจะมีค่ามากขึ้น จากผลการทดลองนี้เราสามารถอธิบายกลไกการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังรูป 5.12



รูป 5.12 กลไกการทำงานของมอสเฟตตรวจจับสนามแม่เหล็ก

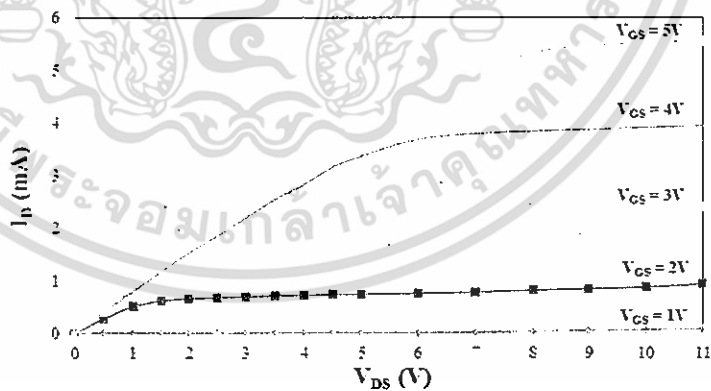
จากรูป 5.12ก. เป็นกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ค่ากระแสเดรนและค่ากระแสซัสเตรทมีค่าเท่ากัน อิเล็กตรอนจะถูกฉีดจากขอสผ่านช่องทางเดินกระแสไปเดรนจะทำให้เกิดกระแสเดรนไหลเข้าเดรนไปยังขอส ส่วนกระแสซัสเตรทที่ไหลเข้าขั้วบอดี้ไปยังขอสเกิดจากอิเล็กตรอนฉีดจากขอสไปฐานรองไปยังขั้วบอดี้ รูปที่ 5.12ข. เป็นการแสดงกลไกการทำงานเมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง $+y$ ตัดกับกระแสในทิศทาง $-X$ จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง $+Z$ ทำให้อิเล็กตรอนในฐานรองถูกผลักเข้าไปยังช่องทางเดินกระแสด้านบนทำให้ค่ากระแสเดรน I_D มีค่ามากกว่ากระแสซัสเตรท I_S ทำให้ค่าความแตกต่างกระแส $(I_D - I_S)$ มีค่ามากกว่าศูนย์ ในรูป 5.12ค. เป็นกรณีที่ให้ค่าสนามแม่เหล็กทิศทาง $-y$ ตัดกับกระแสในทิศทาง $-X$ เช่นเดิมจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศ $-Z$ ทำให้อิเล็กตรอนในช่องทางเดินกระแสถูกผลักลงมาในฐานรองทำให้ค่าผลต่างกระแส $(I_D - I_S)$ มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จากการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่ากลไกกระแสของมอสเฟตที่เกิดจากการเหนี่ยวนำแรงดันที่เกทับกับกลไกกระแสในเนื้อสารสามารถที่จะสลับกันได้อย่างต่อเนื่องกลมกลืนด้วยแรงลอเรนซ์สังเกตจากความเป็นเชิงเส้นของเอาท์พุทในทิศทางสนามแม่เหล็กทั้งสองทิศทาง ซึ่งยืนยันการทำงานได้ของมอสเฟตในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

5.5 การศึกษาการนำมอสเฟตไปใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์จริง

ในตอนนี้เราทำการวัดค่าผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์จริงที่ทำการสร้างขึ้น โดยอุปกรณ์จริงที่สร้างขึ้นมานี้มีความแตกต่างจากโครงสร้างมอสเฟตที่ทำการจำลองแบบมาก่อนหน้านี้ นอกจากนี้เราได้ทำการจำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัด โดยจะใช้มิติและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากค่าอุปกรณ์จริง

5.5.1 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟต

ในขั้นตอนแรกทำการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟต โดยแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 จากผลการวัดแสดงให้เห็นคุณสมบัติของมอสเฟตปกติทั่วไป

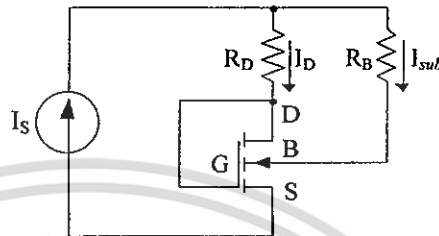


รูป 5.13 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอสเฟตจากการวัด

5.5.2 วงจรการไบแอสสำหรับวัดคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก

วงจรที่ไบแอสในการศึกษาการตอบสนองสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูป 5.14 ในการทดลองเราใช้แหล่งจ่ายกระแสแสดงที่แทนแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ทั้งนี้เพราะต้องการให้ค่ากระแสรวมมีค่าคงที่ไม่ให้เกิดจากปรากฏการณ์อื่น

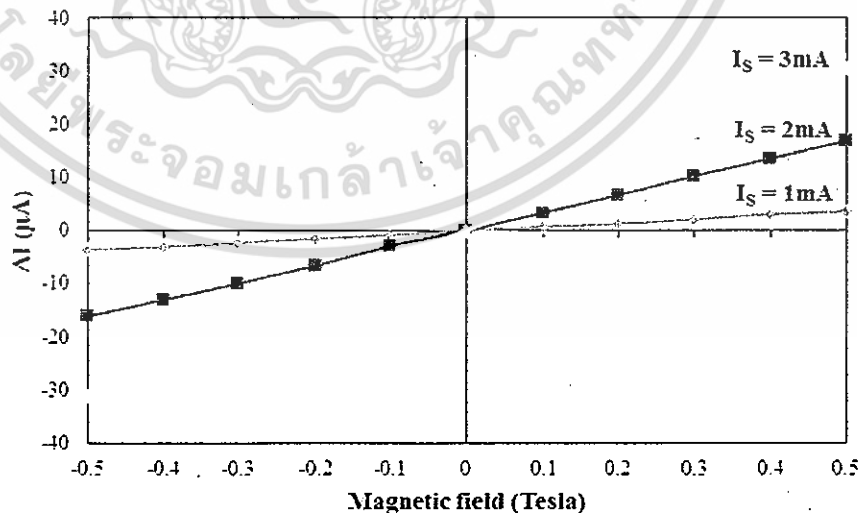
กระแสเดรนและกระแสซบสเตรทจะรวมกันคงที่เท่ากับแหล่งจ่าย ผลของความแตกต่างกระแสใดๆต้องมาจากการเบี่ยงเบนระหว่างกระแสทั้งสองเนื่องจากแรงลอเรนซ์เท่านั้น และเช่นเดียวกันกับการจำลองแบบ เราจะใช้วงจรกระแสคงที่เป็นตัวไบแอสและมีเงื่อนไขเหมือนกันทุกประการกับวงจรจริง



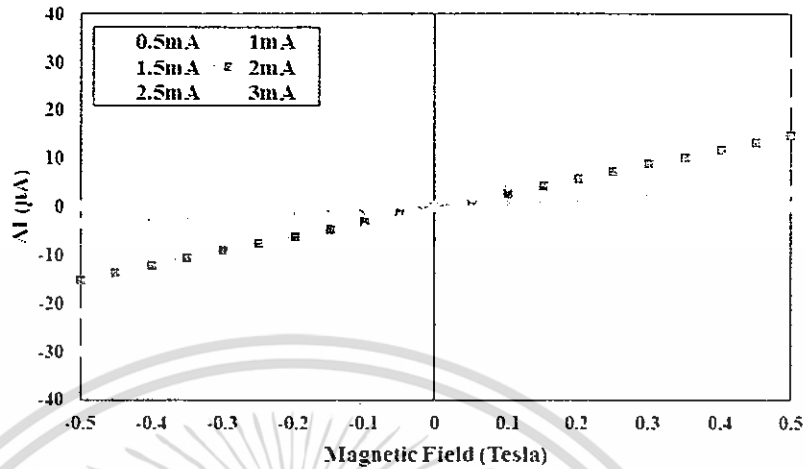
รูป 5.14 วงจรไบแอสในการวัดคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก

