

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แมกนีโตรีซิสเตอร์

MAGNETORESISTOR



โดย
นายชายิ่ง แซ่ย่าง
นายนฤพล เชียงนิคม
นางสาวจิครานุช จันทวิมล

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

๔/๗
๕/๑๕/๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....103105
วัน,เดือน,ปี..... 2 8 ส.ค. 2552

b..... 12136281
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโตรีซิสเตอร์

MAGNETORESISTOR



ปริญญานิพนธ์สำหรับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แมกนีโตรีซิสเตอร์

ผู้จัดทำ

นายณฤพล เชียงนิชม รหัสประจำตัว 48015167

นางสาวจิตรานุช จันทวิมล รหัสประจำตัว 49015142

นายชิง แซ่ย่าง รหัสประจำตัว 49015245



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีไตรีซิสเตอร์

นาย นฤพล เชียงมูล รหัส 48015167

นางสาวจิตรานุช จันทวิมล รหัส 49015142

นาย ยิ่ง แซ่อย่าง รหัส 49015245

รศ.ดร.เดิมนพษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

โครงการนี้ทำการเสนอกระบวนการสร้างและออกแบบแมกนีไตรีซิสเตอร์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยจะสร้างแมกนีไตรีซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานค่ออนุกรมกันหลายๆตัว โดยใช้แผ่นซิลิคอนระนาบ (100) เป็นฐานรอง สร้างชั้นฉนวนด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) จากนั้นใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) เพื่อเลือกบริเวณที่ต้องการแพร่สารเจือแล้วสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีความหนาแน่น อะตอมสารเจือสูง โดยกระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion) โบรอนลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอน จากนั้นสร้างขั้วโลหะด้วยออลูมิเนียมโดยกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization) แล้วนำแมกนีไตรีซิสเตอร์ที่ได้มาทดลองวัดค่าความต้านทาน จากนั้นนำแมกนีไตรีซิสเตอร์ไปวัดผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก พบว่าแมกนีไตรีซิสเตอร์ที่สร้างขึ้น สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ แต่ผลที่ได้จะออกมาเป็นในรูปของพล็อต เนื่องจากค่าแรงดันฮอลล์มีค่ามากกว่าแรงลอเรนซ์ จึงทำให้พาหะที่ถูกแรงลอเรนซ์กระทำทำให้เบี่ยงเบนนั้น ถูกสนามไฟฟ้าจากแรงดันฮอลล์ดึงกลับ ทำให้กระแสที่เบี่ยงเบนไปนั้นกลับมามีเป็นเส้นตรง ส่งผลให้ค่าความต้านทานที่ได้ไม่สามารถคงค่าเป็นค่าคงที่ได้ แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETORESISTOR

Mr. Naruthol Chiengniyom ID. 48015167

Miss. Jitranuch Jantavimon ID.49015142

Mr. Ying Saeyang ID.49015245

Assoc.Prof. Toempong Phetchakul Advisor

Education Year 2008

ABSTRACT

This project presents the fabrication process and design of magnetoresistors for magnetic detector application. The device operation is based on Hall Effect principle. They use the Hall current mode for current deflection. The aspect ratios $\left(\frac{W}{L}\right)$ are designed more than one. The devices are fabricated by starting with n-silicon (100) substrate by photolithography, diffusion, metallization process, we can receive magnetoresistor.

Then the magnetic characteristics are measured. It confirms that the device can detect the magnetic field in pulse mode of response.

The mechanism is that the Hall electric field is induced for balancing Lorentz's force carriers can not keep the deflection current.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล ในการวางแผนแนวทางการดำเนินงานวิจัยและช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนการให้ความรู้ในทุกๆด้านจนทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณ คุณวีระ เพ็งจันทร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโทวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจตลอดปีการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ จนสามารถทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	2
2.1 ทฤษฎีสถนามแม่เหล็ก.....	2
2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect).....	5
2.2.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์.....	5
2.2.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	10
2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์.....	14
2.3.1 แมกนีโตไดโอด.....	14
2.3.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	15
2.3.3 แมกนีโตรีซิสเตอร์.....	19
2.4 เซ็นเซอร์แม่เหล็ก.....	21
2.4.1 ทฤษฎีเซ็นเซอร์แม่เหล็ก.....	21
2.4.1.1 Physical Magnetoresistance	23
2.4.1.2 Geometrical Magnetoresistance Effect.....	24
2.4.1.3 GMR (Giant Magnetoresistance).....	26
2.4.1.4 Spin-Dependent Magnetoresistance.....	28
2.5 คุณสมบัติต่างๆ ไปของอุปกรณ์เซนเซอร์.....	29
บทที่ 3 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์.....	33
3.1 กระบวนการทำความสะอาด.....	34
3.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process).....	34
3.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation).....	35

IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)	37
3.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	39
3.3.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์	40
3.3.2 การเคลือบสารไวแสง.....	41
3.3.3 การอบขึ้น Solfbake	42
3.3.4 การปรับชั้นมาสก์	42
3.3.5 การฉายแสง	42
3.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง	43
3.3.7 การอบขึ้น Hardbake	43
3.3.8 การกัด (Etching)	43
3.3.9 การลอกน้ำยาไวแสง	44
3.4 กระบวนการแพร่สารเจือ (Deposition).....	44
3.5 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Meltalztion Process).....	44
3.6 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์.....	48
3.7 การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	50
3.8 กระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์.....	51
3.8.1 กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process).....	51
3.8.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process).....	52
3.8.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithograpy Process) มาร์คที่ 1.....	52
3.8.4 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion Process).....	54
3.8.5 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithograpy Process) มาร์คที่ 2.....	55
3.8.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Meltalztion Process).....	57
3.8.7 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithograpy Process) มาร์คที่ 3.....	57
บทที่ 4 การทดลอง และ ผลการทดลอง.....	60
4.1 การวัดคุณสมบัติของแมกนีโตรีซิสเตอร์.....	61
4.5 การวัดผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของแมกนีโตรีซิสเตอร์.....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก ก.....	70



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ.....	2
รูปที่ 2.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	4
รูปที่ 2.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	5
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์ กับปริมาณการไหลในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก.....	7
รูปที่ 2.5 ด้านตัดขวาง โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	10
รูปที่ 2.6 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง.....	12
รูปที่ 2.7 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง.....	12
รูปที่ 2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง.....	13
รูปที่ 2.10 โครงสร้างด้านตัดขวางของเมกนีโตไดโอด.....	14
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS.....	15
รูปที่ 2.12 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง.....	16
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน.....	18
รูปที่ 2.14 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$	19
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเมกนีโตริซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม.....	20
รูปที่ 2.16 ภาพจำลองแบบแสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์และแรงดันฮอลล์.....	21
รูปที่ 2.17 ภาพจำลองการเคลื่อนที่ของพาหะในแท่งสารกึ่งตัวนำ.....	22
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของ Physical Magnetoresistance.....	23
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของ Geometrical Magnetoresistance Effect.....	24
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการออกแบบอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของ Geometrical Magnetoresistance Effect. (a) การใช้ตัวต้านทานต่อแบบอนุกรม (b) การใช้โครงสร้างแบบวงกลม.....	25
รูปที่ 2.21 แสดงการเบี่ยงเบนของกระแสที่ได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก.....	26
รูปที่ 2.22 ตัวอย่างกราฟ GMR แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับค่าความต้านทาน ของวัสดุอัลลอยด์.....	27
รูปที่ 2.23 แสดงวงจรไฟฟ้าเสมือน เพื่ออธิบายการลดลงของความต้านทานในสนามแม่เหล็ก.....	28

VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.24 (ก) แมกเนโตเซชันของอนุภาคเฟอร์โรเรียงตัวแบบคู่ ในสภาวะปกติ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำแมกเนโตเซชัน ของสารแม่เหล็กจะขึ้นทิศทางเดียวกัน ทำให้ความต้านทานโครงสร้างลดลง.....	29
รูปที่ 2.23 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ.....	30
รูปที่ 2.24 ฮิสเตอร์รีซิสติวิตีของเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม.....	31
รูปที่ 3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	33
รูปที่ 3.2 การประยุกต์ใช้งานซิลิคอน ไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ.....	35
รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไดอิเล็กทริก.....	36
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	36
รูปที่ 3.5 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง.....	37
รูปที่ 3.6 การเกิดซิลิคอน ไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน.....	37
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	38
รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process.....	40
รูปที่ 3.7 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน.....	45
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค.....	45
รูปที่ 3.9 ความหนาของชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส.....	46
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator.....	47
รูปที่ 3.11 รูปโครงสร้างมุมมองด้านบนของแมกนีโตรีซิสเตอร์.....	48
รูปที่ 3.12 รูปโครงสร้างภาคตัดขวางของแมกนีโตรีซิสเตอร์.....	48
รูปที่ 3.13 มาร์คที่ 1 : P ⁺	50
รูปที่ 3.14 มาร์คที่ 2 : Contact Windows Mask.....	51
รูปที่ 3.15 มาร์คที่ 3 : Aluminum Mask.....	51
รูปที่ 3.16 แผ่นฐานรองซิลิคอน ชนิดเอ็น หนา 100.....	52
รูปที่ 3.17 ชั้นออกไซด์บนแผ่นฐานรองซิลิคอน.....	52

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.18 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอน	53
รูปที่ 3.19 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 1.....	53
รูปที่ 3.20 แผ่นซิลิกอนที่ผ่านการ Etching แล้ว.....	54
รูปที่ 3.21 แผ่นซิลิกอนเมื่อทำการล้างน้ำยาไวแสง AZ1350 ออกแล้ว.....	54
รูปที่ 3.22 แผ่นซิลิกอนที่ทำการ Drive in แล้ว.....	55
รูปที่ 3.23 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอน เพื่อทำการ โฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 2.....	55
รูปที่ 3.24 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 2.....	56
รูปที่ 3.25 แผ่นซิลิกอนที่ผ่านการ โฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 2.....	56
รูปที่ 3.26 แผ่นซิลิกอนเมื่อทำการล้างน้ำยาไวแสง AZ1350 ออกแล้ว.....	57
รูปที่ 3.27 แผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเคลือบอคูมิเนียมแล้ว.....	57
รูปที่ 3.28 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 3.....	58
รูปที่ 3.29 แผ่นซิลิกอนที่ทำการ สกัดชั้นอคูมิเนียมแล้ว.....	59
รูปที่ 3.30 แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	59
รูปที่ 4.1 แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	60
รูปที่ 4.2 โครงสร้างภายในของแมกนีโตรีซิสเตอร์ โดยการถ่ายภาพอย่างละเอียด.....	61
รูปที่ 4.3 แสดงการวัดแมกนีโตรีซิสเตอร์.....	61
รูปที่ 4.4 แสดงรูปของแมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ทำการต่อขั้ว Contact 11แล้ว(Packaging).....	62
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของแมกนีโตรีซิสเตอร์ขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ค่าความต้านทาน 2.85 กิโลโอห์ม.....	63
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของแมกนีโตรีซิสเตอร์ขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ค่าความต้านทาน 5.26 กิโลโอห์ม.....	64
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรีซิสเตอร์ขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ค่าความต้านทาน 5.26 กิโลโอห์ม.....	64

IX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 รูปการวัดผลการตอบสนองต่อความชื้นสนามแม่เหล็กของแมกนีโตริซิสเตอร์.....	65
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อความชื้นสนามแม่เหล็ก ของแมกนีโตริซิสเตอร์ที่ค่าความต้านทาน 3.45 K Ω ที่ความชื้นของสนามแม่เหล็ก 1500 เกาส์ ,3000 เกาส์ และ 4500 เกาส์ ตามลำดับ.....	66
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อความชื้นสนามแม่เหล็ก ของแมกนีโตริซิสเตอร์ที่ค่าความต้านทาน 8.6 K Ω ที่ความชื้นของสนามแม่เหล็ก 1500 เกาส์ ,3000 เกาส์ และ 4500 เกาส์ ตามลำดับ.....	66
รูปที่ 4.12 รูปโครงสร้างของแมกนีโตริซิสเตอร์เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (ก) รูปภาคตัดขวางของแมกนีโตริซิสเตอร์ (ข) รูปด้านบนของแมกนีโตริซิสเตอร์.....	67
รูปที่ 5.1 แนวทางการแก้ไข.....	68
รูปที่ 5.2 การออกแบบแมกนีโตริซิสเตอร์ที่สามารถให้ค่าความต้านทานคงที่.....	69

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ.....	3
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ.....	32
ตารางที่ 3.1 แสดง Class ต่าง ๆ ของห้องสะอาด.....	39



บทที่ 1

บทนำ

บทนำ

สนามแม่เหล็กเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่รอบๆตัวเรา ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้สองทาง คือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ที่พื้นผิวของดวงอาทิตย์ซึ่งจะผลิตเส้นแรงแม่เหล็กประมาณ 600 A/m หรือ เกิดจากกระแสเล็กๆที่วิ่งในสมอง หัวใจ และกล้ามเนื้อ ของมนุษย์ โดยจะผลิตเส้นแรงแม่เหล็กประมาณ 0.01 A/m ส่วนอีกทางหนึ่ง คือ เกิดจากเครื่องมือที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น สายเคเบิล หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ลวดตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เราสามารถตรวจจับได้ด้วยตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก หรือ เซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor) โดยเซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor) สามารถสร้างได้จากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหลายชนิด เช่น ไดโอด (Diode), มอสเฟต (Mosfet), ทรานซิสเตอร์ (Transistor), ตัวต้านทาน (Resistor) เป็นต้น

ตัวต้านทาน (Resistor) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่น่าสนใจสร้างเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะอาศัยปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของวัสดุ มีค่าเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กภายนอก (Magnetoresistance) โดยแรงลอเรนซ์จะกระทำกับประจุพาหะ ทำให้ประจุพาหะเคลื่อนที่เลี้ยวเบนในชั้นสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้กระแสเบี่ยงเบนไป ด้วย เป็นผลให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานเปลี่ยนแปลง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติและ โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์
3. ศึกษาการออกแบบและสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์เพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
4. ศึกษาและทำความเข้าใจขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์

ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติ โครงสร้าง วิธีการออกแบบและขั้นตอนของกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ เพื่อนำความรู้และความเข้าใจนี้ ไปสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กต่อไป

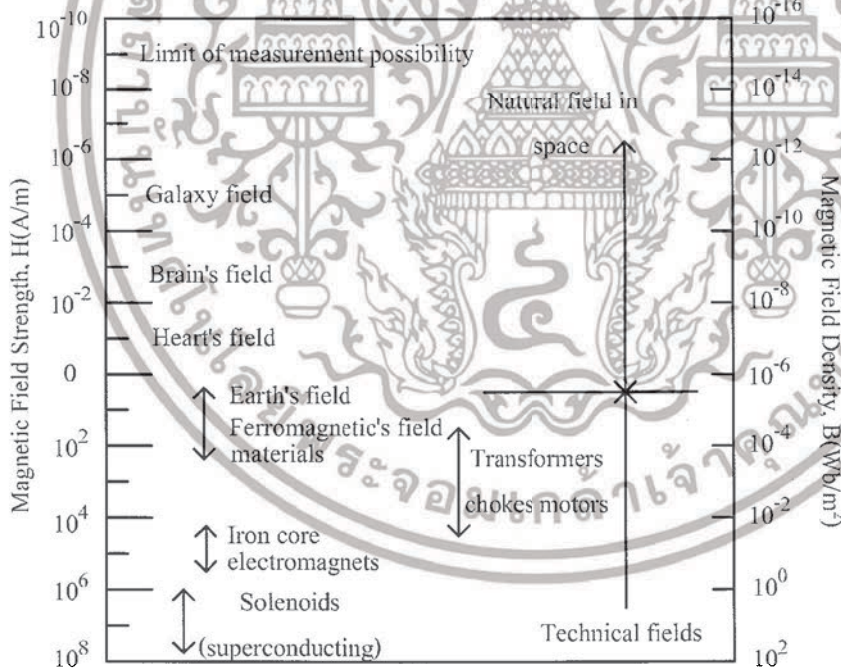
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

2.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก

โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ เช่น บริเวณพื้นผิวของดวงอาทิตย์ซึ่งมีสนามแม่เหล็กประมาณ 600 A/m หรือ ร่างกายของมนุษย์บริเวณกล้ามเนื้อซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ $2 \times 10^{-5} \text{ A/m}$ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบร่างกายของมนุษย์ ยกตัวอย่าง เช่น สมองของมนุษย์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเวียนในระดับไมโคร หัวใจ และเส้นเอ็นกล้ามเนื้อซึ่งจะมีสนามแม่เหล็กประมาณ 10^{-2} A/m อยู่ในร่างกายมนุษย์ ในรูปที่ 2.1 แสดงระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 10^{-9} A/m จนถึง 10^8 A/m โดยสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูงสามารถสามารถเกิดได้จาก สายส่งสัญญาณ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก และขดลวดสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด



รูปที่ 2.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ

ความเข้มสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (H) แสดงหน่วยเป็น แอมแปร์/เมตร (A/m) โดยที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) มีหน่วยเป็น เทสตา (T) ซึ่งนิยามของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B คือเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) 1 เวเบอร์ ตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ 1 ตารางเมตร ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ในวัสดุจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยแสดงได้โดย

$$B = \mu^B H = \mu_0^B \mu_r^B H$$

โดย μ^B คือค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุซึ่งค่าซึมซาบแม่เหล็กในอวกาศ μ_0^B จะมีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ และค่าซึมซาบแบบสัมพัทธ์ μ_r^B จะมีค่าประมาณ $\mu_r^B \gg 1$ ในวัสดุที่ค่าซึมซาบระดับสูงแต่อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจะใช้ค่าซึมซาบระดับต่ำ คือ ประมาณ $\mu_r^B \cong 1$

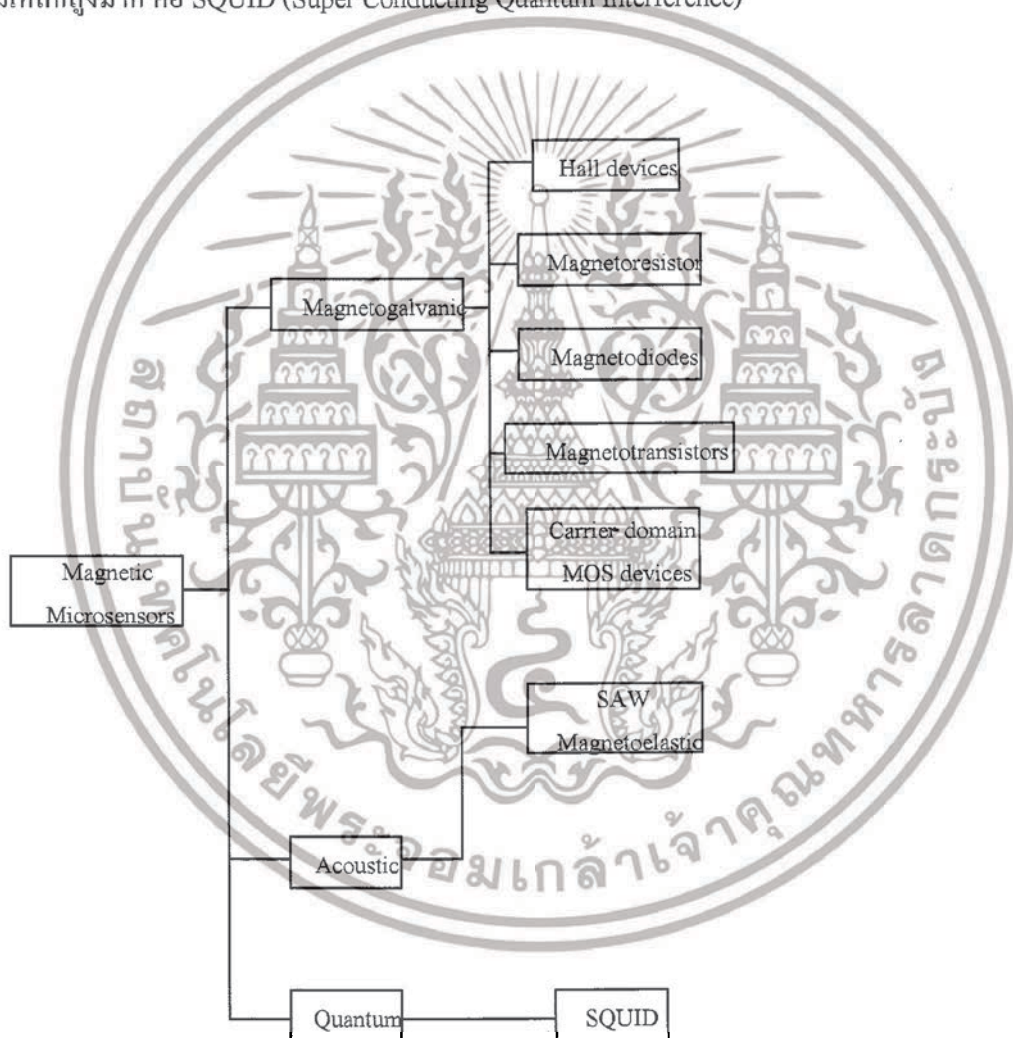
การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็ก, การพัฒนาวัสดุแม่เหล็กและการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดต่างๆ แสดงได้ในตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กเริ่มจาก Joule ซึ่งค้นพบในปี 1842 จนถึง Josephson ที่ค้นพบในปี 1962 ซึ่งการค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆสามารถประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้อย่างหลากหลาย

ตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ

Year	Effect	Description	Application
1842	Joule	Magnetostriction-change in of ferromagnet with magnetisation.	Acoustic delay line magnetometers.
1846	-	Change in Young's modulus with magnetisation.	Acoustic delay line magnetometers.
1847	Matteucci	Torsion of a ferromagnetic rod changes magnetisation.	Magnetoelastic sensor.
1856	Thomson	Change in electrical resistance with magnetic field.	Magneto resistive sensors.
1858	Wiedemann	A Torsion is created by a current carrying ferromagnetic rod when subjected to a longitudinal field	Torque and force measurement
1865	Villari	Magnetization effected by tensile or compressive strength.	Magnetoelastic sensors.
1879	Hall	Transverse voltage created across current-carrying crystal by magnetic field.	Magnetogalvanic sensors.
1903	Skin	Displacement of current to surface due to eddy current.	Position sensors. (distance, proximity)
1931	Sixtus Tonks	Pulse magnetisation by large Barkhausen jumps.	Wiegand and pulse-Wire sensors.
1962	Josephson	Quantum mechanical tunnelling effect between two superconducting layers.	Position sensors SQUID magnetometers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจัดเป็นอุปกรณ์ชนิดไมโครเซนเซอร์ โดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการเกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน รูปที่ 2.2 แสดงการจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยจะจำแนกตามหลักการพื้นฐานของแต่ละอุปกรณ์ชนิดของอุปกรณ์ และชนิดของสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งชนิดที่ใช้ฟิล์มที่บางและหนาของเซนเซอร์ SAW (Surface Acoustic Wave) นอกจากนี้แสดงถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีหลักการแตกต่างกันชนิดอื่นและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กขนาดเล็กได้โดยมีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงมาก คือ SQUID (Super Conducting Quantum Interference)



รูปที่ 2.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

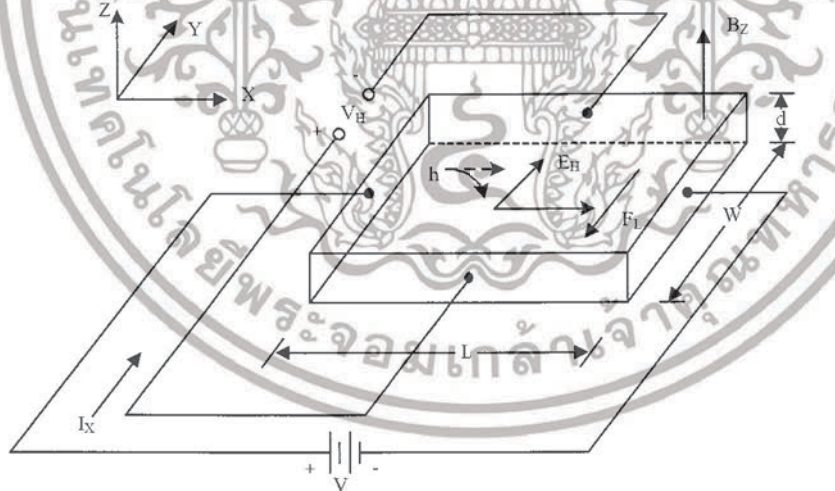
2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์

2.2.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิด โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้น สามารถอธิบายการทำงานจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มีแรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (Charge carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ ทำให้สามารถวัด และคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ได้อีกด้วย

แท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูปที่ 2.3 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความต่างศักย์ V โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (Current density) J_x ไหลในทิศ $+x$ และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (Flux density) B_z ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ $+z$



รูปที่ 2.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง $+x$ จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟท์ (Drift velocity) V_x ในทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+x และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสจะเกิดมีแรงลอเรนซ์ กระทำต่อโฮล ด้วยสมการ

$$\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

โดยที่ \vec{F}_L คือ แรงลอเรนซ์ ที่มีขนาดเป็น

$$|\vec{F}_L| = F_L = e \cdot v_x \cdot B_z \quad (2.2)$$

และมีทิศทางในแกน $-y$ ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาในแกน $-y$ และจะสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน E_H ในทิศ $+y$ ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ (F_L) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน (eE_H) นั้นมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$eE_H = F_L = e \cdot v_x \cdot B_z \quad (2.3)$$

$$E_H = v_x \cdot B_z \quad (2.4)$$

จาก

$$J_x = p \cdot e \cdot v_x$$

หรือ

$$v_x = \frac{J_x}{p \cdot e}$$

แทนค่า v_x ลงในสมการ (2.4) จะได้

$$E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e}$$

จะได้

$$\frac{E_H}{J_x \cdot B_z} = \frac{1}{p \cdot e} = R_H \quad (2.5)$$

โดย R_H คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกอนชนิดอินทรีนซิคซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการ โด๊ปสารระดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ ซึ่งเป็นผลให้ค่าแรงดันฮอลล์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยตั้งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้การ โด๊ปสารระดับต่ำ สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการ โด๊ปในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการ โด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค

จากรูปที่ 2.4 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ w จะได้

$$V_H = E_H \cdot w \quad (2.6)$$

โดย V_H คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่า $J_x = \frac{I}{w \cdot d}$ และ $E_H = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการ (2.6) จะได้

$$R_H = \frac{V_H}{w \cdot I \cdot B_z} \cdot w \cdot d$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H = \frac{d \cdot V_H}{I \cdot B_z} = \frac{1}{p \cdot e} \quad (2.7)$$

หรือ

$$V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d} \quad (2.8)$$

ความหนาของโฮล คือ

$$p = \frac{1}{e \cdot R_H} = \frac{I \cdot B_z}{e \cdot d \cdot V_H} \quad (2.9)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \frac{w \cdot d}{L} = \frac{V}{I} \frac{w \cdot d}{L} \quad (2.10)$$

จาก

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e \cdot p \cdot \mu_p}$$

ดังนั้นจะได้

$$\mu_p = \frac{1}{e \cdot p \cdot \rho} = \frac{1}{\rho} R_H \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.3), (2.10) และ (2.11) จะเห็นว่ากราฟทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะ ได้เป็นอย่างดี

ในการทำงานเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น แรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ มีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ R_H แสดงดังนี้

$$R_H = -\frac{1}{n \cdot e} \quad (2.12)$$

ดังนั้นโดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (Sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแส และสนามแม่เหล็กจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H \cdot G}{d} = \frac{G \cdot r_H}{q \cdot n \cdot d} \quad (2.13)$$

จะเห็นว่า ค่าความไว ที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำ และฮอลล์เฟลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ E_H และ E_x ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม θ_H กับแกน +x ดังรูป ซึ่งมุม θ_H ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta_H = \frac{E_H}{E_x}$$

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

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

หรือ

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

จะได้

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

$$\mu_p = \sigma \cdot R_H$$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ R_H สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{H1} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (2.14)$$

และ

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

หรือ

$$\mu_H = \frac{\tan \theta_H}{B_z} = \frac{3\pi}{8} \mu_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_{Hi} = \mu_H = 1.18\mu_p \quad (2.15)$$

โดย μ_H คือ สภาพความคล่องตัวของโฮลล์ (Hall mobility) และ μ_H คือสภาพความคล่องตัวของโฮลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์โฮลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ R_H แสดงได้ดังสมการที่ 2.16

$$R_{Hi} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93R_H \quad (2.16)$$

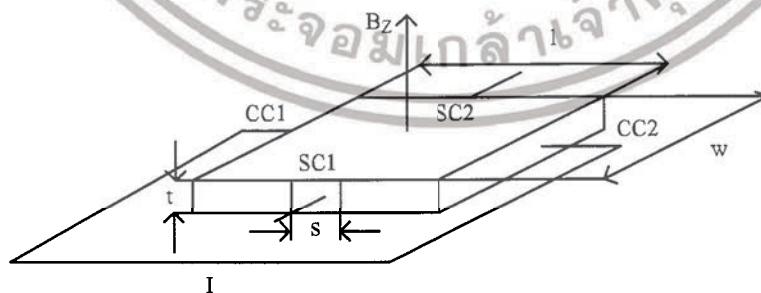
และ

$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93\mu_p \quad (2.17)$$

โดย μ_H คือ สภาพความคล่องตัวของโฮลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

2.2.2 โครงสร้างอุปกรณ์โฮลล์

อุปกรณ์โฮลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีโฮลล์ (Hall Effect) โครงสร้างอุปกรณ์โฮลล์แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์โฮลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนาที่บาง โครงสร้างประกอบด้วย 4 ขั้วใช้งานคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 ซึ่งแรงดันโฮลล์ (V_H) ถูกวัดที่ขั้ว SC1 และ SC2 โดยที่การไบอัสกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC1 และ CC2 แรงดันโฮลล์สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.18



รูปที่ 2.5 ด้านตัดขวาง โครงสร้างอุปกรณ์โฮลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = \frac{R_H}{t} \cdot G \left(\frac{l}{w}, \frac{s}{w}, \frac{y}{l}, \theta_H \right) \cdot B_z \cdot I \quad (2.18)$$

โดยที่ R_H คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์, G คือพารามิเตอร์โครงสร้าง, t คือ ความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์, B_z คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง, s คือ ความกว้างของขั้วเซนเซอร์คอนแทค (SC), w คือ ความกว้างของอุปกรณ์และ l คือความยาวของอุปกรณ์ฮอลล์

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาพฤติกรรมของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ($n \gg p$) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot t} \cdot G \cdot B_z \cdot I \quad (2.19)$$

โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (Scattering parameter)

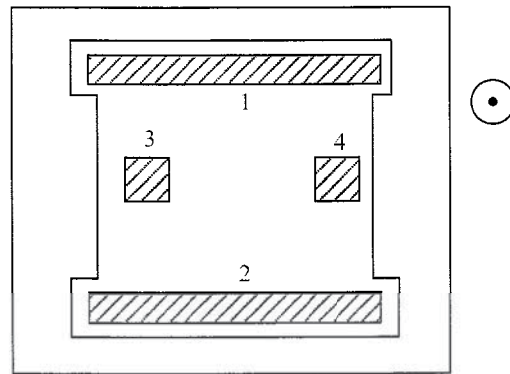
จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณดังสมการที่ 2.20

$$G = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.20)$$

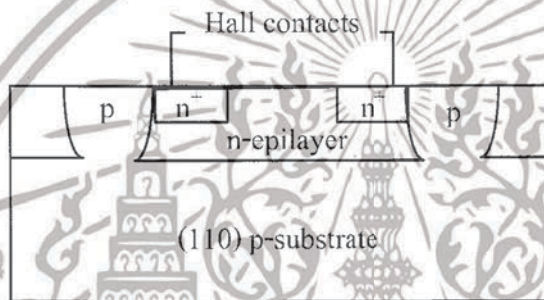
โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดค่าให้ค่า $G=1$ ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้ $l/w = 3$ และ $s/w < 1$ โดย ตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์คอนแทคจะออกแบบที่ระยะ $1/2$

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคืออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน โดยรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงด้านบนและด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งชนิดเอ็น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาชั้นอิพิทาเซียล $5 - 10 \text{ um}$ โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ $200 \times 200 \text{ um}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิทาเซียลสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการอิมพลานท์ (Lion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

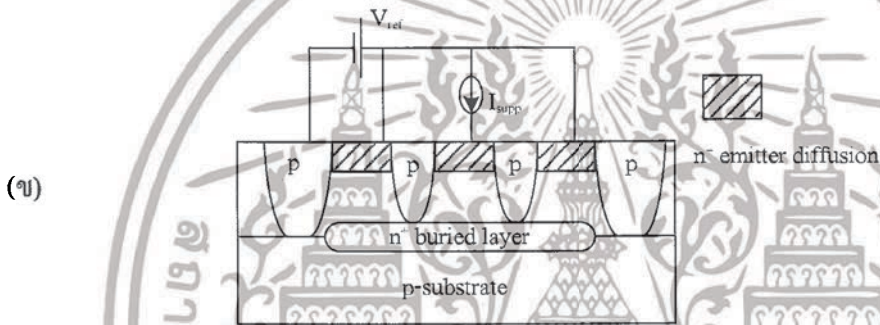
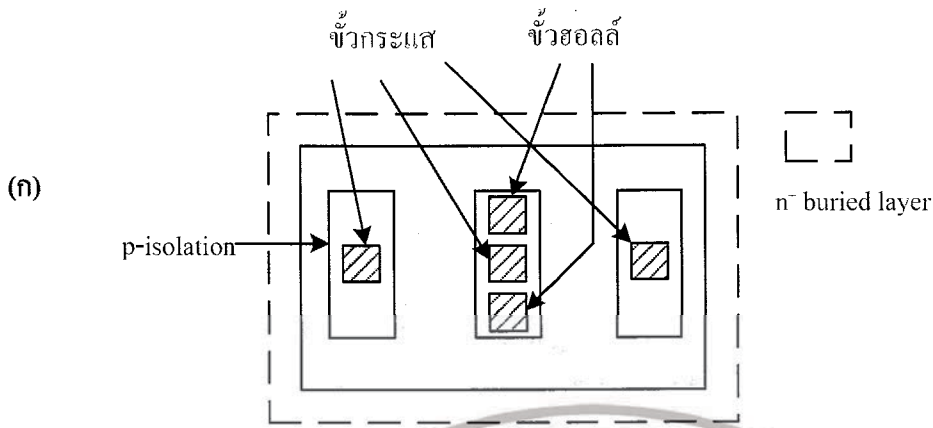