5.5.3 ผลตอบสนองสนามแม่เหล็ก

เมื่อการไบแอสเราทำการวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กโดยการให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านอุปกรณ์ในแนวขนานกับอุปกรณ์แต่ตั้งฉากกับกระแส ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 เมื่อทำการไบแอสที่ค่ากระแส 1, 2 และ 3 mA ค่าความไวสัมพัทธ์ ($\Delta I/I_B$) มีค่า 0.0072 0.0168 และ 0.02 T⁻¹ ตามลำดับ ความสัมพันธ์มีค่าเป็นเชิงเส้นที่ทุกค่ากระแสและช่วงสนามแม่เหล็กที่ทำการวัด เมื่อทำการจำลองแบบเปรียบเทียบ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.16 ค่ากระแสที่ใช้ในการจำลองแบบมีค่า 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 mA ค่าความสัมพันธ์มีค่าเป็นเชิงเส้นทุกค่าตลอดช่วงการวัดสนามแม่เหล็ก ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดและการจำลองแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก เมื่อสนามแม่เหล็กถูกให้ในทิศทาง +y ค่าความแตกต่างของกระแส (ΔI) จะมีค่าเป็นบวก ในกรณีนี้กระแสเดรนมีค่ามากกว่ากระแสซบสเตรท เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง -y ค่าความแตกต่างของกระแส จะมีค่าเป็นลบ ในกรณีนี้ค่ากระแสซบสเตรทจะมีค่ามากกว่ากระแสเดรน และในทุกเงื่อนไขกระแสรวม ($I_D + I_S$) จะมีค่าคงที่เท่ากับกระแสจากแหล่งจ่าย



รูป 5.15 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของเอ็นมอสเฟทที่ได้จากการวัด



รูป 5.16 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของเอ็นมอสเฟตที่ได้จากการจำลองแบบ

จากการเปรียบเทียบทั้งสองวิธีได้ยืนยันการทำงานของมอสเฟตในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอน รูปที่ 5.17 แสดงรูปด้านบนการกระจายความหนาแน่นกระแสจากการจำลองแบบของเอ็นมอสเฟตจากมิติและพารามิเตอร์จากอุปกรณ์จริง จากรูปจะเห็นการกระจายกระแสขั้วสเตรทในเงื่อนไขต่างๆ และเราสามารถยืนยันกลไกการทำงานของอุปกรณ์มอสเฟตในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอน โดยรูปที่ 5.18 แสดงภาพตัดขวางอุปกรณ์ขณะที่ให้ไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ โดยกระแส I_D และ I_{sub} เกิดจากแหล่งจ่ายกระแส I_S และสามารถปรับค่าได้จาก R_D และ R_S เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนว $+y$ ค่ากระแสเดรนจะมีค่ามากกว่ากระแสขั้วสเตรทเนื่องจากแรงลอเรนซ์ในทิศ $+Z$ ดังแสดงในรูป 5.18ข ในทางตรงข้ามเมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศ $-y$ กระแสขั้วสเตรทจะมีค่ามากกว่ากระแสเดรนเนื่องจากแรงลอเรนซ์ในทิศ $-Z$ กลไกการทำงานทั้งสองสามารถเปลี่ยนไปมาได้โดยอิสระไม่มีอุปสรรคใดๆ สังเกตได้จากผลการทดลองที่ได้จากการวัดและผลจากการจำลองแบบด้วยเช่นเดียวกันที่ให้ค่าความไวในสนามแม่เหล็กทิศ $+y$ และ $-y$ มีค่าเท่ากันเป็นการยืนยันการใช้งานมอสเฟตไปตรวจจับสนามแม่เหล็ก



(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก

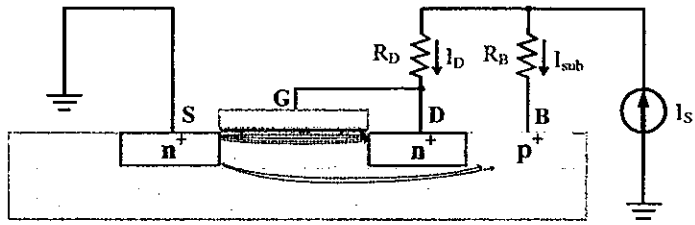


(ข) ให้สนามแม่เหล็กในทิศ Z

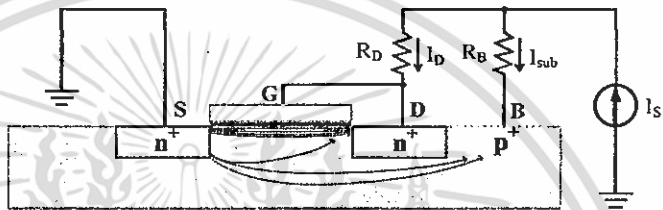


(ค) ให้สนามแม่เหล็กในทิศ -Z

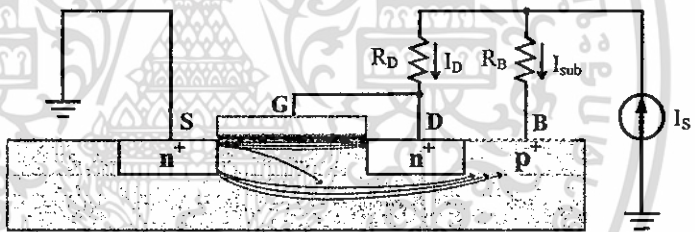
รูป 5.17 ความหนาแน่นกระแสของมอสเฟตจากการจำลองแบบ



(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก



(ข) เมื่อให้สนามแม่เหล็กทิศ Z



(ค) เมื่อให้สนามแม่เหล็กทิศ -Z

รูป 5.18 กลไกการทำงานเอ็นมอสเฟตตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน

บทที่ 6

บทสรุป

โครงการวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้โครงสร้างมอสเฟตปกติ ซึ่งมีความแตกต่างจากโครงสร้างทั่วไปคือ แมกเฟตที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กในโหมดการทำงานแบบกระแสจะมีเดรนที่แยกจากกันเป็นสองส่วนที่เรียกว่า split drain ส่วนโครงสร้างที่เหลือจะคล้ายมอสเฟต แต่อุปกรณ์ในการวิจัยนี้จะมีโครงสร้างเหมือนมอสเฟตใช้งานปกติทั่วไป เพียงแต่นำขั้วบอดี้หรือฐานรองมาใช้ประกอบ การวิจัยเริ่มต้นจากสมมุติฐานของการทำงานตรวจจับสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสที่ใช้การเบี่ยงเบนกระแสสองส่วน ดังนั้นการศึกษาเริ่มต้นที่การจำลองแบบโครงสร้างมอสเฟตเพื่อที่ทดสอบหลักการเบื้องต้น จากการศึกษาแสดงให้เห็นหลักการการทำงานที่สามารถเป็นไปได้จึงนำมาสู่การวัดอุปกรณ์มอสเฟตที่สร้างขึ้น ผลการตอบสนองปรากฏว่าสามารถใช้งานตามที่คาดการณ์ไว้และได้ทำการจำลองแบบกับอุปกรณ์จริงเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง จากการเปรียบเทียบผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก เป็นการยืนยันหลักการการทำงานของการนำโครงสร้างมอสเฟตมาตรวจจับสนามแม่เหล็ก

จากการศึกษาจากอุปกรณ์จริงเปรียบเทียบกับการทำงานจำลองแบบสามารถสรุปการทำงานได้ดังนี้ การทำงานใช้กระแสสองส่วนคือกระแสเดรน และกระแสซบัสเตรทหรือฐานรองโดยการไบแอสและปรับค่าด้วยค่าความต้านทานผ่านเป็นแรงดันลบปรับให้มีค่าออฟเซตน้อยที่สุด เมื่อสนามแม่เหล็กแนวอนหรือแนวขานานกับอุปกรณ์แต่ตั้งฉากกับกระแสจะเหนี่ยวนำแรงกระทำกับกระแสทั้งสองให้มีการเบนขึ้นลงตามทิศทางสนามแม่เหล็ก โดยกลไกกระแสเดรนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสจากแรงดันเกตและกลไกกระแสที่วิ่งในเนื้อสารหรือกระแสซบัสเตรทสามารถที่จะแลกเปลี่ยนประจุพาหะอิเล็กตรอนระหว่างสองกลไกได้เป็นอย่างดีจึงทำให้ผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามสมมาตรกับทิศทางตรง ซึ่งเป็นข้อดียืนยันจากผลการทดลองและการจำลองแบบตามทฤษฎี

ลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งคือเป็นเซนเซอร์โครงสร้างมอสเฟตที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนซึ่งแตกต่างจากเซนเซอร์โครงสร้างมอสเฟตทั่วไปที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง ทำให้มีอุปกรณ์ที่มาเติมเต็มการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนของมอสเฟต ซึ่งมอสเฟตเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของวงจรรวมทำให้อุปกรณ์นี้สามารถทำงานร่วมกับวงจรรวมได้เป็นอย่างดี จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า เราสามารถนำโครงสร้างมอสเฟตมาประยุกต์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก และเป็นแนวทางการออกแบบอุปกรณ์ประเภทนี้ให้สามารถพัฒนามีประสิทธิภาพมากขึ้นได้จากที่กล่าวมายังมีปัญหาบางประการที่อาจจะเป็นอุปสรรคในการใช้งานอยู่บ้างคือการที่ปรับค่าแรงดันออฟเซตให้มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งในการใช้งานจะมีค่าแรงดันออฟเซตนี้อยู่ ซึ่งก็เป็นปกติของการใช้งานอุปกรณ์ฮอลล์ ซึ่งโดยรวมนับว่าประสพผลสำเร็จจากหลักการดังกล่าวที่ได้นำเสนอและพิสูจน์ให้เห็นผลจากอุปกรณ์จริง แต่ข้อดีที่เกินความคาดหมายของผู้วิจัยคือไม่มีข้อแตกต่างระหว่างการเบี่ยงเบนกระแสจากกลไกเนื้อสารไปยังกระแสที่ช่องทางเดินกระแส และการเบี่ยงเบนกระแสจากช่องทางเดินกระแสมาที่เนื้อสารฐานรองแต่อย่างไร ซึ่งเป็นมิติใหม่ของอุปกรณ์ประเภทใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์โหมดกระแส

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lenz and A. Edelstein , Magnetic Sensors and Their Application, IEEE Sensors Journal, vol. 6 No.3, 2006, pp.631-649.
- [2] S. M. Rezaul, "A novel 0.7 V high sensitivity complementary differential MAGFET sensor for contactless mechatronic application", Sensors and Actuators, A 161, 2010, pp. 138-149.
- [3] Y. Yunruo, Z. Dazhong and G. Qing, "Sector Split-drain magnetic field-effect transistor based on standard CMOS technology" Sensor and Actuator, A 121,2005, pp.347-351.
- [4] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk "Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:3, No:4, 2009.
- [5] Juraj Marek, Daniel Donoval, Martin Donoval, Martin Daricek "Analysis of Novel MagFET Structures for Built-in Current Sensors Supported by 3D Modeling and Simulation" ASDAM 2008, The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor 315 Devices and Microsystems, October 12-16, 2008, Smolenice Castle, Slovakia.
- [6] G. Qing, Z. Dazhous and Y. Yunruo, "CMOS magnetic sensor integrated circuit with sectorial MAGFET", Sensor and Actuator, A 126, 2006, pp. 154-158.
- [7] S. R. Ashwin, S. Sreejith, U. Sajeshkumar, "TCAD Design of Tunnel FET Structures and Extraction of Electrical Characteristics", International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2013, pp. 2319-7064.
- [8] TCAD Sentaurus Manual, synopsis®, version D-2013.03.
- [9] ZhaoXiaofeng, WenDianzhong, LüMeiwei, GuanHanyu, andLiuGang, " Fabrication and characterization of the split-drain MAGFET based on the nano-polysiliconthinfilmmtransistor", Journal of Semiconductors, Vol. 35, No. 9, September, 2014.
- [10] Martin Dařiček, Martin Donoval, Alexander Šatka, Tomáš Košík, "Characterization of MagFET structures", 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems,2008, pp. 1233 – 1236.



ภาคผนวก



Simulation of MOSFET as Horizontal Magnetic MOSFET (MAGFET)

Rattapong Nakachai, Toempong Phetchakul,
Sawatdipong Poonsawat
Department of Electronics, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
e-mail: R.nakachai@gmail.com,
toempong.ph@kmitl.ac.th

Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center,
Wangtakin District, AmphurMuang,
Chachoengsao, Thailand
e-mail: Amporn.poyai@necotec.or.th

Abstract—This work proposes the regular long channel MOSFET structure used as magnetic MOSFET (MOSFET that can detect magnetic field) in parallel direction (y-axis). The structure is regular MOSFET that has drain, gate, source and substrate (body). The mechanism of device is Hall effect in current mode between channel MOSFET current and substrate current in x-axis direction. The dimensions of channel MOSFET are 20 μm wide and 20 μm long. The channel and substrate currents are balance adjusted in the same values at 0.5, 1 and 1.5 mA. From the simulation results by TCAD sentaurus, the relative sensitivity of device is 0.01 T^{-1} in y and -y direction, respectively. It can be used as magnetic sensor for one dimension in parallel field.

Keywords—TCAD; MAGFET; MOSFET; hall effect; pn junction

I. INTRODUCTION

The magnetic transistor is the special transistor that is designed for detecting magnetic field perpendicular to bias current of device. There are two main types as well as transistor, bipolar transistor and field effect transistor. The bipolar magnetic sensor is well-known as magnetotransistor that has structure like pnp or npn transistor [1]. The field effect transistor or MAGFET is a kind of magnetic sensor that has split-drain MOSFET structure which also has n-type and p-type [2]. The mechanisms that use for operation are injection modulation and carrier deflection. MAGFET is fabricated by standard MOS or CMOS process which is a good advantage over magneto transistor.

MAGFET generally has dual drain or split-drain that sink carriers injected from the source. The Lorentz's force from magnetic field cross the current act upon the carriers in the inversion layer causes the imbalance drain current related to magnetic field intensity. The device can be fabricated in difference shape [3] but the most popular is rectangular shape. It is analyzed by 2D and 3D modeling for magnetic field detection [4, 5]. Because it is compatible to CMOS technology, many applications can do it in the way of CMOS integrated circuit [6]. The complementary structure is developing for high efficiency device. The analysis and modeling are developed in many difference conditions.