รูปที่ 2.7 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

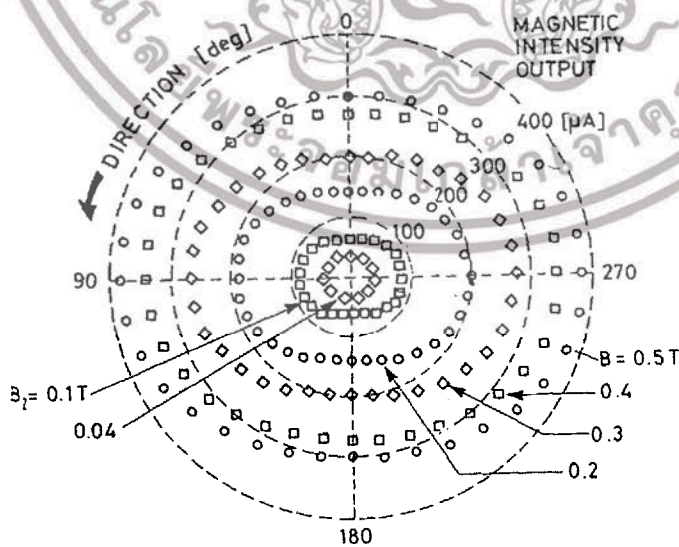
อุปกรณ์ฮอลล์นี้ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนก็ได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวอน แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}$ ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กประมาณ 41 V/AT โดยมีระดับสัญญาณรบกวน $1 \times 10^{-5} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ ที่ 40 Hz

อุปกรณ์ฮอลล์ชนิดแนวตั้งและแนวอนสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้าง CMOS เช่น อุปกรณ์ฮอลล์สามมิติแบบเข็มทิศแม่เหล็กสามารถสร้างได้ในระดับ $2 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 2.9 สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามทิศทาง (B_x, B_y, B_z) โดยการวัดอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะในมุมเบี่ยงเบนต่างๆซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ ข้อดีของอุปกรณ์ฮอลล์นี้คือมีชั้นเลขอร์ที่บางมากประมาณ 100 \AA ทำให้มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงประมาณ $500 - 1,000 \text{ V/AT}$ แต่มีข้อเสียคือจะมีค่าสภาพความคล่องที่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แกวอนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง



รูปที่ 2.9 เอ้าท์พุทของเข็มทิศแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

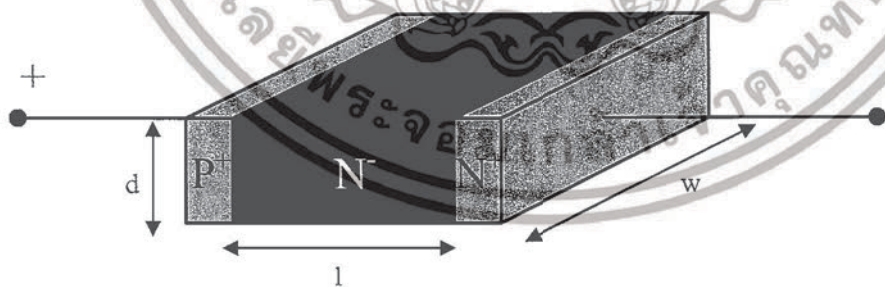
2.3 อุปกรณ์ที่ใช้หลักการ ปรากฏการณ์ฮอลล์

2.3.1 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่สามแสดงดังรูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดโดยมีมิติความยาว ความกว้าง และความสูง ($l \times w \times d$) อาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะระหว่างสองรอยต่อ อันเป็นผลเนื่องมาจากแมกนีโตคอนเซนเตรชัน (Magneto concentration effect) โดยพาหะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (Recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของแมกนีโตไดโอดอีกด้วย โดยการใช้ $\text{Si-Al}_2\text{-O}_2$ และ Si-SiO_2 ที่พื้นผิว เรียกว่า SOS (Silicon-On-Sapphire) ดังแสดงรูป 2.1E (ก) ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่กระแสดังกล่าวสามารถหาได้โดยสมการที่ 2.21

$$S_{V_f} = \frac{dV_f/dB_z}{V_f^2} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)\tau_{eff}(v_2 - v_1)}{8KTI} \quad (2.21)$$

โดยที่ l คือความยาวของขั้วอิเล็กตรอนชนิดเอ็น, v_1 และ v_2 คือ อัตราการรวมตัวของพาหะ, μ_p และ μ_n คือสภาพความคล่องตัวของพาหะ และ τ_{eff} คืออายุของพาหะ

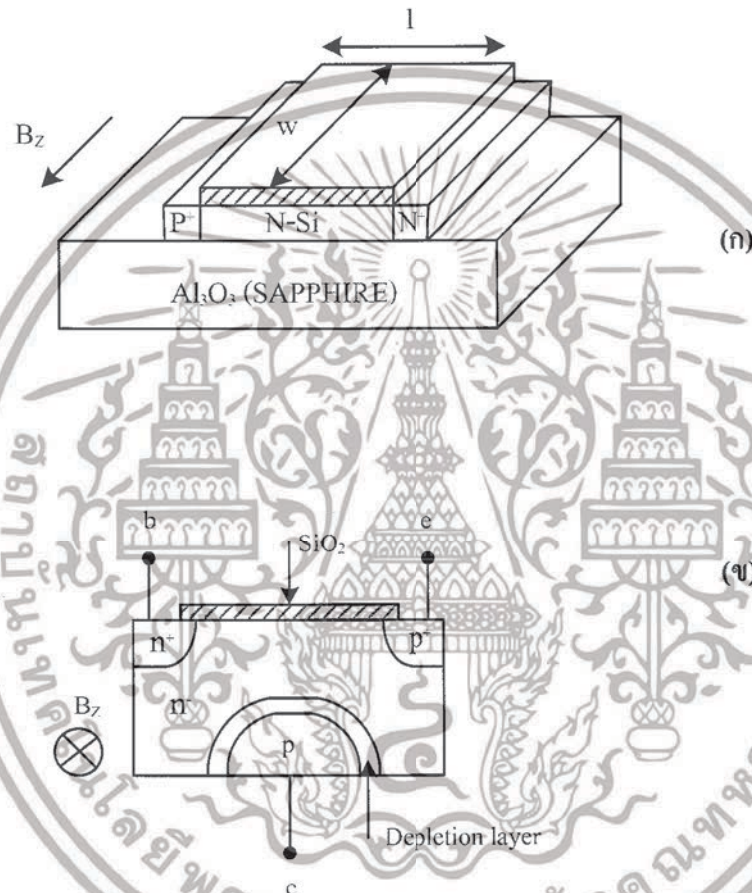


รูปที่ 2.10 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด

ข้อเสียของ SOS แมกนีโตไดโอด เช่น การสร้าง $\text{Si-Al}_2\text{-O}_2$ จะเกิดขึ้นได้ยากในบริเวณผิวหน้า, ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ พื้นฐานของการใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS แสดงดังรูป 2.11 (ข) โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตราการวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS แมกนีโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปจากคอลเลคเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS

2.3.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magneto transistor)

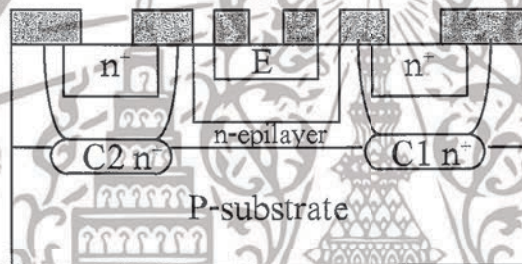
แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งโดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical magneto transistor) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Lateral magneto transistor) ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (Modulation current injection)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง (Vertical magneto transistor)

รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้งโดยสร้างจากกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด NPN สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (Buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลคเตอร์ทั้งสองสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด n^- เพื่อไม่ให้ข้อต่อเซอร์กิต จึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่าง ชั้นฝัง (Buried layer) ทั้งสอง



รูปที่ 2.12 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแส

แนวตั้ง

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านส่วนเบสไปถึงชั้นอีพีของคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วนโดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้นฝัง (Buried layer) ทั้งสอง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันอยู่ในสภาวะสมดุล $I_{C1} = I_{C2} = I_{CO}/2$ โดยที่ I_{CO} คือผลรวมกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองทั้งสองไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$ ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองหาได้โดยสมการที่ 2.22

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n^* (L/W_E) \cdot I_{CO} \cdot B \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ L คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์, W_E คือ ความกว้างอิมิตเตอร์ และ G คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับ โครงสร้างของอุปกรณ์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดย

$$S = |\Delta I_C / I_{C0} B| \quad (2.23)$$

แทนสมการที่ 2.24 ลงในสมการที่ 2.25 จะได้

$$S = G \mu_n^* (L / W_E) \quad (2.24)$$

ในสภาวะปกติขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ 2.26 และ 2.27

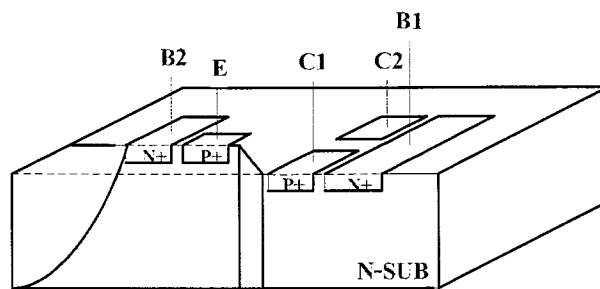
$$S_A = |\partial V_C / \partial B|_{B=0} = R_C |\partial I_C / \partial B|_{B=0} \quad (2.25)$$

$$S = V_C^{-1} |\partial V_C / \partial B|_{B=0} = I_C^{-1} |\partial I_C / \partial B|_{B=0} \quad (2.26)$$

ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์นี้มีค่าประมาณ $0.03/T - 0.05/T$ ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์ MAGFET

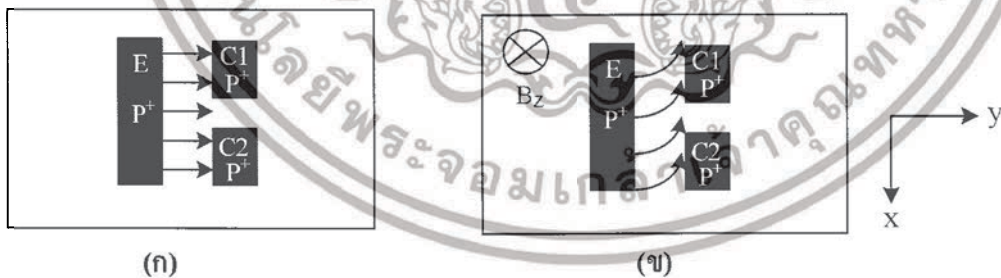
แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor)

โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2.13 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองข้างอย่างสมมาตรโดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากกรมอดคูเลท (Modulation current injection) อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ PNP ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, สองคอลเลคเตอร์ C1, C2 และสองขั้วเบสคอนแทค B1, B2



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวอน

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก (Majority carriers) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลคเตอร์ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ($\Delta I_C = 0$) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 2.14 (ก) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ($\Delta I_C \neq 0$) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุลแสดงดังรูปที่ 2.14 (ข)



รูปที่ 2.14 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ I_{C1} และ I_{C2} ได้ตั้งสมการที่ 2.29 เพราะฉะนั้นผลรวมของ I_{C1} และ I_{C2} คือกระแสคอลเลคเตอร์ที่ไหลในภาวะปกตินั้นเอง ดังสมการที่ 2.30 ส่วนสมการที่ 2.31 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔI_C กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง ΔI_C แปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสฮิมิตเตอร์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์และแบบสมบูรณ์แสดงได้ดังสมการที่ 2.28 ถึงสมการที่ 2.32

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \quad (2.27)$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \quad (2.28)$$

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_z \cdot I_E \quad (2.29)$$

ซึ่ง μ_p และ μ_n คือค่าความคล่องตัว (Mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮล K_g เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์ (ก)

$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_O \cdot \Delta B_z} \quad (2.30)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \quad (2.31)$$

ซึ่ง I_O คือแหล่งจ่ายกระแสแสดงที่และ ΔB_z คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

2.3.3 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแมกนีโตรีซิสเตอร์ อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสเทนซ์ (Magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม θ ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ 2.21 และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบน θ หาได้ดังสมการที่ 2.22

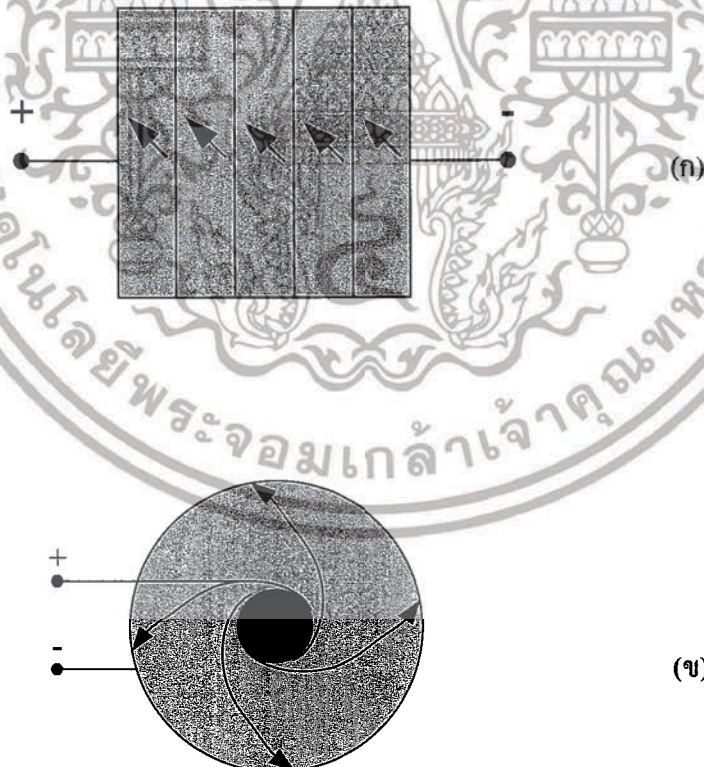
$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \quad (2.32)$$

$$R(\theta) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{wr} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ K_{in} ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเพลทซึ่งในอุดมคติเพลทมีความกว้างมากกว่าความยาว

โดยปกติแล้วแมกนีโตริซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (Parallel Hall plates) และแบบวงกลม (Caibino disc) ดังแสดงรูปที่ 2.15 โดยที่รูป 2.15 (ก) แสดงโครงสร้างแมกนีโตริซิสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนาน ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์ คือ ในอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์ แต่จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 2.15 (ข) แสดงโครงสร้างแมกนีโตริซิสเตอร์แบบวงกลม ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วย โดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิกอนจะมีสภาพความคล่องตัวสูง ซึ่งโดยปกติแล้วอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะเลือกสารประกอบที่มีค่าสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแมกนีโตริซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม

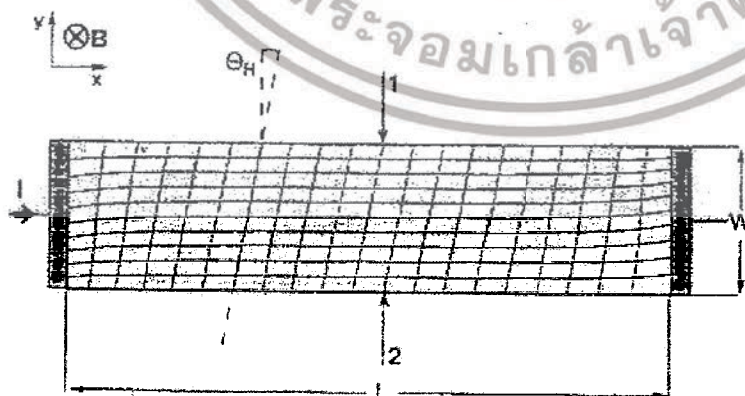
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor)

2.4.1 ทฤษฎีเซ็นเซอร์แม่เหล็ก

เซ็นเซอร์แม่เหล็ก เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็ก ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น วัดความเร็วมอเตอร์ วัดระยะทาง เป็นต้น เซ็นเซอร์แม่เหล็กสามารถแบ่งได้หลายชนิด โดยจะแบ่งชนิดจากลักษณะการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแต่ละอุปกรณ์ คือ เซ็นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยคลื่นเสียงในการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ SAW (Surface Acoustic Wave) เซ็นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยควอนตัมในการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเซ็นเซอร์แม่เหล็กชนิดนี้ จะมีความไวในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กสูงมาก ได้แก่ SQUID (Super Conducting Quantum Interference) และเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็ก ได้แก่ Magnetotransistor , Magnetodiodes , Magnetoresistor และ Carrier-Domain Mos devieces.

สำหรับเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กนี้ สามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานได้อีก 2 ประเภท คือ เซ็นเซอร์แม่เหล็กที่นำแรงดันฮอลล์ไปใช้งาน (Hall voltage Mode of Operation) และเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่นำกระแสฮอลล์ไปใช้งาน (Hall Current Mode of Operation) โดยเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่นำแรงดันฮอลล์ไปใช้งาน (Hall voltage Mode of Operation) นั้น อุปกรณ์ประเภทนี้ต้องออกแบบให้มีความยาวมาก เพราะแท่งสารกึ่งตัวนำที่มีความยาว จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันฮอลล์ได้เต็มที่และสมบูรณ์ แรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำจะมีค่าขึ้นอยู่กับแรงลอเรนซ์ ทำให้เส้น Equip-potential มีมุมฮอลล์เกิดขึ้น ทำให้พาหะที่ถูกแรงลอเรนซ์กระทำจะถูกสนามไฟฟ้าจากแรงดันฮอลล์ดึงกลับทำให้กระแสวิ่งเป็นเส้นตรง สังเกตได้จาก Current line แนวนอน



รูปที่ 2.16 ภาพจำลองแบบแสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์และแรงดันฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่นำค่ากระแสไปใช้งาน (Hall Current Mode of Operation) นั้น อุปกรณ์ประเภทนี้ ต้องออกแบบให้มีความสั้นหรือความกว้างมากกว่าความยาว เพราะในกรณีที่แท่งสารกึ่งตัวนำมีความสั้น หรือมีความกว้างมากกว่าความยาว แรงดันฮอลล์จะเหนี่ยวนำไม่เต็มที เส้น Equip-potential จะมีค่าค่อนข้างขนาน ส่งผลให้เกิดมุมฮอลล์ที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้แรงลอเรนซ์มีค่ามากกว่าค่าแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ ทำให้พาหะมีการเลี้ยวเบนส่งผลให้กระแสเลี้ยวเบนเป็นมุมลอเรนซ์



รูปที่ 2.17 ภาพจำลองการเลี้ยวเบนของพาหะในแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยในการทำโครงงานในครั้งนี้จะขอกล่าวถึงเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์แบบที่นำค่ากระแสเพียงเบนไปใช้งาน โดยเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ จะเกิดปรากฏการณ์ Magnetoresistance ขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ Magnetoresistance คือ ปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของวัสดุมีค่าเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กภายนอก แบ่งได้ดังนี้

- Physical Magnetoresistance
- Geometrical Magnetoresistance
- GMR (Giant Magnetoresistance)
- Spin-Dependent Magnetoresistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 Physical Magnetoresistance

ในความเป็นจริงพาหะ (อิเล็กตรอนหรือโฮล) จะมีค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันทุกตัว ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ใช้ในสมการทั่วไปมักเป็นค่าความเร็วเฉลี่ย และเนื่องจากค่าความเร็วของพาหะแต่ละตัวไม่เท่ากัน ทำให้เมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งมากระทบผิวหน้าด้านบน (ทิศทาง z) ในรูปที่ 2.18 (a) จะเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าและเกิดแรงดันฮอลล์ในทิศทาง y ทำให้มีค่าชดเชยแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ พาหะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย พาหะจะวิ่งเป็นเส้นตรงแนวนอน แต่อย่างไรก็ตามยังมีพาหะบางตัวที่วิ่งเร็วกว่าค่าเฉลี่ย ทำให้พาหะเหล่านี้วิ่งเป็นแนวเส้นตรงทำมุมกับแนวการเคลื่อนที่ของพาหะที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับความเร็วเฉลี่ย

ในทำนองเดียวกันพาหะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่น้อยกว่าค่าความเร็วเฉลี่ยก็จะวิ่งเป็นแนวเส้นตรงที่ทำมุมกับพาหะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของ Physical Magnetoresistance

ปรากฏการณ์ Physical Magnetoresistance นี้ มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานน้อยมาก แต่ปรากฏการณ์ Physical Magnetoresistance นี้ ค่าความต้านทานจะมีค่ามากขึ้นเสมอ เมื่อมีสนามแม่เหล็ก

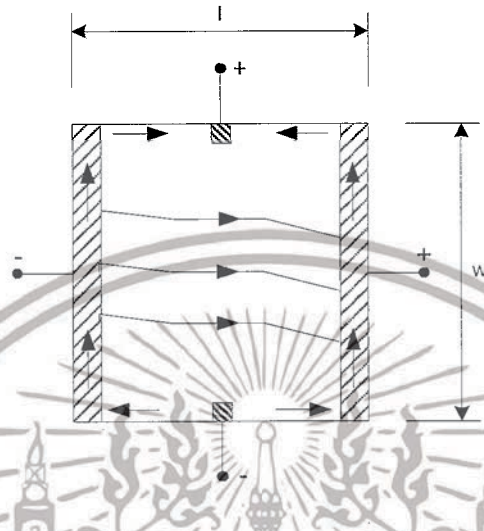
$$\sigma(B) = \sigma(0)(1 - r^2 \mu^2 B_z^2)$$

โดยที่ $\sigma(B)$ = ความนำเมื่อมีสนามแม่เหล็ก, $\sigma(0)$ = ความนำเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก,

r = Correction factor, μ = Mobility

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.2 Geometrical Magnetoresistance Effect

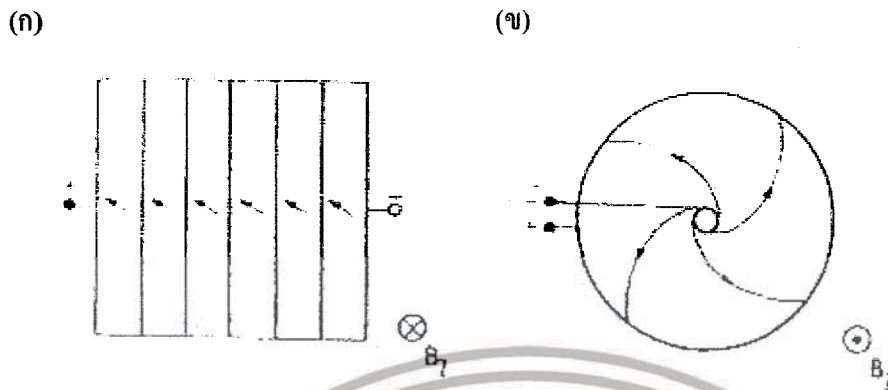


รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของ Geometrical Magnetoresistance Effect

Geometrical Magnetoresistance Effect คือ ปรากฏการณ์ที่ใช้รูปทรงของอุปกรณ์เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน หลักการทำงานของ Geometrical Magnetoresistance Effect จะใช้โหมดการทำงานปรากฏการณ์ฮอลล์แบบกระแส (Current mode) โดยใช้แรงลอเรนซ์หักเหทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในโหมดการทำงานนี้ต้องออกแบบให้อุปกรณ์มีความสั้น หรือมีความกว้างมากกว่าความยาว เพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่าค่าแรงลอเรนซ์ ทำให้กระแสเกิดการหักเห การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานด้วยวิธีนี้ ค่าความต้านทานจะมีค่ามากขึ้นเสมอ

ตัวอย่างการออกแบบอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของ Geometrical Magnetoresistance Effect เช่น การใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงต่อสนามแม่เหล็กภายนอก หรือ ใช้โครงสร้างแบบวงกลมเพื่อไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันฮอลล์ ทำให้กระแสเกิดการหักเหด้วยมุม θ_L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการออกแบบอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของ Geometrical Magnetoresistance Effect. (ก) การใช้ตัวต้านทานต่อแบบอนุกรม (ข) การใช้โครงสร้างแบบวงกลม

สมการการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่สัมพันธ์กับมุมเบี่ยงเบนกระแส และ สมการการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกับค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

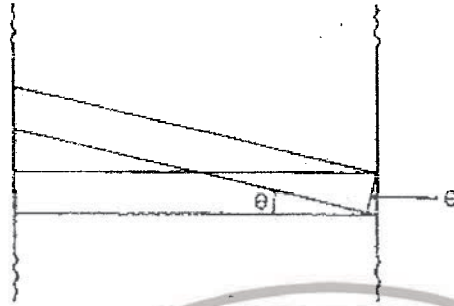
$$R(\theta) \approx R_o (1 + \tan^2 \theta)$$

$$R(B_z) = R_o (1 + k_{ar} \mu^2 B_z^2)$$

โดยที่ K_{ar} = Constant depends on aspect ratio

การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานด้วยวิธีนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่สูง เมื่อใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีค่า Mobility สูง ซึ่งโดยมากจะเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ เช่น n - InSb, n - GaAs, n - InAs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

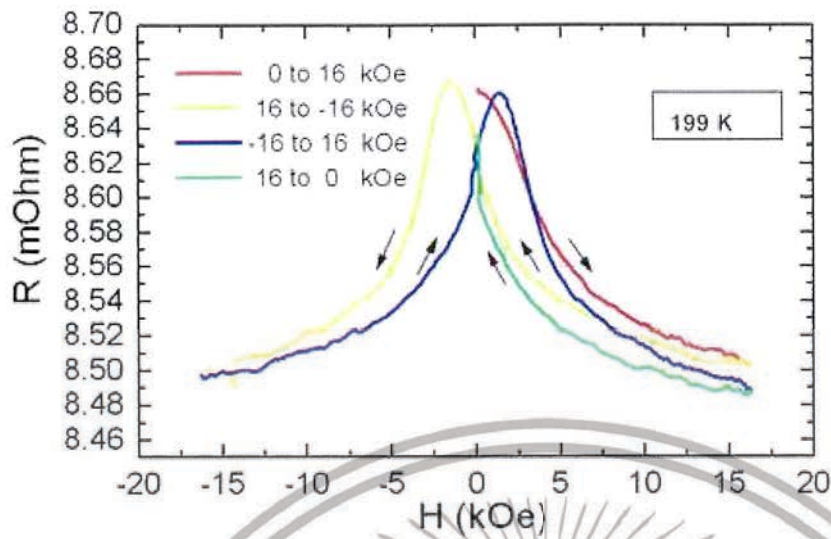


รูปที่ 2.21 แสดงการเบี่ยงเบนของกระแสที่ได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก

2.4.1.3 GMR (Giant Magnetoresistance)

GMR คือคำย่อของโจแอนท์แมกนีโตริซีสเทนซ์ (Giant MagnetoResistance) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุมีความต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างมาก (1-80%) เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก คณะผู้วิจัย ณ University Paris-Sud ในประเทศฝรั่งเศสค้นพบ GMR ในปี 1988 เมื่อศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสลับชั้นของเหล็กและโครเมียม แล้วพบว่า ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสลับชั้นลดลงเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการวัดในสนามแม่เหล็กขนาด 2 เทสลา การค้นพบดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของ GMR ที่ได้รับความสนใจจากบรรดานักวิทยาศาสตร์ และวิศวกร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณมีค่าสูงและสามารถสังเกตได้ที่อุณหภูมิห้อง ตลอดเวลา 14 ปีที่ผ่านมาจึงมีการวิจัยทางวัสดุ GMR อย่างกว้างขวาง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ หน่วยความจำ และ เซ็นเซอร์

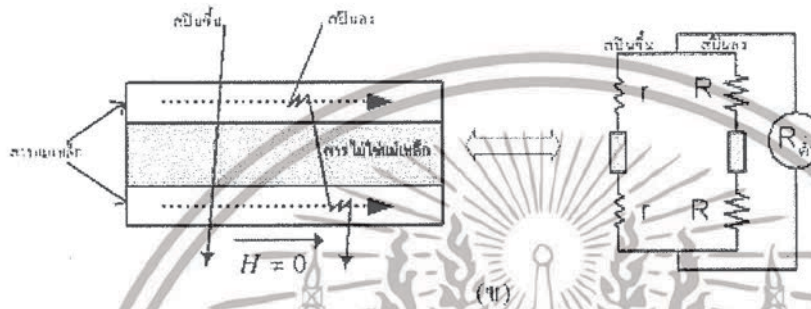
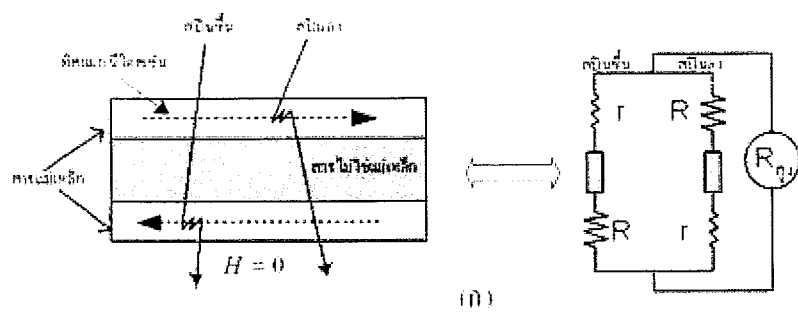
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างกราฟ GMR แสดงความสัมพัทธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก กับค่าความต้านทานของวัสดุอัลลอยด์

GMR แตกต่างจาก MR หรือแมกนีโตรีซิสแทนซ์แบบปกติ ตรงที่ MR เกิดขึ้นในโลหะและสารกึ่งตัวนำต่างๆไป ที่มีความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในสนามแม่เหล็ก (โดยทั่วไปไม่เกิน 3%) เนื่องจากอิเล็กตรอนที่นำไฟฟ้าของสารเหล่านั้นมีอัตราการกระเจิงสูงขึ้น เมื่อแรงกลเรนซ์ทำให้อิเล็กตรอนมีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเกลียว ในทางตรงกันข้าม GMR เป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานไฟฟ้าลดลงในสนามแม่เหล็ก และวัสดุที่แสดง GMR นั้นส่วนมากเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



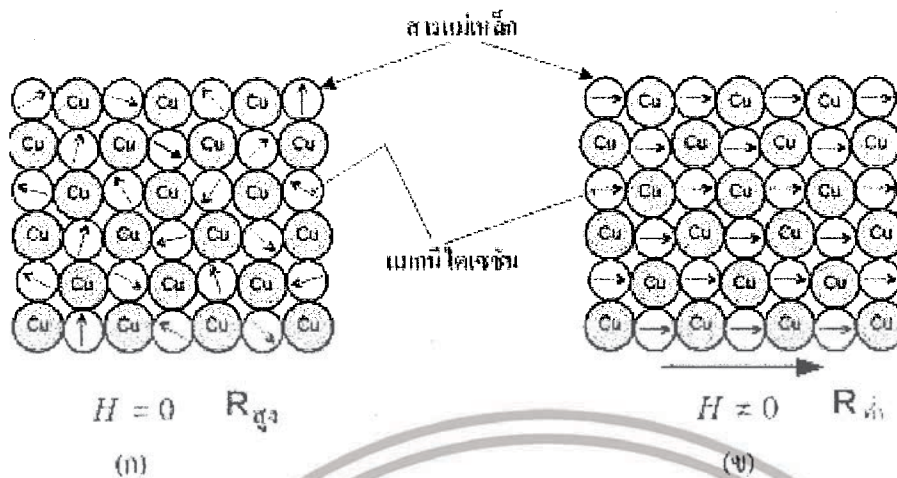
รูปที่ 2.23 แสดงวงจรไฟฟ้าเสมือน เพื่ออธิบายการลดลงของความต้านทานในสนามแม่เหล็ก

2.4.1.4 Spin-Dependent Magnetoresistance

อิเล็กตรอนมีการสปินสองแบบคือ สปินขึ้น (Spin up) และสปินลง (Spin down) เมื่ออิเล็กตรอนผ่านชั้นแม่เหล็กที่มีสปินขนานกับทิศทางแมกเนติกเซชันจะมีอัตราการกระเจิงที่ต่ำกว่า อิเล็กตรอนที่สปินสวนทิศกับแมกเนติกเซชันของฟิล์ม