In this study, we proposed a new way of regular MOSFET to use as magnetic MOSFET or MAGFET. The basic four terminals are fully used as MAGFET terminals.

The Lorentz's force is the main mechanism for parallel magnetic field detection. The split drain MAGFET is tested before we study the conventional MOSFET by sentaurus TCAD simulation. Sentaurus TCAD is an efficiency tool for microelectronic process, semiconductor devices and varies related physical energy study [7, 8].

II. BASIC THEORY

A. Split Drain MAGFET

The split drain MAGFET is a MOSFET that drain is split in two regions D1 and D2 as shown in Fig. 1. The device operates as normal MOSFET device by gate-substrate biasing and drain current flow from drain-source voltage. The vertical magnetic field induce Lorentz's force perpendicular to inversion layer produces a current imbalance $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$ between the two drains. The constant current source should be biased for keeping the constant total drains current I_D to avoid the modulation effect from magnetic field. The geometry of device is related to the output. The relative sensitivity is defined as the drain current difference per magnetic field density per biasing current.

$$S = \Delta I_D / I_D B \quad (1)$$

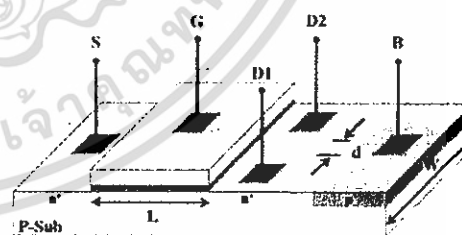


Figure 1. Structure of split drain MOSFET.

where B is magnetic field density. The characteristic $\Delta I_D - B$ usually shows the linear relation as shown in Fig. 2. Fig. 2 is an example of real device but there are many other works that gave the linearly characteristic like this [9]. Even though the linear relation, it is in basic theory that is always developed for get rid of some nonlinear factors in practical

devices. It can operate both in saturation and non-saturation mode. The application is so widely such as discrete device and circuit system.

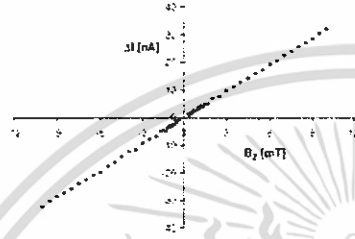


Figure 2 $\Delta I_{D1}-B$ characteristic of split drain MOSFET [10].

B. MOSFET

MOSFET is well known the most importance basic element in electronics. In integrated, MOSFET is the main element for circuit design. Complementary MOS or CMOS is famous for low power consumption in consumer electronics. MOSFET has 4 basic terminals that are drain, gate, source and substrate. Normally, if the opportunity is given, the source and substrate are connected together for no threshold voltage shift ΔV_T from substrate bias effect or body bias effect. The substrate bias is normally in reverse bias because forward voltage will give the substrate current. That is the normally way to use substrate terminal when we always forget that MOS device has only 3 terminals, source, gate and drain. The threshold voltage shift from substrate bias V_{SB} effect is

$$\Delta V_T = -\frac{Q_{SD}}{C_{ox}} = \frac{\sqrt{2\epsilon\epsilon_0 N_a}}{C_{ox}} [\sqrt{2\phi_{fp}} V_{SB} - \sqrt{2\phi_{fp}}] \quad (2)$$

where Q_{SD} charge density under gate between source and drain, C_{ox} is oxide capacitance density, N_a is acceptor substrate concentration of NMOS, $2\phi_{fp}$ is potential difference between p type and n type semiconductor. From Equation (1), we define

$$\gamma = \frac{\sqrt{2\epsilon\epsilon_0 N_a}}{C_{ox}} \quad (3)$$

where γ is defined as the body effect coefficient. Equation (2) may then be written as

$$\Delta V_T = \gamma [\sqrt{2\phi_{fp} + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_{fp}}] \quad (4)$$

This study will use substrate terminal as a regular device terminal. The substrate will be biased in forward bias for required substrate current as p-n junction current for magnetic detection MOSFET.

C. TCAD sentaurus

TCAD sentaurus program is the well-known commercial program for process simulation [7]. There are model for magnetic simulation. The current density with magnetic field density model used for this study is explain as

$$\vec{J}_a = \mu_n \vec{E}_n + \mu_p \frac{I}{1 + (\mu_n \vec{B})^2} [\mu_n \vec{B} \times \vec{E}_n + \mu_p \vec{B} \times (\mu_n \vec{B} \times \vec{E}_n)] \quad (5)$$

where $\alpha = n$ or p , \vec{J}_a = carrier current density, \vec{E}_n = current vector without mobility, μ_n = the Hall mobility, \vec{B} = the magnetic induction vector and B = the magnitude of this vector.

III. EXPERIMENT

The experiment for simulation is divided in two parts. The first part is for characteristic of device and the second part is for magnetic response of device. The split drain MAGFET is tested before for the magnetic measurement to confirm the accuracy of the simulation model.

A. Device Structure

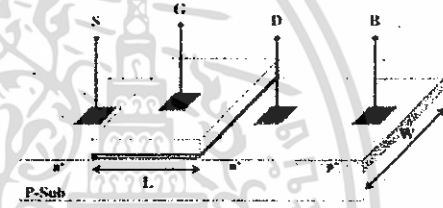


Figure 3. The device structure of conventional MOSFET that use as MAGFET

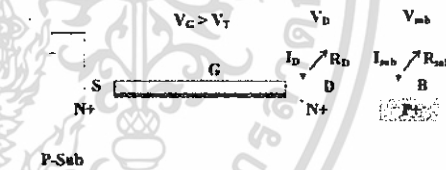


Figure 4. Biasing circuit for N-MOSFET used as MAGFET.

The device structure is shown in Fig. 4. The structure is simple MOSFET that has drain gate source and substrate. In order to facilitate the detection of the magnetic field, the drain is next to the substrate and the source is the opposite side. In other words, this device is a conventional MOSFET device that switches drain and the source itself. All parts are placed in line in X direction. The dimensions of gate is 20 μm long (L) and 20 μm wide (W). The drain and source dimensions are the same 20 \times 15 μm^2 . In this study, we also have MAGFET simulation as well as a comparison. The structure and of split drain MAGFET is shown in Fig. 1. The dimension is the same as MOSFET that split drain with the gap between drain 1 μm .

B. Biasing Circuit

The N-MOSFET biasing circuit is shown in Fig. 4. The gate is biased greater than V_T for induced channel. The drain source V_{DS} is bias as usual MOSFET for drain current. The

substrate and source is biased in forward direction for substrate current. The resistor R_D and R_S are used for balancing the drain and substrate current. For the magnetic response, the magnetic density is applied perpendicular to drain and substrate current in parallel direction.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we will discuss the results obtained from the experiments by simulation. It is divided into three parts. In the first part, the properties of the MOSFET used in this study by the MOSFET characteristics and threshold voltage including the effect of substrate bias are discussed. The second part is the test of magnetic model of TCAD sentaurus by testing with the split-drain MAGFET structure. The last part is studied the magnetic responses of MOSFET device.

A. Device Characteristic

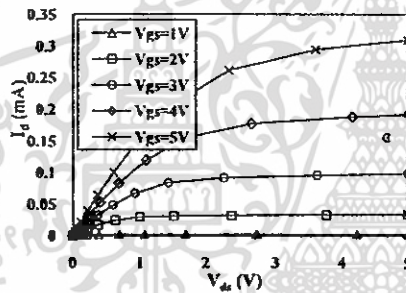


Figure 5 I-V Characteristic of N-MOSFET used as MAGFET

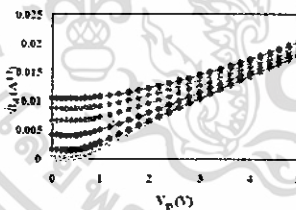


Figure 6. Forward substrate bias effect of N-MOSFET used as MAGFET.

The MOSFET device structure that we have studied here is shown in Fig. 3. The channel length L and width W are the same in $20 \mu\text{m}$. The current-voltage characteristic from simulation is shown in Fig. 5. It shows the typical n-channel enhancement mode MOSFET. The threshold voltage and substrate bias effect by $\sqrt{I_D} - V_G$ plot is shown in Fig. 6. The threshold voltage is less than 0.5 volt for zero substrate bias. For the operation of MOSFET used as MAGFET, the substrate and source have to bias in forward direction as shown before in Fig. 4. The forward bias effect is shown in Fig. 7. It plots between threshold and forward voltage dropped in p-n junction of substrate and source. The V_{TH} is

reduced with the forward substrate bias. The V_{TH} is reduced until the forward voltage 0.6 volt and become negative value when the forward voltage more than 0.6 volt. It shows that the MOSFET changes from enhancement mode to depletion mode. The forward substrate bias effect can be explained by equation (4).

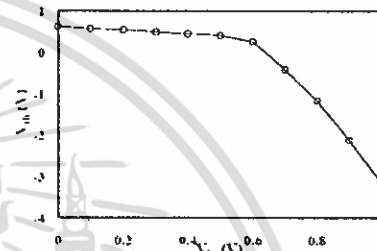


Figure 7 V_{th} (threshold voltage) and V_{FB} (forward substrate bias) plot

B. Split Drain MAGFET

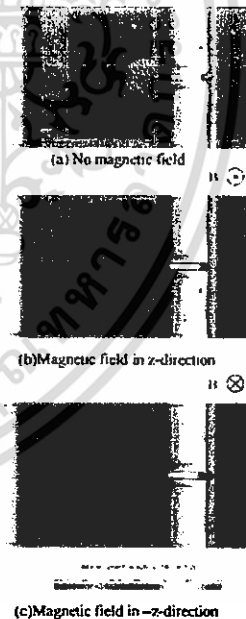


Figure 8 Simulation of current distribution when applied magnetic field of split drain MAGFET.

The simulation of magnetic response is tested via MAGFET structure. The structure of device is shown in Fig.

1. The device is biased as regular MOSFET in enhancement mode with the equal both drain currents. The magnetic field which is applied perpendicular to the current or device surface is defined as z direction. The z direction is magnetic field from substrate to surface and -z is opposite direction. The current density distribution on the surface is shown in Fig. 8. It shows the current deflection by Lorentz's force. Figure 8(a) shows the balancing drain current when no magnetic field. Figure 8(b) and (c) are the case of applied magnetic field in z and -z, respectively. The current density is not symmetry and bend to the direction of Lorentz's force. The result of drain current difference ΔI_D and magnetic field density B is shown in Fig. 9. It shows the linearly relation as in the real device as shown in Fig. 2. The sensitivity is the same in both direction and depend on the dimension of device. It proves the model that we use is preliminary enough for magnetic study.

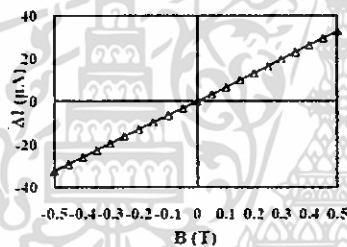


Figure 9 Simulation results of magnetic response of split drain MAGFET

C. MOSFET used as MAGFET

The MOSFET used in this study has structure shown in Fig. 3. It is normal MOSFET that has drain, gate, source and substrate or body. In generally, it is designed substrate region next to source because source is generally short with substrate for avoiding substrate bias effect. The MOSFET is the symmetry device that drain and source can switch position as long as source is not short to substrate. This position switching does not reduce any the performance down. In Fig. 5, drain is declined as the region near substrate and source is another side one.

The MAGFET is designed split-drain structure for two balance currents for deviation mechanism from induced Lorentz's force. The two currents is need for Hall current mode MAGFET. MOSFET that we used can give another current excluding channel current by forward substrate current of p-n junction. The source injects electrons pass through n channel to drain and injects electrons pass through bulk to substrate ohmic contact region. The two currents are in the same amount and direction in x direction. That is the reason that why drain is defined as the region next to substrate.

Figure 10 is the current density distribution of MOSFET that receives bias in Fig. 4. It shows the injected electron currents from source to drain and substrate. The two

currents are adjusted in balance by R_D and R_{sub} for 0.5, 1 and 1.5 mA. Figure 10(a) shows the electron current density when no magnetic field is applied. The channel current of MOSFET and bulk substrate current from p-n junction are the same. Figure 10 (b) and (c) shows the current density of the case of applied magnetic field in y and -Y direction. When the magnetic is applied in y direction, the current density of substrate current (I_{SUB}) is less than channel drain current (I_D). It can be observed the yellow shade color in bulk is less than in the case of no magnetic field in Fig. 10(a). In the other hand, the channel drain current is greater than substrate current when the magnetic field is applied in -y direction. It is observed that the yellow shade color of substrate is less than in the case of no magnetic field in Fig. 10(a). The plot of difference current between channel drain current and substrate current ($\Delta I = I_D - I_{SUB}$) versus magnetic field density is shown in Fig. 11. It shows the linearly relation along the measurement range. The relative sensitivities from equation (1) are $0.01 T^{-1}$. The sensitivities are constant in each biased current. It shows the symmetry deflection between induced channel current by field effect and p-n junction current.

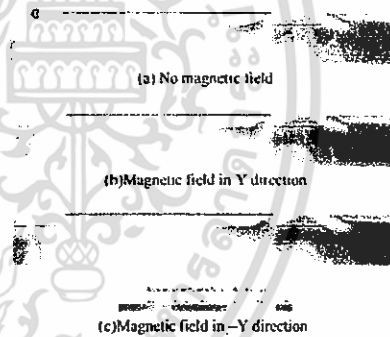


Figure 10. Simulation of current density distribution when applied magnetic field in parallel of N-MOSFET used as MAGFET.

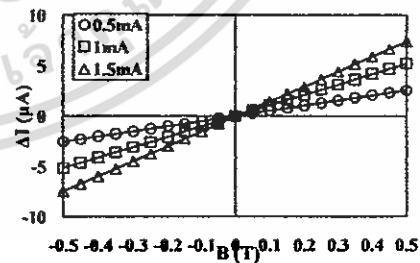


Figure 11. Simulation of magnetic response of N-MOSFET used as MAGFET.

From the simulation results, it is explained by the mechanism diagram shown in Fig. 12. It shows the electron

currents from source to drain by channel and from source to substrate by injection in bulk from biasing circuit. Figure 12(a) is the case of no magnetic field that two currents are equal. Figure 12(b) is the case of applied magnetic field in y direction. The Lorentz's force acts upon electrons into the surface that causes the channel drain current is greater than substrate current. Figure 12(c) is the case of applied magnetic field in $-y$ direction. The Lorentz's force acts upon electrons into the bottom so the substrate current is greater than channel drain current. The deflection between channel current and bulk current mechanisms does freely without any obstruction.