เมื่อฟิล์มบางสลับชั้นมีการจัดตัวแบบสลับกัน อิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้นสามารถผ่านชั้นของสารแม่เหล็กชั้นแรก อย่างสะดวกมีอัตราการกระเจิงต่ำ แต่จะมีอัตราการกระเจิงสูงในชั้นถัดไป เมื่อฟิล์มบางอยู่ในสนามแม่เหล็ก แมกเนติกเซชันของฟิล์มแม่เหล็กจะมีการจัดตัวในทิศทางเดียวกัน อิเล็กตรอนสปินลงจะมีอัตราการกระเจิงสูงเมื่อผ่านสารแม่เหล็กทุกชั้น ในขณะที่อิเล็กตรอนที่สปินขึ้นจะผ่านสารแม่เหล็กอย่างสะดวกทุกชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 (ก) แมกเนติกไดเซชันของอนุภาคเฟอร์โรแมกเนติกในสภาวะปกติ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากกระทำแมกเนติกไดเซชันของสารแม่เหล็กจะชี้ในทิศทางเดียวกัน ทำให้ความต้านทานโครงสร้างลดลง

2.5 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซนเซอร์

การนำอุปกรณ์เซนเซอร์ไปใช้งานโดยทั่วไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติ เช่น ที่อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดัน เพื่อให้สามารถนำเซนเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซนเซอร์ทั่วไป ค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

1. ย่านวัด (Range) เป็นการจำกัดค่าอินพุต และเอาต์พุตของเซนเซอร์ในการใช้งาน เช่น เซนเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้กับความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสด้านเอาต์พุตอยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

2. ความผิดพลาด (Error) เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) รวมอยู่ด้วยเสมอ

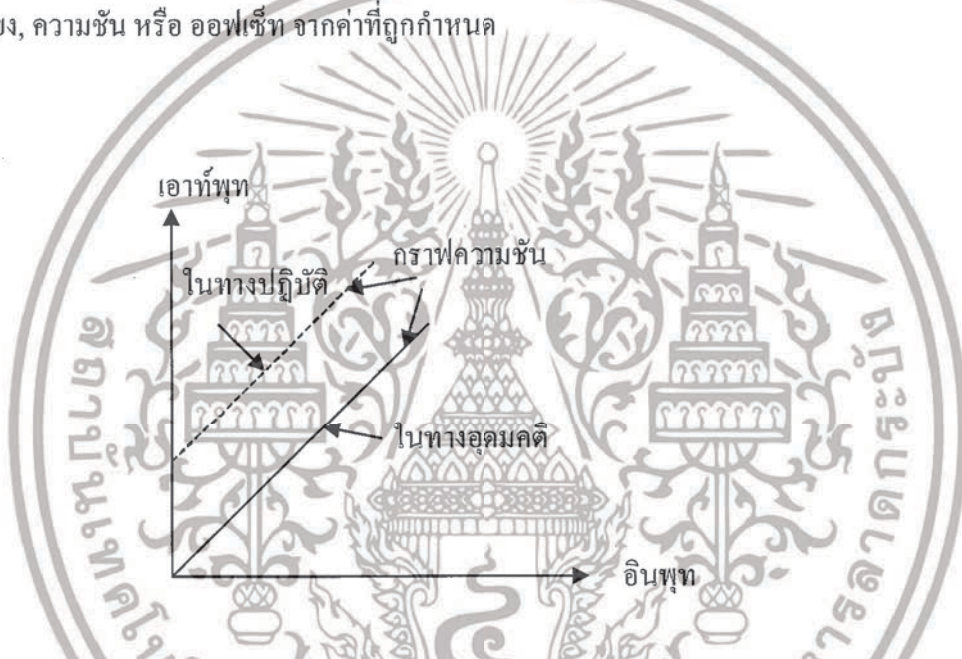
3. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ในการวัดค่า ความแม่นยำ และความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง จะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึง สามารถวัดได้ละเอียด (Sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง สเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึง ความคงเส้นคงวา (Consistency) หรือ ความสามารถซ้ำค่าเดิม (Repeatibility) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงต่ำ

4. ความไว (Sensitivity) หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของ อุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต หรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัย การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น $0.5 \Omega/^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น

5. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือความแม่นยำ โดยความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัด ได้ว่ามีการวางตัวอย่างไรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมาก แต่มีความเอียง, ความชัน หรือ ออฟเซ็ท จากค่าที่ถูกกำหนด

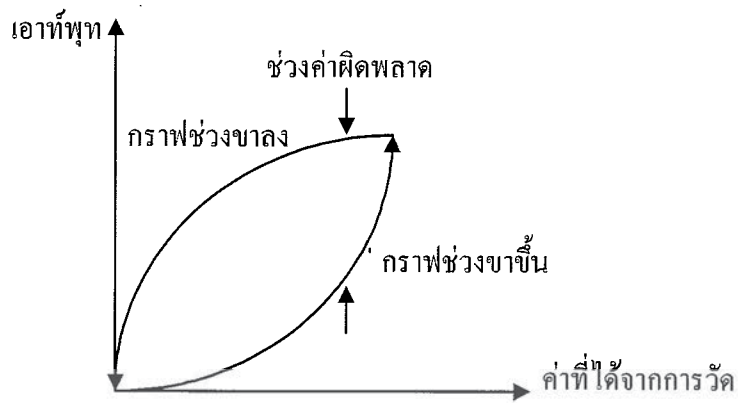


รูปที่ 2.23 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ

6. ความมีเสถียรภาพ (Stability) ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แต่เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การเลื่อนไหล (Drift) มักถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ ดังกล่าว การเลื่อนไหลอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มข่านวัดก็ได้ คำว่า การเลื่อนไหลเป็นศูนย์ (Zero drift) ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุต เมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์

7. ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้ เรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 ฮิสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

8. การแยกชัด (Resolution or Discrimination) บอกถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ถูกวัด

9. ออฟเซ็ท (Offset) เป็นค่าเอาต์พุตของเซนเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่สัญญาณอินพุตเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ค่าออฟเซ็ท หมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

10. ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response) แสดงถึง เวลาที่เอาต์พุตมีค่าอยู่ใน 63 % ของค่าสุดท้ายที่ทำการการตอบสนองของอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดทดลอง

โดยปกติแล้วในการออกแบบกระบวนการสร้างและการทดสอบของอุปกรณ์เซนเซอร์ในความเป็นจริงจะมีคุณสมบัติไม่เป็นอุดมคติเพราะฉะนั้นจึงเป็นหน้าที่ของนักออกแบบและนักวิจัยที่จะพัฒนาอุปกรณ์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือเข้าใกล้ความเป็นอุดมคติมากที่สุด โดยรายละเอียดคุณสมบัติของเซนเซอร์ในทางอุดมคติสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ

คุณลักษณะ	ค่าในทางอุดมคติ
Response, Δy	มีความเป็นเชิงเส้นและไม่มีสัญญาณรบกวน
Baseline, y_0	เท่ากับศูนย์
Response time, T	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Frequency band-width	เท่ากับอนันต์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Time to reach 90% of final value, t_{90}	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Working range, $(y_{\max} - y_{\min})$	เท่ากับอนันต์
Sensitivity, S	มีค่าสูง และคงที่ตลอดย่านการทำงาน
Resolution	เท่ากับอนันต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ ซึ่งกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์นั้น ถือว่ามีความสำคัญที่สุดกว่าได้เพราะแมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติและการทำงานที่จะเป็นไปตามหลักการ และทฤษฎีไปได้อย่างถูกต้องนั้น ก็ต้องขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้าง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ เพื่อให้ได้แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติตามหลักการและทฤษฎีที่ต้องการออกมา



รูปที่ 3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process)

กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process) มีเป้าหมายหลักคือ กำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอนเช่น กำจัดฝุ่น กำจัดไขมัน กำจัดเศษโลหะ เพื่อความสะอาดของแผ่นซิลิคอนก่อนลงมือทำการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

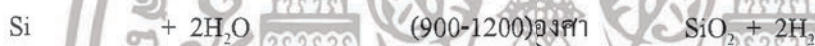
3.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

คือการการก่อตัวของซิลิคอนไดออกไซด์บนพื้นผิวซิลิคอน โดยที่ซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของออกซิเจน : O_2 และ น้ำ : H_2O ที่อุณหภูมิสูงประกอบด้วย

Wet Oxidation



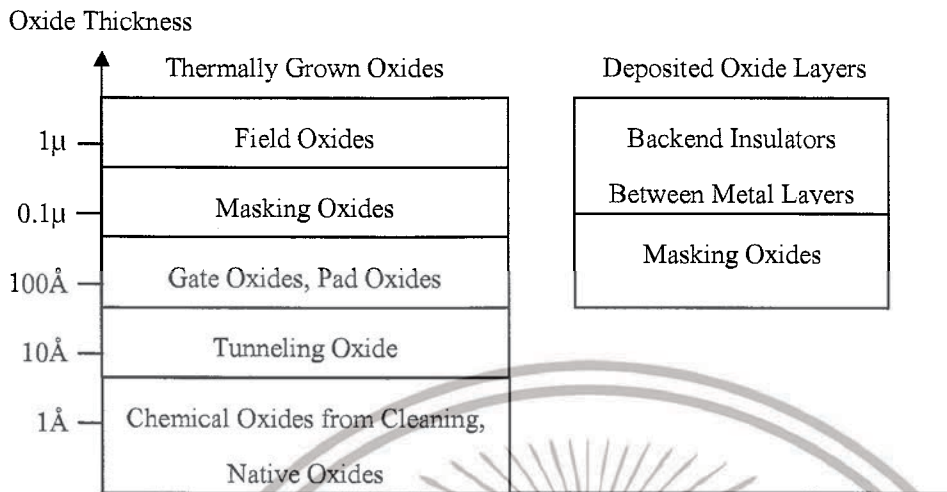
Dry Oxidation



หน้าที่ของ SiO_2

1. ใช้เป็น Field Oxide ที่ความหนา 3000 – 10000 Å
2. ใช้เป็น MASK ในกระบวนการ Lithography ที่ความหนา 2000 – 5000 Å
3. ใช้เป็น MASK ในกระบวนการ เชื้อสาร ที่ความหนา 2000 – 5000 Å
4. ปกป้องผิวหน้า Si ที่ความหนา 2000 – 5000 Å
5. แยกตัวอุปกรณ์จากกันในกรณี LOCOS ที่ความหนา 200 – 500 Å
6. ใช้เป็น Gate Oxide และ Capacitance Dielectric ในอุปกรณ์ MOS ที่ความหนา 150 – 500 Å
7. ใช้เป็น Tunneling Oxide ใน EAROMS ที่ความหนา 60 – 100 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การประยุกต์ใช้งานซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ

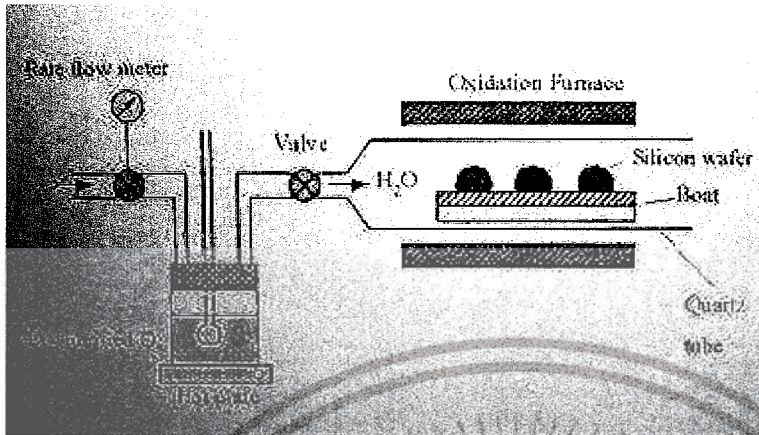
ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีและยังช่วยควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น

จากสมการทางเคมีข้างต้นกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process) มีอยู่ 2 แบบ คือ

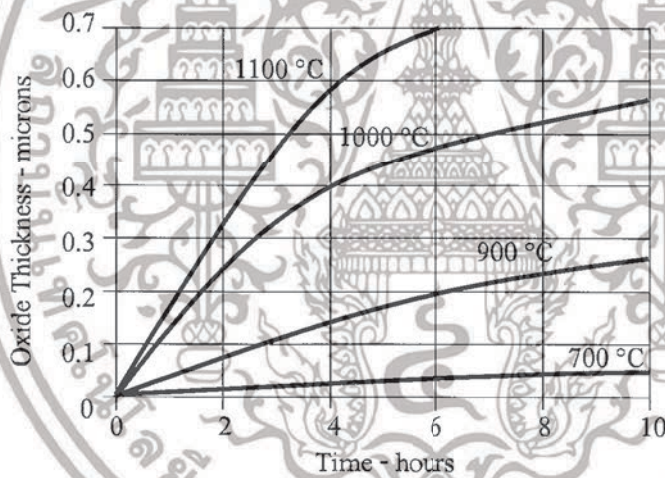
3.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ การเกิดปฏิกิริยารวดกว่า Dry Oxidation เนื่องจากโมเลกุลของด่างที่ได้กล่าว แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ Wet Oxidation คือคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ไม่ดี ประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมของสารเจือน้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ได้ไม่สมบูรณ์ และมีรูพรุน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไอน้ำอิมิตัว

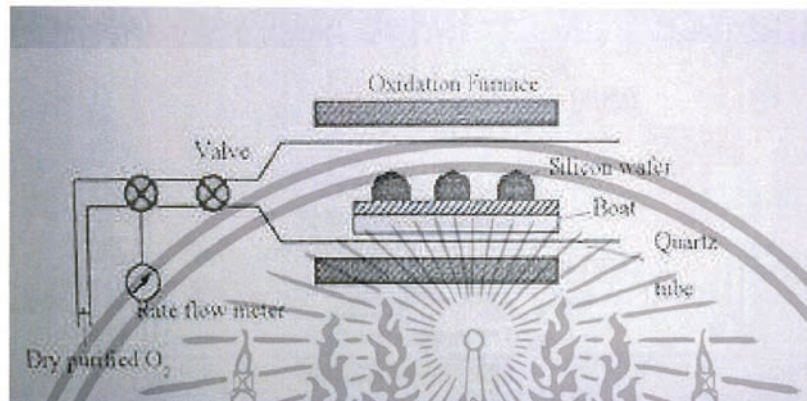


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ

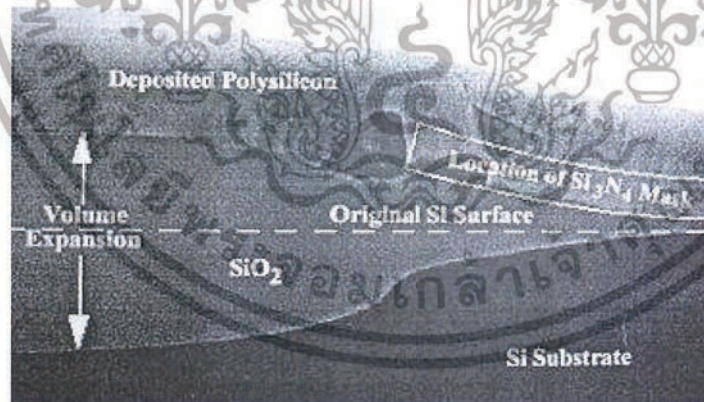
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูง พื้นผิวที่ได้ค่อนข้างเรียบกว่า กรณีของ Wet Oxidation แต่ ปฏิกิริยาการเกิดซ้ำ และอัตราการเกิดต่ำกว่า



รูปที่ 3.5 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง



รูปที่ 3.6 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการออกซิเดชัน

1. ระบายของผลึกผลเนื่องจากระบายผลึกพิจารณาจาก
 - จำนวนพันธะของซิลิคอนที่มีต่อพื้นที่บนผิวหน้าของซิลิคอนที่แต่ละระบาย
 - ทิศทางของผลึกมีผลกับค่าพลังงานกระตุ้นที่ใช้เริ่มปฏิกิริยา
2. ผลเนื่องจากสารเจือ

สารเจือที่ใช้โดยปกติคือธาตุหมู่ 3 และหมู่ 5 คือ โบรอน ฟอสฟอรัส อาร์เซนิก ซึ่งจะช่วยใน

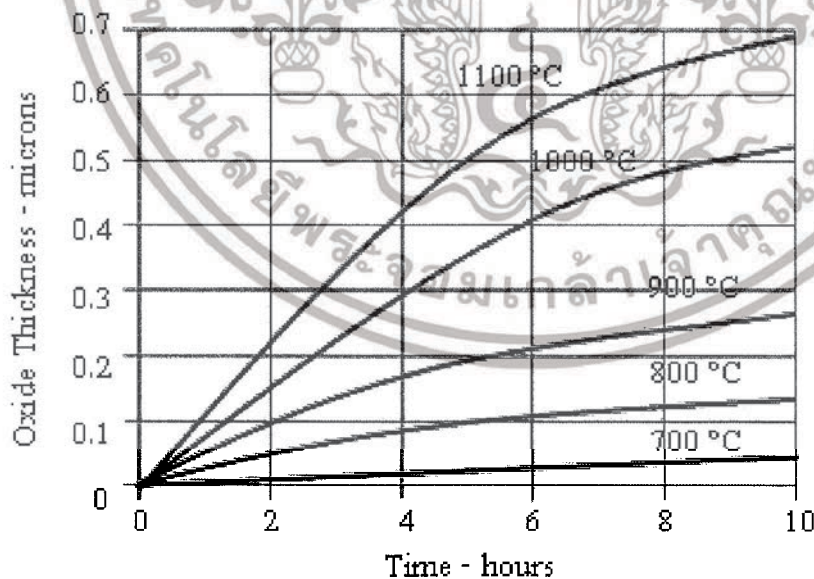
การเพิ่มอัตราการออกซิเดชันเมื่อมีความเข้มข้นปริมาณสูง ทำให้โครงสร้างพันธะของ SiO_2 อ่อนลง ซึ่งทำให้ H_2O และ O_2 เข้าสู่ SiO_2 ได้โดยง่าย และแพร่ผ่านอย่างรวดเร็ว