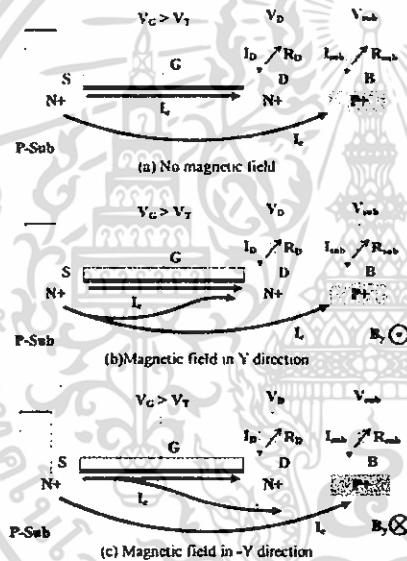


Figure 12. Mechanism of MOSFET for horizontal magnetic detection.

V. CONCLUSION

This paper presents a concept of the MOSFET used as MAGFET for the first time. The structure of device is normal MOSFET that has drain, gate, source and substrate. The substrate contact region is next to drain, all of them are placed in line. It is biased for drain current by gate voltage

and substrate current by forward direction between source and substrate. Electrons are injected to drain via induced channel and substrate via bulk. Lorentz's force is induced to deflect drain and substrate current depended on horizontal magnetic field direction. The constant sensitivity of both magnetic field direction shows that there is no difference between deflection current mechanism from channel to bulk and bulk to channel. The simulation results show that it can use as horizontal MAGFET.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thanks National Research Cousin of Thailand for financial support.

REFERENCES

- [1] Lenz and A. Edelstein, "Magnetic Sensors and Their Application", *IEEE Sensors Journal*, vol. 6 No.3, 2006, pp.631-649.
- [2] S. M. Rezaul, "A novel 0.7 V high sensitivity complementary differential MAGFET sensor for contactless mechatronic application", *Sensors and Actuators, A* 161, 2010, pp 138-149.
- [3] Y Yunuo, Z Dazhong and G Qing, "Sector Split-drain magnetic field-effect transistor based on standard CMOS technology" *Sensur and Actuator, A* 121,2005, pp 347-351
- [4] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk "Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation", *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* Vol 3, No 4, 2009.
- [5] Juraj Marck, Daniel Donoval, Martin Donoval, Martin Daricek "Analysis of Novel MagFET Structures for Built-in Current Sensors Supported by 3D Modeling and Simulation" *ASDAM 2008, The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor 315 Devices and Microsystems, October 12-16, 2008, Smolenice Castle, Slovakia*
- [6] G Qing, Z. Dazhou and Y. Yunuo, "CMOS magnetic sensor integrated circuit with sectorial MAGFET", *Sensor and Actuator, A* 126, 2006, pp. 154-158.
- [7] S. R. Ashwin, S. Sreejith, U. Sajeshkumar, "TCAD Design of Tunnel
- [8] FET Structures and Extraction of Electrical Characteristics", *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online)*, 2013, pp. 2319-7064.
- [9] TCAD Sentaurus Manual, synopsis30, version L-2016.03.
- [10] Zhao Xiaofeng, Wen Dianzhong, Lu Meiwei, Guan Hanyu, and Liu Gang, "Fabrication and characterization of the split-drain MAGFET based on the nano-polysilicon thin film transistor", *Journal of Semiconductors*, Vol. 35, No. 9, September, 2014.
- [11] Martin Daňiček, Martin Donoval, Alexander Šukla, Tomáš Košík, "Characterization of MagFET structures", *15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2008*, pp. 1233 - 1236.



Horizontal Magnetic Field MAGFET by Conventional MOSFET Structure

Rattapong Nakachai
Department of Electronics,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
R.nakachai@gmail.com

Anucha Ruangphanit
Thai Microelectronics Center
Wungtakhien District, Amphur
Muang,
Chachoengsao, Thailand
Cmoslec517@gmail.com

Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center
Wungtakhien District, Amphur
Muang,
Chachoengsao, Thailand
Amporn.poyai@nectec.or.th

Toempong Phetchakul
Department of Electronics,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
Toempong.ph@kmitl.ac.th

Abstract—The MOSFET used as magnetic field sensor is presented. It is a conventional structure that has a source, a gate, a drain and a substrate or body terminal fabricated by standard CMOS process. It detects the horizontal y-direction magnetic field in parallel and perpendicular to currents. The device is biased for channel current and substrate current. The mechanism is Hall effect in current mode. The induced Lorentz's force deflects currents between drain current and substrate forward current cause output differential current. The relation show linearly dependence between magnetic field density and output differential current. The relative sensitivity is depending on amount of bias currents.

Keywords—MOSFET; substrate current; Lorentz's force; magnetic sensor; current mode

I. INTRODUCTION

MOSFET that detect magnetic field so called MAGFET usually has split drain structure. It detects magnetic vertical field perpendicular to device surface. The mechanism is deflection carriers of inversion layer from induced Lorentz's force which cause the imbalance between drain current related to magnetic field intensity [1]. The magnetic response characteristics usually show linearly dependence [2, 3]. The analyzed models were proposed in 2D and 3D [4, 5]. Recently, the introduction of MOSFET to detect magnetic field was proposed by simulation [6]. It was the conventional structure that has drain, gate, source and substrate. The detected magnetic field is in parallel with device.

In this study, we proposed the MOSFET used as parallel magnetic field sensor by measurement. The device was designed and fabricated by standard CMOS process. The biasing for drain and substrate current were applied. The current-voltage characteristics and magnetic responses were measured. TCAD simulation with the same dimension and process condition of real device is also studied for confirmation. The mechanism was proposed for result explanation.

II. DEVICE STRUCTURE, FABRICATION AND SIMULATION

A. MOSFET

The conventional MOSFET structure is shown in Fig. 1. It has four terminals, drain (D), gate (G), source (S) and substrate

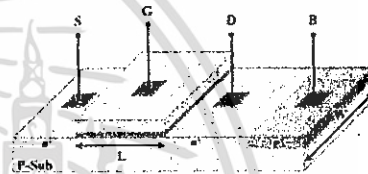


Fig. 1. Structure of conventional MOSFET structure.

(B). Normally, source and substrate are closed and connected together for avoiding threshold shift from substrate bias effect. For magnetic application, drain and substrate are placed in the same side of gate for controlling the same current direction and source is placed in another side of gate. The source is injected electron current to drain by gate biased voltage and to substrate by forward biased between source and substrate.

B. Device Fabrication

The N-MOSFET is fabricated by standard 0.8- μm CMOS process. The substrate is p type with the concentration $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Drain and source are N⁺ doped by phosphorus and arsenic with the concentration 10^{20} cm^{-3} . The gate dimensions are 20 μm wide and 1.2 μm long. The gate oxide thickness is 17 nm. Fig. 2 shows mask pattern and top view photomicrograph of fabricated device. There is a difference from Fig. 1 that the substrate contact is not behind drain region as shown in Fig. 1 but it is near drain pad which is far from drain. However, drain and substrate contact are in the same side of gate and source is in another side. It is enough for magnetic application.



(a) Mask pattern

(b) Photomicrograph

Fig. 2 Top view of N-MOSFET

C. TCAD Simulation

The commercial program for process simulation TCAD sentaurus[7] is used for this work. There is model for magnetic simulation. The current density with magnetic field density dependence model used for this study is explain as

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{I}{I + (\mu_\alpha B)^2} \cdot [\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha^* \vec{B} \times (\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha)] \quad (1)$$

where α is n or p , \vec{J}_α is carrier current density, \vec{g}_α is current vector without mobility, μ_α^* is the Hall mobility, \vec{B} is the magnetic induction vector and B is the magnitude of vector.

III. EXPERIMENT AND RESULTS

There are three parts of experiment. First, current-voltage characteristics of NMOS are investigated. Second, magnetic responses are measured. Finally, the magnetic responses are simulated by TCAD sentaurus.