3. ผลเนื่องจาก H_2O
4. ผลเนื่องจากคลอรีน

CI เป็นตัวที่ช่วยแก้ไขคุณลักษณะของอุปกรณ์ให้ดีขึ้น ซึ่งได้มาจากการเป่าก๊าซ HCl, TCE, TCA ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชันด้วยเช่นกัน

5. ผลเนื่องจากความดัน
6. ผลเนื่องจากพลาสติก

การใช้พลาสติก ช่วยในการเกิดออกไซด์เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสูงได้



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) คือ กระบวนการเกี่ยวกับการส่งผ่านลวดลาย (pattern) จากมาสก์ลงไปยังบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

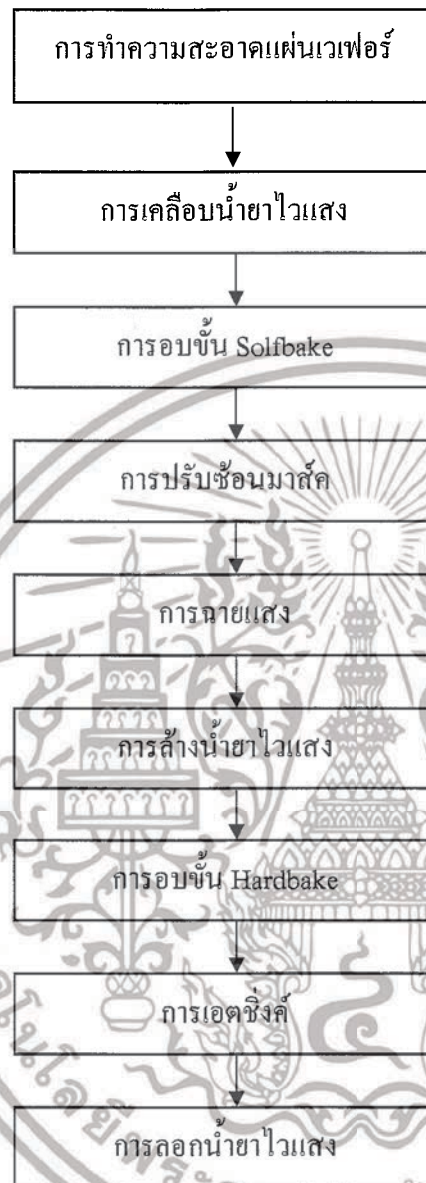
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) ต้องการห้องสะอาดสำหรับปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในขั้นตอนน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียที่เกิดขึ้นควรควบคุมให้ไม่เกิน 10 % ไม่เช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะใช้มาสก์ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50 % ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) การสร้างห้องสะอาดส่วนมากจะเป็นแบบ Vertical Laminar Flow ที่มีการกรองฝุ่นออกจากอากาศ เพื่อให้เป็นห้องสะอาดในระดับตั้งแต่ Class 10K – Class 1 ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดง Class ต่าง ๆ ของห้องสะอาด

ลำดับชั้น	จำนวนอนุภาคขนาด 0.5 μm ต่อลูกบาศก์เมตร	จำนวนอนุภาคขนาด 5 μm ต่อลูกบาศก์เมตร
ห้องสะอาด		
10,000	10,000 (350,000)	65 (23,000)
1,000	1,000 (35,000)	6.5 (2,300)
100	100 (3,500)	0.65 (230)
10	10 (350)	0.065 (23)
1	1 (35)	0.0065 (2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ (Photolithography Process) โดยมีขั้นตอนพื้นฐานต่างดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process

3.3.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Cleaning)

ขั้นตอนแรกของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีคือการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารเคมี เพื่อ กำจัดสิ่งสกปรกต่างๆที่ติดอยู่บนผิวเวเฟอร์ เช่น โลหะ ผุ่นละออง สารอินทรีย์ หรือ อีออนต่างๆ สิ่งสำคัญของกระบวนการ (Photolithography Process) สารละลายที่สำคัญมากและใช้บ่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุดคือน้ำ DI (Deionized) ซึ่งเป็นน้ำที่ทำให้บริสุทธิ์และผ่านตัวกรองหรือฟิลเตอร์เพื่อกรองฝุ่น ละออง อนุภาคและสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำ DI ซึ่งน้ำ DI เป็นน้ำที่มีความต้านทานสูงมาก

3.3.2 การเคลือบสารไวแสง (Photoresist coating)

ในกระบวนการ (Photolithography Process) จะเริ่มต้นด้วยการเคลือบผิวแผ่นซิลิกอนด้วย Photoresist ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารไวแสงแบบลบ (Negative Photoresist)
2. สารไวแสงแบบบวก (Positive Photoresist)

สารไวแสงทั้งสองชนิด จะให้ผลในการทำงานตรงกันข้ามกัน กล่าวคือถ้าหากใช้ Negative Photoresist ส่วนใดที่ถูกแสงจะไม่ถูกลอกออกเมื่อถูก Development ส่วน Positive Photoresist ส่วนที่ถูกแสงจะถูกลอกออกเมื่อถูก Development

สิ่งสำคัญก่อนการเคลือบสารไวแสงคือแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาด ผิวหน้าและสร้างชั้นออกไซด์แล้ว อบในตู้อบประมาณ 30 - 60 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดลอกได้ง่าย ซึ่งการเคลือบสารไวแสงสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

แบบที่ 1 สปินเนอร์ (Spinner) เริ่มต้นโดยการหยดสารไวแสงลงบนแผ่นซิลิกอนที่ติดอยู่บนแป้นหมุนของเครื่องสปินเนอร์ โดยใช้ความเร็วรอบสูง ๆ เพื่อที่จะให้สารไวแสงเคลือบเป็นฟิล์มบาง ๆ บนแผ่นผลึกหนาประมาณ 1000 - 2000 อังสตรอม โดยใช้ความเร็วรอบ 3000 - 6000 rpm เป็นเวลา 30 นาที ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำเกินไป ลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นผลึกจะเกิดการนูนตรงบริเวณกลางแผ่น แต่ถ้าใช้ความเร็วรอบสูงเกินไป ชั้นฟิล์มที่เคลือบก็จะกระจายไปนูนที่บริเวณขอบ และถ้าเคลือบหนาไปผิวฟิล์มจะหยาบ ไม่เรียบ โดยขั้นตอนในระหว่างการเคลือบสารไวแสงนี้ต้องระวังฝุ่นละอองอย่างมาก

แบบที่ 2 การเคลือบด้วยสเปรย์ (Spray Coating) มีหลายแบบส่วนมากใช้ภายในโรงงาน

แบบที่ 3 วิธีใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating) ซึ่งวิธีนี้จะใช้เคลือบเฉพาะตอนที่จะตัดแยกชิพ โดยเคลือบหมดทั้งแผ่น 2 ด้าน แล้วนำไปทำการถ่ายลายเส้นที่จะทำการตัด ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวสำหรับใบมีเพชรตัด และยังเป็นการป้องกันฝุ่นและรอยเปื้อนต่างๆ จากการตัด ซึ่งส่วนมากจะใช้สารไวแสงแบบบวกเพราะถ้าใช้สารไวแสงแบบลบ ฝุ่นและจุดทึบแสงอาจทำให้เกิด Pinhole บนฟิล์มได้หลังจาก develop แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การอบขึ้น Solback

การอบขึ้น Solback จะช่วยในการยึดติดของน้ำยาไวแสงกับแผ่นซิลิคอน และ ช่วยในการลอกออกชั้นตอนนี้จะใช้เวลาอบประมาณ 10 ถึง 30 นาที ในเตาที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส ในอากาศหรือบรรยากาศไนโตรเจน

3.3.4 การปรับชั้นมาสก์ (Mask Alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาสก์ โดยการนำกระจกโฟโตมาสก์ วางทับบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโตมาสก์ชั้นแรกสามารถทำได้โดยไม่มีการปรับชั้นมาสก์ ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งของวงจรรวมบนแผ่นผลึกเลยแต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้นได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไปจำเป็นต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ถูกต้อง

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาสก์ตั้งแต่มาสก์ 2 เป็นต้นไปก่อนการฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับชั้นมาสก์ เพื่อให้ลวดลายบนกระจกมาสก์ ซ้อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ซึ่งจะช่วยให้ขบวนการโฟโตกราฟิสามารถเปิดชั้นของออกไซด์ได้ตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง และเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมากดังนั้นการปรับชั้นจึงใช้อุปกรณ์ช่วยเรียกว่า ตัวปรับชั้นมาสก์ ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆคือ นำแผ่นผลึกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนได้ในแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงนอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาสก์จะถูกยึดให้อยู่เหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ทำ การตั้งเกตุภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาสก์พร้อมกับการปรับแผ่นเลื่อนแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงจนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาสก์ซ้อนกันลงตรงตำแหน่งที่ถูกต้องจากนั้นปรับแผ่นผลึกเลื่อนขึ้นในแนวสูงจนแบบสนิทกับกระจกมาสก์ ดังนั้นเราก็จะได้ตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อเตรียมสู่ขั้นตอนการฉายแสงต่อไป

3.3.5 การฉายแสง (Exposure)

การฉายแสง (Exposure) คือ ขั้นตอนที่ต้องจากการปรับชั้นมาสก์ (Aligment) วิธีการก็คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงย่านอุลตราไวโอเลตเอ็กโพส หรือ ฉายผ่านลวดลายฟิล์มโลหะบนกระจกมาสก์ที่ทำการอัลไลน์กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ด้านบนมีน้ำยาไวแสงติดอยู่ แสงจะผ่านลวดลายหรือไม่ผ่านลวดลายฟิล์มโลหะด้านบนจะเป็นตัวบังแสงไว้ส่วนที่ผ่านได้จะมาทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับน้ำยาไวแสงหรือโฟโตรีซิสบนผิวซิลิคอน การเอ็ทโพส หรือ การฉายแสงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งพอให้แสงทำปฏิกิริยากับโฟโตรีซิสอย่างสมบูรณ์

3.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

Development เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงแล้วด้วยน้ำยา Developer โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการ Develop ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่

จากนั้นจะทำการ Postbake เพื่อให้ส่วนที่เป็นฟิล์มแห้งและยึดเกาะติดกับแผ่นผลึกแน่นยิ่งขึ้นและเมื่อนำออกจากเตาอบแล้วควรนำไป Etching ทิ้งที่ไม่ควรปล่อยชั้นฟิล์มทิ้งไว้นานเกินไป

3.3.7 การอบขั้น (Hardbake)

หลังผ่านการฉายแสงและ Development ขั้นตอนการอบแบบ Hardbaking จะช่วยให้โฟโตรีซิส ติดกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดีขึ้น ขั้นตอนนี้จะอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ถึง 30 นาที

3.3.8 การกัด (Etching)

การกัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การกัดด้วยสารละลายทางเคมี (Wet chemical etching) และการกัดโดยใช้ก๊าซหรือการกัดแบบกัดแห้ง (Dry etching) การกัดคือการกัดชั้นป้องกันหรือซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องหรือพื้นที่ตามต้องการ สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีส่วนผสมหลักคือกรดไฮโดรฟลูอริก หรือ HF จะเป็นสารละลายที่กัดซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีอัตราการกัดอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ ที่ 25 องศาเซลเซียส เราต้องคำนวณความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ให้เหมาะสมเพราะสารละลายทางเคมีจะกัดทุกทิศทางเท่ากันหมดถ้าเราปล่อยให้กัดในเวลาที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดที่ด้านข้างทำให้ลวดลายเสียหายได้

หลังจากกัดชั้นซิลิคอนออกไดออกไซด์เราจะได้ช่องหรือลวดลายที่มีช่องหรือลวดลายตามมาส์คบนผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.9 การลอกน้ำยาไวแสง

การลอกน้ำยาไวแสงออกจากแผ่นฟิล์มเป็นขั้นตอนต่อจากการ Etching โดยการจุ่มแผ่นฟิล์มลงในน้ำยาลอกฟิล์ม อาจเป็นสารเคมีหรือใช้พวกพลาสติกมาเพื่อให้ผิวของแผ่นฟิล์มสะอาดเตรียมนำไปแพะสารเจือได้ ซึ่งถ้าผิวหน้าของซิลิคอนมีสิ่งสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพะสารเจือ

เมื่อลอกชั้นสารไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพื่อดูว่าเกิดการกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่ติดไม่แน่นหรือเกิดการกัดมากเกินไปถ้าเสียหายมากอาจจะต้องกลับไปเริ่มทำใหม่

3.4 กระบวนการแพะสารเจือ (Diffusion Process)

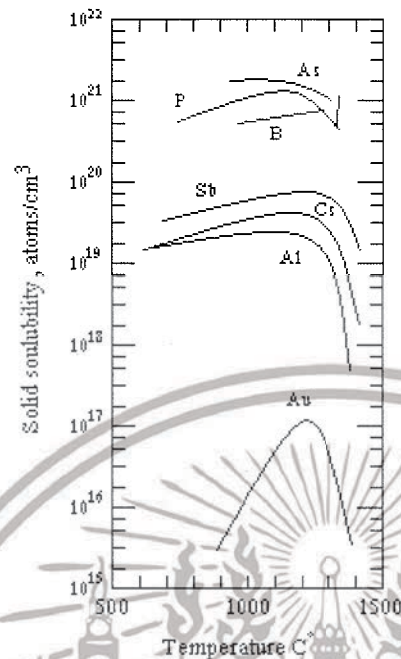
กระบวนการแพะสารเจือเป็นกระบวนการเป็นกระบวนการแพะสารเจือลงในแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการแพะที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (Source) เคลื่อนที่ไปยังฟิล์มแผ่นฐานรองและถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็น ขึ้น

ขั้นตอนการแพะสารเจือทำได้โดยกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งแหล่งสารเจือ โบรอน (Boron source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด พี และใช้ฟอสฟอรัส ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปในบรรยากาศของสารเจืออะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่เข้าไปยังแผ่นฐานรองความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิ ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการแพะมีอิทธิพลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพะ ในกระบวนการแพะสารเจือ แบ่งได้ เป็น 2 ขั้นตอนคือ การแพะสารเจือ ขึ้นต้น (Pre-deposition) และ การขับลึก (Drive-in)

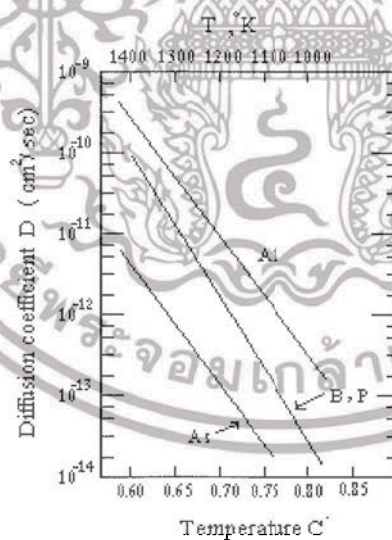
1.การแพะสารเจือขึ้นต้น (Pre-deposition)

การแพะสารเจือขึ้นต้น ในอุณหภูมิสูงเป็นการควบคุมปริมาณสารเจือ โดยการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแพะสารเจือ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆจะมีปริมาณสารเจือสูงสุดในการแพะเข้าไปยังฟิล์มฐานรอง ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการแพะเข้าไปในของแข็ง (Solid solubility) และปริมาณสารเจือที่ฟิล์มฐานรองจะเรียกว่าความเข้มข้นผิว (Surface concentration) โดยความสัมพันธ์ของค่า (Solid solubility) กับอุณหภูมิในการแพะสามารถแสดงดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆ ในซิลิคอน