A. I-V Characteristic

The current-voltage characteristics from the measurement are shown in Fig. 3. It shows the regular N-MOSFET. Then it will be taken to test magnetic responses.



Fig. 3 Current-voltage characteristics of N-MOSFET.

B. Biasing Circuit for Magnetic Response

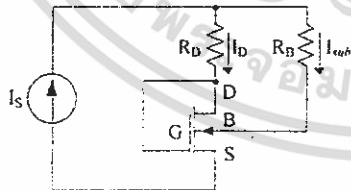


Fig. 4 Biasing circuit of N-MOSFET for magnetic measurement

The biasing circuit for magnetic measurement is shown in Fig.4. The constant current source is used for controlled the amount of current to avoid the magnetic modulation effect. The drain and substrate currents combine with a constant current I_s . It means that the drain current increases, the substrate current must decrease and the same on the contrary. The differential current comes from deflection current by Lorentz's force.

C. Magnetic Characteristic

The magnetic response is shown in Fig. 5. The constant current is biased at 1, 2 and 3 mA. The output is the differential current deviated from the initial condition that no magnetic field is applied. The response shows the linearly relation between magnetic field density and differential current. The relative sensitivities ($\Delta I/I \Delta B$) are 0.0072, 0.0168 and 0.02 T^{-1} at 1, 2 and 3 mA, respectively.

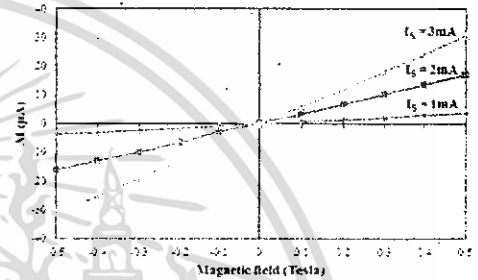


Fig. 5. Magnetic response characteristic of N-MOSFET

D. Simulation

The conditions for simulation are the same dimension and concentration as mention before. However, it is not the real device condition exactly because in the real fabrication process, some parameters during the process are varied. The preliminary simulation result wants to confirm the mechanism and the relation of magnetic field and response. Fig. 6 shows the magnetic responses of device at the current 1, 2 and 3 mA. They shows the linearly with the relative sensitivities are 0.0071 , 0.0152 and 0.02 T^{-1} at the current 1, 2 and 3mA, respectively.

The current density distribution is shown in Fig. 7. Fig. 7(a) is the case of no magnetic field. The initial condition is drain current greater than substrate current. When magnetic field is applied in y direction, the substrate current I_{sb} increases and channel drain current I_D decreases as shown in Fig. 7(b). On the other hand, when the magnetic field is applied in $-y$ direction, the current density of channel drain current I_D increases and substrate current I_{sb} decreases as shown in Fig. 7(c). The total current, drain current plus substrate current are kept constant ($I_D + I_{sb} = I_s$) all time.

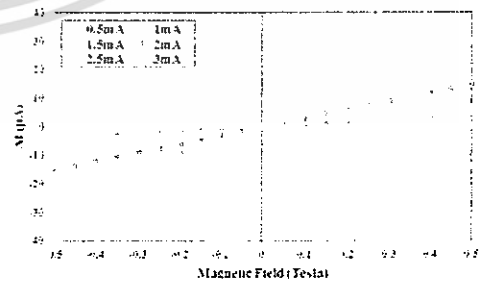


Fig. 6 Magnetic response characteristic of N-MOSFET by simulation



Fig. 7. Current density distribution of N-MOSFET by simulation.

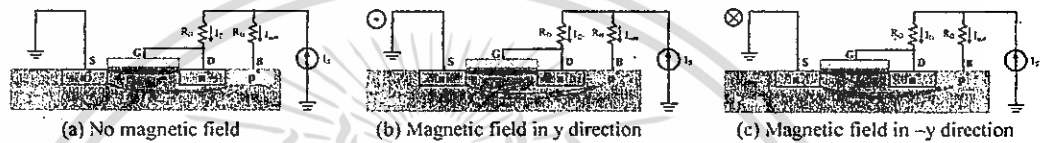


Fig. 8. Model of N-MOSFET for horizontal magnetic detection.

IV. DISCUSSION

From the measurement and simulation results, we introduce model for explanation. Fig. 8 shows the proposed model for device mechanism. Fig.8(a) is the device when no magnetic field is applied. The currents show in the figure is the electron current so the conventional currents are opposite direction. It is biased for drain current by source inject electron via channel to drain. The substrate current is biased by electron injection from source to substrate. Normally, the two currents should be adjusted equally but naturally they are some difference so there are some offset voltages between drain and body. In this study, we measure the current difference ΔI from the initial condition of no magnetic field. The constant current source is important for constant keeping the amount of current. It means that the increasing current of one side come from the another side. The drain and substrate current combination is constant all time.

Fig.8(b) is the device when magnetic field is applied in y direction. The magnetic field (B) crosses the conventional current in $-x$ direction and induces Lorentz's force in z direction. The electron from substrate current is force by Lorentz's force to upper surface. The electron substrate current deflects to the channel and drain current is increased by $\Delta I/2$. At the same time, the electron substrate current is reduced by $\Delta I/2$. The total differential current is ΔI . Increasing bias current (drain current and substrate current) and/or magnetic field density, the amount of deflected current is increased and differential current ΔI is also increased.

Fig.8(c) is the device when magnetic field is applied in-y direction. The magnetic field (B) crosses the conventional current in $-x$ direction and induces Lorentz's force in $-z$ direction. The electron current of drain current is forced by Lorentz's force lower to the bulk substrate. The electron drain current deflects to substrate and substrate current is increased by $\Delta I/2$. At the same time, the electron drain current is reduced by $\Delta I/2$. The total differentials current is ΔI . As before, increasing bias current (drain current and substrate current) and/or magnetic field density, the amount of deflected current is increased and differential current ΔI is also increased.

V. CONCLUSION

The application of MOSFET for magnetic field sensing is proposed. The structure is conventional MOSFET structure composes of drain, gate, source and substrate. The drain and substrate are in the same side of gate for the same current direction and source is in another side for carrier injection source. The device is current mode of operation biased by constant current source for two currents, drain and substrate currents. The drain current is the channel current of MOSFET and substrate current is from the p-n junction between substrate and source in forward direction. The mechanism is induced Lorentz's force from horizontal magnetic field deflects current between drain and substrate current which cause differential current ΔI related to magnetic field density and direction. The sensitivity depends on amount of bias current.

REFERENCES

- [1] Lenz and A. Edelstein, "Magnetic Sensors and Their Application", IEEE Sensors Journal, vol. 6 No 3, 2006, pp 631-649
- [2] S. M. Rezaul, "A novel 0.7 V high sensitivity complementary differential MAGFET sensor for contactless mechatronic application", Sensors and Actuators, A 161, 2010, pp. 138-149.
- [3] Z. Xiaofeng, W. Dianzhong, L. Meiwei, G Hanyu and I. Gang, Fabrication and characterization of the split-drain MAGFET based on the nano-polysilicon thin film transistor, J Semicond, Vol. 35, No 9, 2014
- [4] E. Yesry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk "Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol 3, No 4, 2009.
- [5] J. Marek, D. Donoval, M. Donoval, M. Daricek "Analysis of Novel MagFET Structures for Built-in Current Sensors Supported by 3D Modeling and Simulation" ASDAM 2008, The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor 315 Devices and Microsystems, October 12-16, 2008, Smolenice Castle, Slovakia
- [6] R. Nakachai, T. Phetchakul, S. Poonosawat and A. Poyai "Simulation of MOSFET as Horizontal Magnetic MOSFET (MAGFET)", 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies ICFS1, April 14-16, 2017, Shenzhen, China.
- [7] TCAD Sentaurus Manual, synopsis 8, version D-2016-03





แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2559.....