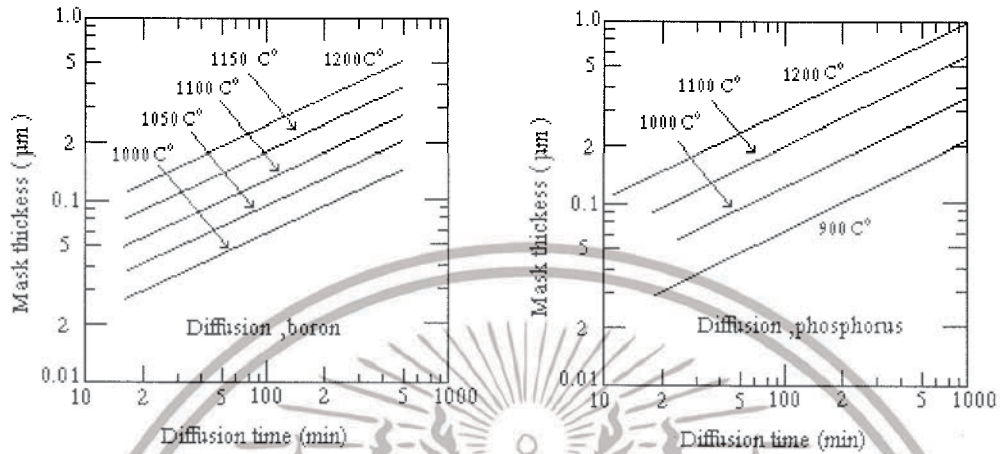


รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุกรม

สำหรับความสามารถในการแพร่ของสารเจือ เช่น As,P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิคอนได้ออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิคอน ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นหน้ากัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของฐานรอง โดยความหนาของชั้นซิลิคอนที่ใช้พิจารณาจาก อุณหภูมิ เวลาและสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส

2. การขับลิท

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารเจือบริเวณผิวที่ได้จากขั้นตอนการแพร่ขั้นต้น แพร่ลงไปในเนื้อสารมากขึ้น ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นซิลิคอน

3.5 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Meltalztion Process)

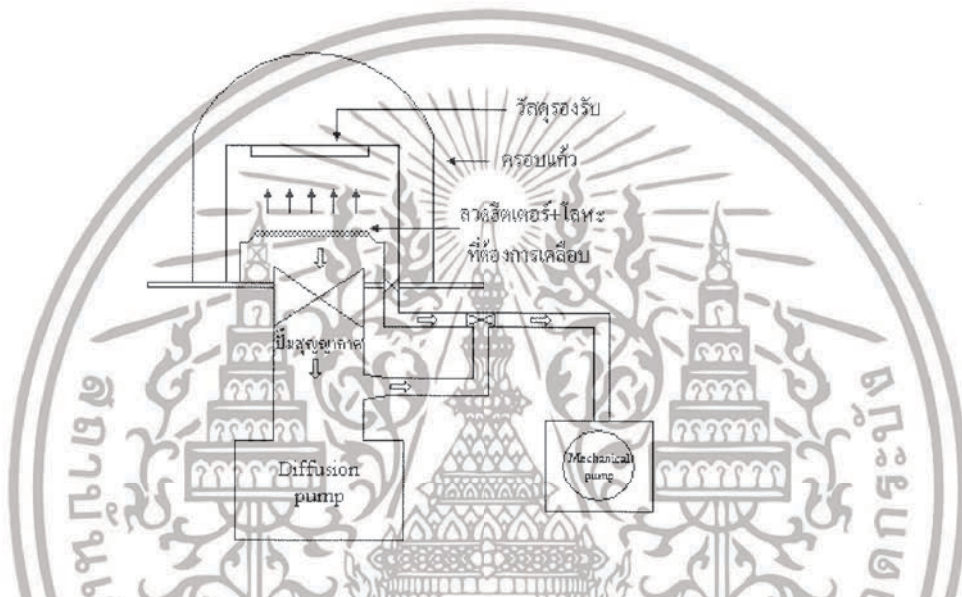
ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวด้วยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนตามลำดับขั้นตอนต่างๆจนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้จะยังคงแยกกันอยู่ในสภาพยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้จำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Meltalztion Process) ก่อน

กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Meltalztion Process) คือกระบวนการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า หรือ แถบตัวนำเชื่อมต่อกายใน สำหรับการเลือกโลหะเพื่อใช้เคลือบบนแผ่นซิลิคอนเพื่อให้เป็นรอยต่อโอห์มมิครอยต่อโอห์มมิก (Ohmic contact) หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อกายใน ของวงจรรวมควรมีคุณสมบัติ เช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับผิวซิลิคอนไดออกไซด์ และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ได้แก่ อะลูมิเนียม(AL), ทอง(Au) และเงิน Ag เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคในกระบวนการเมทัลโลเซชันใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศ โดยใช้เทคนิคกระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลของการแพร่กระจายไอออนแต่มีข้อเสียที่อายุการใช้งานของไส้หลอดจะสั้น สำหรับการเคลือบโลหะนั้น ทำได้โดยทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจากไส้ที่ทำจากทังสเตน (Tungstan) หรือ โมลิบดีนัม (Molybdenum)

เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

เมื่อไส้หลอดถูกทำให้ร้อน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไหลผ่านไส้ เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้ หลอมตั้งเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอฟุ้งกระจาย เคลือบแผ่นสลิคซิลิคอนที่วางใน Chamber

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า ระเหยเป็นไอก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ไส้ต้องพิจารณาให้มีขนาดพอเหมาะ สมกับสารที่จะใช้ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการและพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร AL, Au, Ag, Pd เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 โครงสร้างของเมกนีโทรีซิสเตอร์



รูปที่ 3.11 รูปโครงสร้างมุมมองด้านบนของเมกนีโทรีซิสเตอร์

รูปที่ 3.12 รูปโครงสร้างภาคตัดขวางของเมกนีโทรีซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของแมกนีโตริซิสเตอร์ ประกอบไปด้วย แผ่นซิลิกอน ชนิด N^- , P^- , อลูมิเนียม (Al) ซึ่งแผ่นซิลิกอน ชนิด N^- จะทำหน้าที่เป็นฐานรอง และเราจะแพร่โบรอน(B) ลงไปในเนื้อสาร N^- เพื่อทำปอ P^- และมีอลูมิเนียม (Al) เป็นขั้วคอนแทค และพาดบนโบรอน

ในการออกแบบแมกนีโตริซิสเตอร์นั้น จะใช้หลักการ Geometrical Magnetoresistance Effect คือ ใช้รูปทรงของอุปกรณ์เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน การทำงานของแมกนีโตริซิสเตอร์ จะใช้โหมดการทำงานปรากฏการณ์ฮอลล์แบบกระแส (Current mode) โดยใช้แรงลอเรนซ์หักเหทิศทางการกระแส ในโหมดการทำงานนี้ต้องออกแบบให้อุปกรณ์มีความสั้น หรือมีความกว้างมากกว่าความยาว เพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่าค่าแรงลอเรนซ์ ทำให้กระแสเกิดการหักเห การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานด้วยวิธีนี้ ค่าความต้านทานจะมีค่ามากขึ้นเสมอ

ดังนั้นเราจึงออกแบบให้อุปกรณ์ (แมกนีโตริซิสเตอร์) มีความสั้น หรือ มีความกว้างมากกว่าความยาว เพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำ มีค่าน้อยกว่าค่าแรงลอเรนซ์ ทำให้กระแสหักเห ส่งผลให้ค่าความต้านทานมากขึ้น

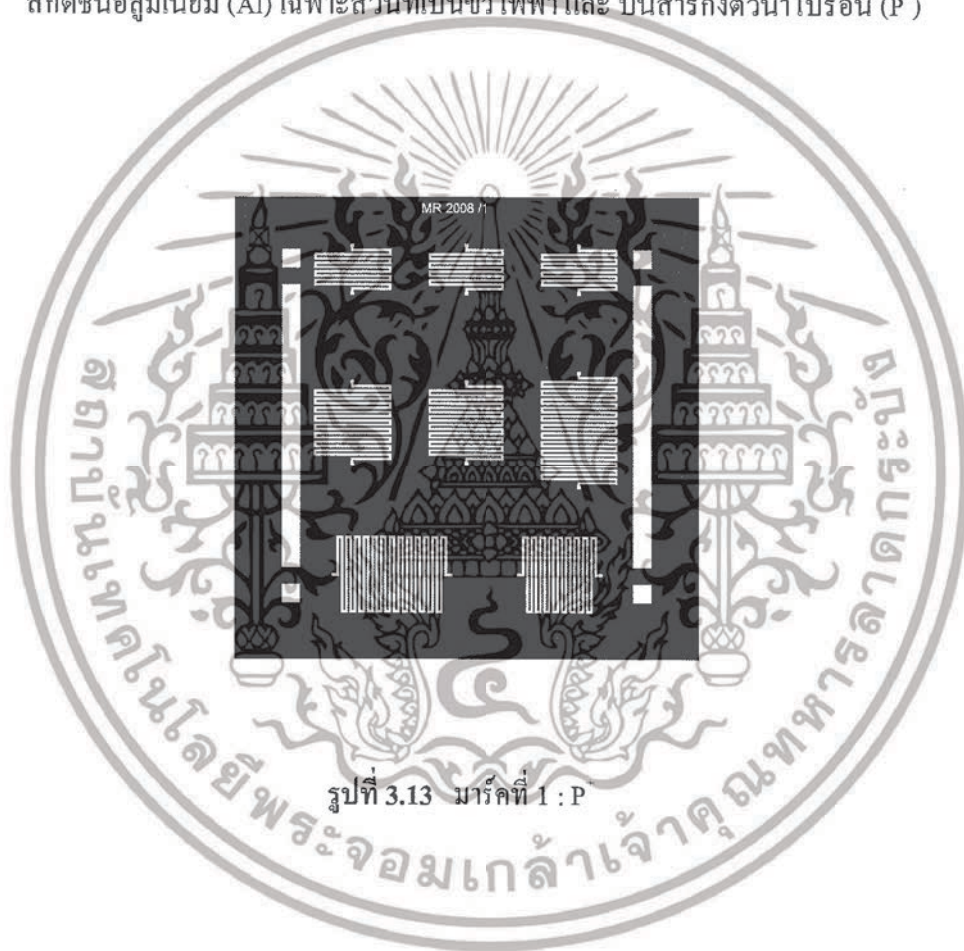


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การออกแบบแมกนีโทรีซิสเตอร์

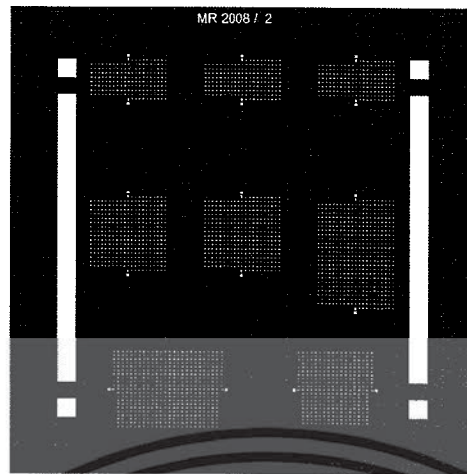
การออกแบบ จะทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 3 มาร์ค ซึ่งประกอบไปด้วย

- มาร์คที่ 1 : P^- , โดยการเปิดช่องอ็อกไซด์ และแพะอะตอมสารเจือ โบรอน เพื่อทำ (P^-)
- มาร์คที่ 2 : Contact Windows Mask , เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัส ระหว่าง อลูมิเนียม (Al) กับสารกึ่งตัวนำ เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า
- มาร์คที่ 3 : Aluminum Mask , เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน เพื่อสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al) เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า และ บนสารกึ่งตัวนำโบรอน (P^-)



รูปที่ 3.13 มาร์คที่ 1 : P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 มาร์คที่ 2 : Contact Windows Mask



รูปที่ 3.15 มาร์คที่ 3 : Aluminum Mask

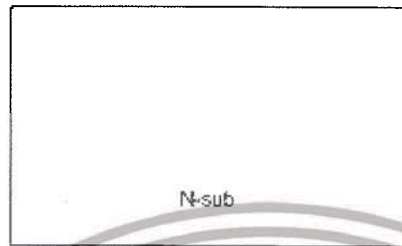
3.8 กระบวนการสร้างแมกนีโทรีซิสเตอร์

3.8.1 กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process)

- เตรียมแผ่นฐานรองซิลิกอนผลึกรูปเดี่ยว ชนิดเอ็น หนาบ (100)
- ดั้มใน Trichloethylenc 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- รุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- อบไล่ความชื้น 20 นาที



รูปที่ 3.16 แผ่นฐานรองซิลิกอน ชนิดอื่น ระบาย (100)

3.8.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min ที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc/min ที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min ที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ 1 ชั่วโมง

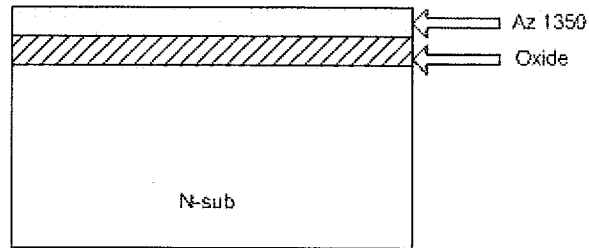


รูปที่ 3.17 ชั้นออกไซด์บนแผ่นฐานรองซิลิกอน

3.8.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 1

- อบที่ไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ $95^\circ C$ 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง AZ1350 Spin ที่ 3000 rpm 30 วินาที
- Prebake ด้วยการอบแผ่นซิลิกอนในเตาอบ ที่อุณหภูมิ $95^\circ C$ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอน

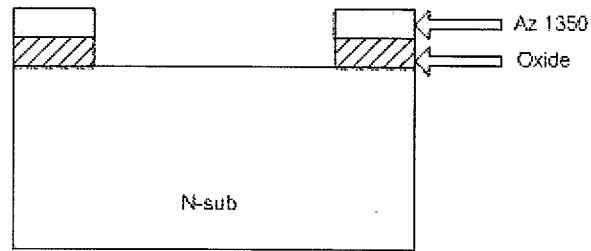
- นำแผ่นซิลิกอนไปทำการ Mask Alignment มาร์คที่ 1
- ทำการ Expose ประมาณ 7 วินาที
- Development AZ1350 โดย นำแผ่นซิลิกอนจุ่มลงใน AZ Developer I และ II อย่างละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที จนสะอาด
- Prebake ในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 95° C 15 นาที



รูปที่ 3.19 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 1

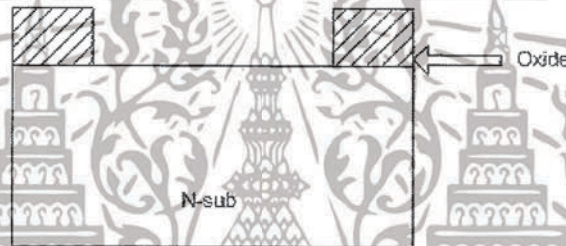
- Etching ด้วย Buffer (HF : NH₄F = 1 : 6) จนอ็อกไซด์ถูกลอกออกจนหมด
- นำแผ่นซิลิกอนจุ่มลงในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 แผ่นซิลิกอนที่ผ่านการ Etching แล้ว

- ล้าง AZ1350 ด้วยการจุ่มแผ่นซิลิกอนลงใน Actone 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- แล้วล้างด้วยน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

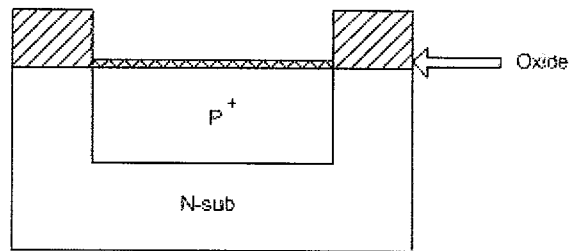


รูปที่ 3.21 แผ่นซิลิกอนเมื่อทำการล้างน้ำยาไวแสง AZ1350 ออกแล้ว

3.8.4 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion Process)

- ทำการ Activate โบรอนด้วย O_2 100 cc/min 20 นาที
- Flow N_2 800 cc/min ที่อุณหภูมิ $1000^\circ C$ 20 นาที
- Flow O_2 1200 cc/min ที่อุณหภูมิ $1000^\circ C$ 5 นาที
- ทำการ Drive in โดย
- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min ที่อุณหภูมิ $1000^\circ C$ 30 นาที
- Wet ด้วย O_2 1000 cc/min ที่อุณหภูมิ $1000^\circ C$ 30 นาที
- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min ที่อุณหภูมิ $1000^\circ C$ 30 นาที

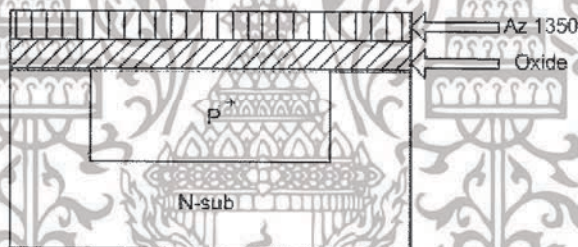
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 แผ่นซิลิกอนที่ทำการ Drive in แล้ว

3.8.5 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 2

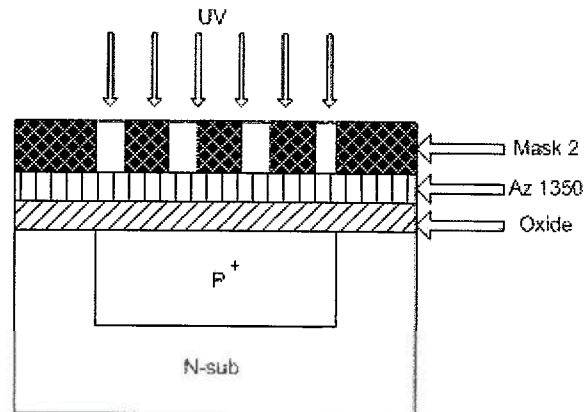
- อบที่ไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง AZ1350 Spin ที่ 3000 rpm 30 วินาที
- Prebake ด้วยการอบแผ่นซิลิกอนในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 95°C 20 นาที