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน) แบบปกติ แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ)ภาษาไทย เซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟต

ภาษาอังกฤษ MOSFET Structure for Magnetic sensor.....

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล.....

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2558..... ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ.2559.....

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี..... เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2558..... ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ.2559.....

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1..... 361,250 บาท..... 85..... % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป).....

งวดที่ 2..... 63,750 บาท..... 15..... % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป).....

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้บังคับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย (

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย)บาท(คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	100,000	100,000	-
ค่าวัสดุ	325,000	325,000	-
ค่าสาธารณูปโภค	-	-	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
รวม	425,000	425,000	-

(รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

.....

.....

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

.....

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศบ.	อิเล็กทรอนิกส์	สจล.	2532
วศม.	ไฟฟ้า	สจล.	2535
D. ENG	Solid State Device	Tokai University	2541

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ QCM

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2559	รางวัลผลงานวิจัยดีมาก	สำนักคณะกรรมการอุดมศึกษา

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2536	ทุนค่างานวิจัย	JSPS
2538	ทุนศึกษาปริญญาเอก	ทุนทบวงมหาวิทยาลัย
2542	ทุนโครงการร่วมมือไทย ญี่ปุ่น	JICA
2558	ทุนวิจัย	สกอ.
2559	ทุนวิจัย	วช.

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Pavaris Phuvanatai, Toempong Phetchakul, "Quartz Crystal Microbalance coated with 18-crown-6 ether film for 2, 4,6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection", Key Engineering Material, Vol. 748, pp. 358-362, 2017.
2. Toempong Phetchakul1,a) and Pavaris Phuvanata, "A Study on 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT)

Vapor Detection by Using a Quartz Crystal Microbalance with 18-crown-6 Ether Film” , AIP conference Proceedings, Vol. 1858, p. 020004, 2017.

3. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai. “A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination-deflection” *Microelectronics Journal*, 40 (2014) 565-573.
4. Weera Pengchan, Toempong Phetchakul, Amporn Poyai. “The local generation and recombination lifetime based on forward diode characteristics diagnostics” *Journal of Crystal Growth*, Volume 362, 1 January 2013, Pages 300-303
5. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai. “Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Deflection Effect” *IEEE Sensors Journal*, Vol. 10, No. 2, 2010.
6. T. Phetchakul, C. Sutthinet. “Monitoring of Draft Beer Fermentation Process by Electronic Nose” *Advanced Materials Research*, Vol. 911 (2014), pp. 297-301.
7. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai. “Defect Distribution and Yield Analysis Technique on Silicon Wafer” *Advanced Material Research*, Vol. 911, pp. 271-275, 2014
8. Toempong Phetchakul, Prateep Taisettavatkul, Wittawat Yamwong and Amporn Poyai. “Split-current Magnetoresistor” *Advanced Materials Research*, Vol. 739 (2013), pp. 489-492
9. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, C. Leepattarapongpan, E. Chaowicharat, P. Pengpad and A. Poyai. “The Study of p-n and Schottky Junction for Magnetodiode” *Advanced Materials Research*, Vol. 378-379, 2012
10. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai. “Improved extraction of the local carrier generation lifetime from forward diode characteristics” *Advanced Material Research*, Vol. 378-379, 2012

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Toempong Phetchakul, Sawatdipong Poonsawat, Amporn Poyai, “Effect of Substrate Depth to 5-Contact Vertical Hall”, 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2017), Phuket, Thailand, June 27-30, 2017.
2. Rattapong Nakachai, Toempong Phetchakul, Sawatdipong Poonsawat, Amporn Poyai “Simulation of MOSFET as Horizontal Magnetic MOSFET (MAGFET)”, Shenzhen, China, April 14-16, 2017.
3. Pavaris Phuvanatai, Toempong Phetchakul, “A Using of Quartz Crystal Microbalance for 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection”, 3rd Asean conference of defence technology (3rd ACDT), Phuket, Thailand, January 18-20, 2017.

4. Watcharapong Kongjaroon, Toempong Phetchakul, "Electronic Target by Using Luminescence Film", 3rd Asean conference of defence technology (3rd ACDT), Phuket, Thailand, January 18-20, 2017.
5. T. Phetchakul, C. Sutthinet. "Monitoring of Draft Beer Fermentation Process by Electronic Nose". *Advanced Materials Research*. Vol. 911 (2014) pp.297-301.
6. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai. "Defect Distribution and Yield Analysis Technique on Silicon Wafer". *Advanced Material Research*. Vol. 911, pp. 271-275, 2014.
7. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpan and A. Poyai. "A Simulation of 3-Axis Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Reflection Effect". *The 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2014*, 14-17 May, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.
8. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai. "Yield Analysis by Poisson Yield Model based on the Defect Analysis with Derivative Method". *The 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2014*, 14-17 May, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.
9. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpan and A. Poyai. "Mechanism of Merged Magnetotransistor". *The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)*, 11-13 December, Kanchanaburi, Thailand, 2013.
10. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai. "Defect Distribution Analysis by Derivative Technique for P-N Junction". *The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)*, 11-13 December, Kanchanaburi, Thailand, 2013.
11. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and Amporn Poyai. "Contributing Parameters for Magnetoresistance Effect of The New Design on Hall Plate Structure". *10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2013*, 15-17 May 2013, Krabi, Thailand.
12. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai. "The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure". *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2012*, 16-18 May 2012, Phetchaburi, Thailand.
13. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai. "The Mechanism of Dual Schottky Magnetodiode". *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2012*, 16-18 May 2012, Phetchaburi, Thailand.
14. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai. "The Study of Forward and Reverse Schottky Junction for Dual Magnetodiode". *7th IEEE International Conference on Nano/Micro*

- Engineered and Molecular System, IEEE-NEMS 2012, 5-8 March, Kyoto, Japan.
15. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and A. Poyai, "A Simulation of Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure". The 7th Annual Conference of Thai Physics Society, Siam Physic Congress 2012, 9-12 May 2012, Pra Nakon Si Ayutthaya, Thailand.
16. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "Non-uniform Defects Assessment by I-V and C-V characteristics of p-n junction". ICDS 2011, The 26th International Conference on Defects in Semiconductor, 17 - 22 July, Nelson, New Zealand, 2011.
17. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun and A. Poyai, "The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor". Proc. Eurosensors XXV, September 4-7, Athens, Greece, 2011.
18. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "The Local Generation and Recombination Lifetime based on Forward Diode Characteristics Diagnostics". ICMAT 2011, The 6th International Conference on Material for Advanced Technologies, 26 June -1 July, Singapore, 2011.
19. T. Phetchakul, P. Sottip, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun, and A. Poyai, "The Deflection Length and Emitter Width on Sensitivity of Magnetotransistor". IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
20. T. Phetchakul, A. Sangnual, and C. Sutthinet, "Investigation on Temperature Effect on Alcohol Sensing of Multi-Walled Carbon Nanotube". IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
21. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "The Defects Analysis in CMOS Fabrication by Arrhenius Activation Energy Technique". IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

1. ต้นแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์
2. ต้นแบบแมกนีโตไดโอด
3. ต้นแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามแกน
4. ต้นแบบเซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบ MSM