รูปที่ 3.23 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอน เพื่อทำการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 2

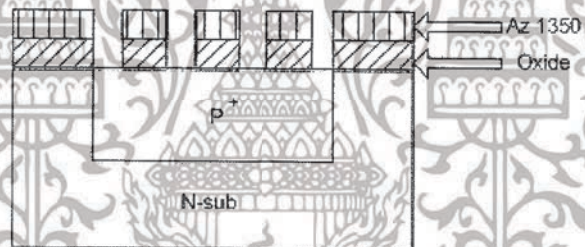
- นำแผ่นซิลิกอนไปทำการ Mask Alignment มาร์คที่ 2
- ทำการ Expose ประมาณ 7 วินาที
- Development AZ1350 โดย นำแผ่นซิลิกอนจุ่มลงใน AZ Developer I และ II อย่างละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- Prebake ในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 95°C 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 2

- Etching ด้วย Buffer (HF : NH₄F = 1 : 6) 5 นาที
- นำแผ่นซิลิกอนจุ่มลงในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

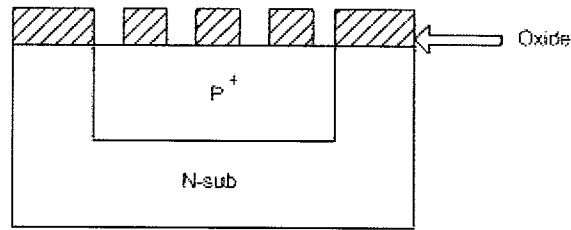


รูปที่ 3.25 แผ่นซิลิกอนที่ผ่านการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

มาร์คที่ 2

- ล้าง AZ1350 ด้วยการจุ่มแผ่นซิลิกอนลงใน Actone 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- แล้วล้างด้วยน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

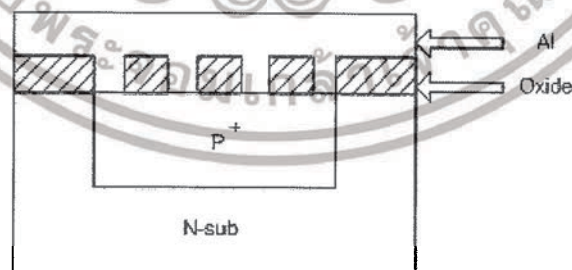
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 แผ่นซิลิกอนเมื่อทำการล้างน้ำยาไวแสง AZ1350 ออกแล้ว

3.8.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metalization Process)

- ทำการเคลือบอลูมิเนียมบนแผ่นซิลิกอนด้วยเทคนิค Filament Evaporation
- ตัดลวดอลูมิเนียม ขาวประมาณ 1 เซนติเมตร
- นำลวดอลูมิเนียมไปจุ่มใน Hydrofluoric 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบที่อุณหภูมิ 95°C 15 นาที
- วางแผ่นซิลิกอนลงบน Chamber ของเครื่อง Evaporation ที่ตำแหน่งที่เหมาะสม
- ปิดวาล์วของ Chamber ทำการสูดอากาศ 30 นาที
- ทำการเคลือบโลหะลงแผ่นซิลิกอน 6 ชั่วโมง ระหว่างนั้น ต้องเติมไนโตรเจนเหลวทุกๆ ครึ่งชั่วโมง
- หยุดทำการเคลือบโลหะ ปล่อยให้ทุกอย่างใน Chamber เย็นตัวลง
- ปล่อยอากาศเข้าไปใน Chamber อย่างช้าๆ จนความดันปกติ



รูปที่ 3.27 แผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเคลือบอลูมิเนียมแล้ว

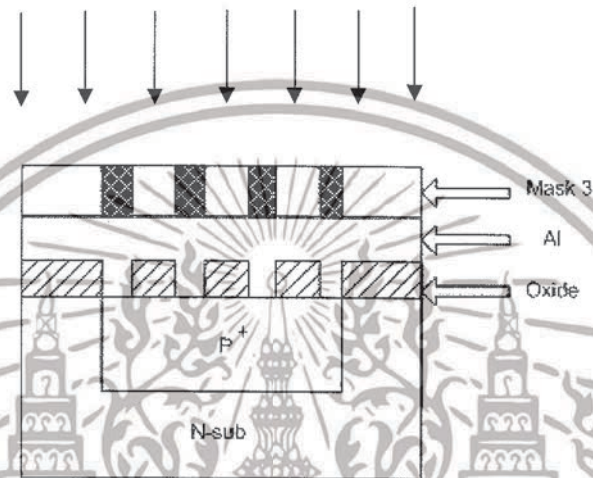
3.8.7 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 3

- อบที่ไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95°C 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เคลื่อนย้ายไอแสง AZ1350 Spin ที่ 3000 rpm 30 วินาที
- Prebrake ด้วยการอบแผ่นซิลิกอนในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 95°C 20 นาที
- นำแผ่นซิลิกอนไปทำการ Mask Alignment มาร์คที่ 3
- ทำการ Expose ประมาณ 7 วินาที

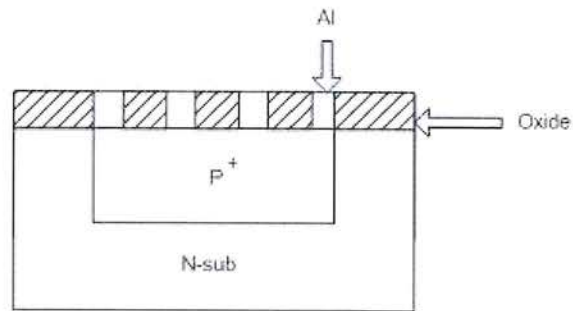
UV



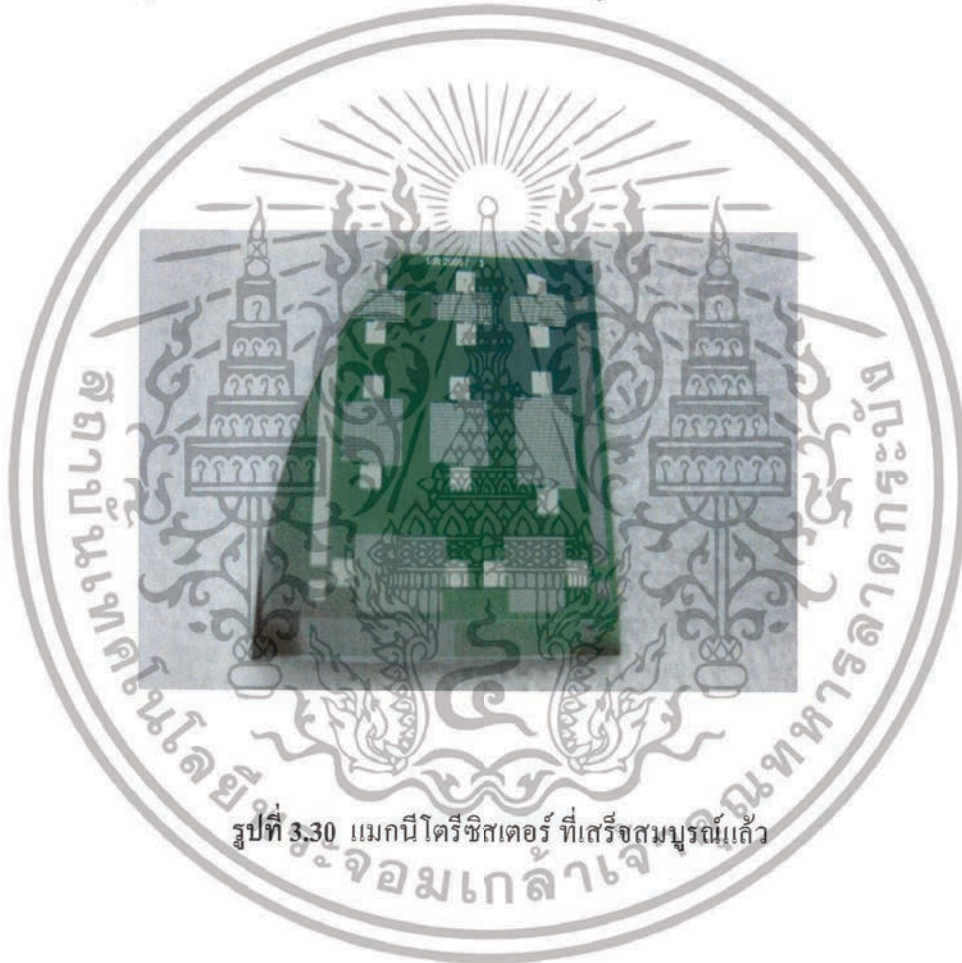
รูปที่ 3.28 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) มาร์คที่ 3

- Development AZ1350 โดย นำแผ่นซิลิกอนจุ่มลงใน AZ Developer I และ II อย่างละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที จนสะอาด
- Prebrake ในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 95°C 15 นาที
- Etching ด้วย Buffer ($\text{HF} : \text{NH}_4\text{F} = 1 : 6$) จนอัลลอยด์ถูกลอกออกจนหมด
- นำแผ่นซิลิกอนจุ่มลงในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ล้าง AZ1350 ด้วยการจุ่มแผ่นซิลิกอนลงใน Actone 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- แล้วล้างด้วยน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 แผ่นซิลิกอนที่ทำการสักรัดชั้นอลูมิเนียมเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.30 แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

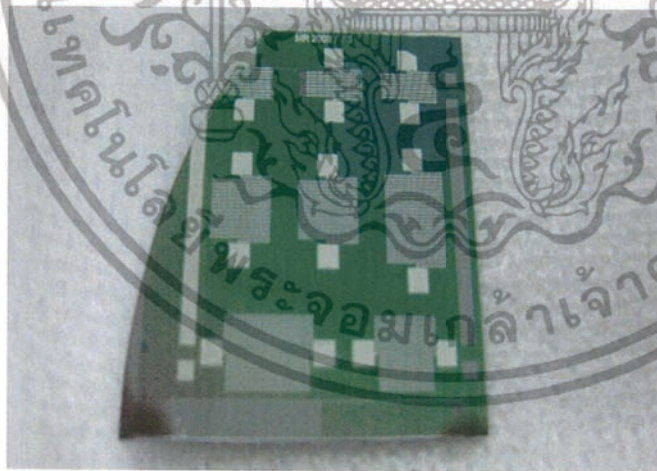
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และ ผลการทดลอง

จากการศึกษาหลักการของปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ (Magnetoresistance Effect) ซึ่งเป็นการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตริซิสเตอร์ จากหลักการดังกล่าวทำให้ทราบว่า แมกนีโตริซิสเตอร์สามารถอาศัยหลักการของปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ (Magnetoresistance Effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ (Magnetoresistance Effect) จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะ ทำให้ประจุพาหะ เบี่ยงเบน ส่งผลให้กระแสเบี่ยงเบน ทำให้ค่าความต้านทานของแมกนีโตริซิสเตอร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถนำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กได้

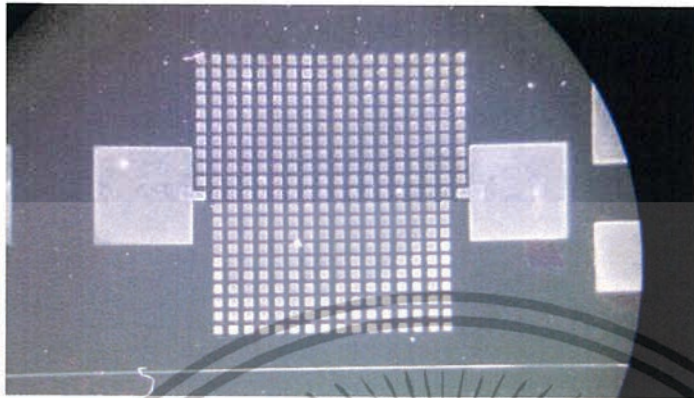
ในบทนี้จะแสดงการทดลองและผลการทดลองของแมกนีโตริซิสเตอร์ โดยเมื่อเราสร้าง แมกนีโตริซิสเตอร์ เสร็จสมบูรณ์แล้ว เราจะนำมาวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน (I-V Characteristic) ของริซิสเตอร์ ด้วยเครื่อง Curve Tracer และ นำแมกนีโตริซิสเตอร์ ไปวัดการ ตอบสนองสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.1 แมกนีโตริซิสเตอร์ ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

จากรูปที่ 4.1 เป็นรูปแมกนีโตริซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว โดยจะมีแมกนีโตริซิสเตอร์ทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งแต่ละตัวจะมีค่าความต้านทานไม่เท่ากัน ตัวบนด้านซ้ายมือจะเสีย เนื่องจาก รูปทรงของแผ่นซิลิกอน

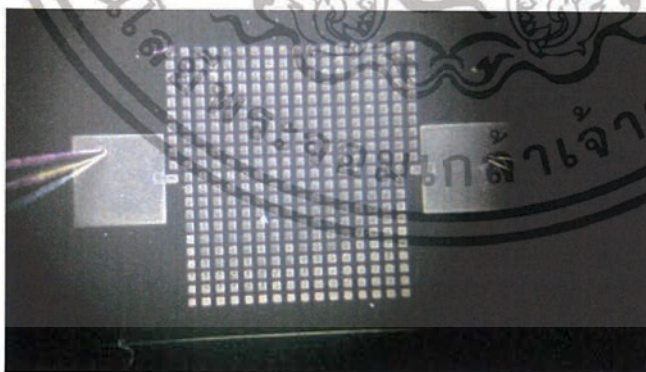
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างภายในของแมกนีโตรีซิสเตอร์ โดยการถ่ายภาพอย่างละเอียด

จากรูปที่ 4.2 เป็นการถ่ายภาพผ่านกล้องของเครื่องวัด Curve Tracer โดยที่รูปสี่เหลี่ยมจตุรัสเล็กคืออคูมินีม และสี่เหลี่ยมจตุรัสรูปใหญ่ที่อยู่ด้านข้างคือ ขั้ว Contact โดยเมื่อนำไปใช้งานจะต่อขั้วจากจุดนี้

4.1 การวัดคุณสมบัติของแมกนีโตรีซิสเตอร์



รูปที่ 4.3 แสดงการวัดแมกนีโตรีซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 เป็นรูปแสดงการวัดจากขั้ว Contact ซึ่งจะเห็นปลายเข็มที่ใช้วัด สัมผัสกับขั้ว Contact ของแมกนีโตรีซิสเตอร์ ในขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังในการปรับเข็มวัด เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเสียหาย และ เข็มของ โพรบหัก งอ

หลังจากที่เราทำการวัดคุณสมบัติของแมกนีโตรีซิสเตอร์แล้ว เราจะนำแผ่นซิลิกอนที่สร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ที่เสร็จแล้ว มาตัดแยกตัวแมกนีโตรีซิสเตอร์ โดยใช้ปากกาหัวเพชรในการตัดชิ้นงาน ซึ่งในขั้นตอนการตัดแผ่นซิลิกอนนั้นต้องมีความแม่นยำ และระมัดระวังอย่างมาก เพราะถ้าไม่ระวังจะทำให้แผ่นซิลิกอนแตก หัก ทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ หลังจากที่เราตัดแมกนีโตรีซิสเตอร์ออกมาเป็นตัวๆแล้ว เราจะนำตัวแมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ตัดมาวางลงบนฐานทองแผ่นปริน PCB และทำการต่อลวดทองแดงกับขั้ว Contact ของแมกนีโตรีซิสเตอร์ โดยใช้กาวเงินเป็นตัวประสาน เพื่อให้ลวดทองแดงและขั้ว Contact เชื่อมต่อกัน

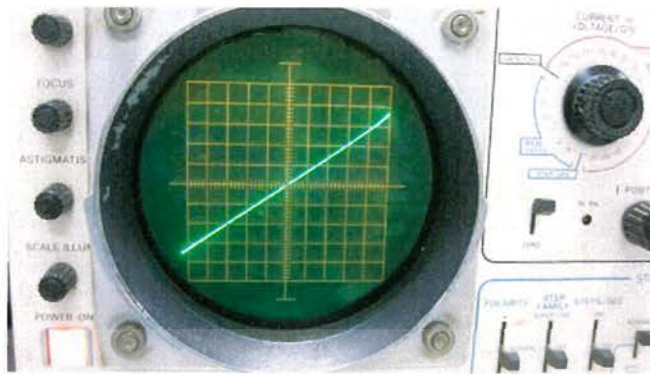


รูปที่ 4.4 แสดงรูปของแมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ทำการต่อขั้ว Contact แล้ว

(Packaging)

การวัดคุณสมบัติของแมกนีโตรีซิสเตอร์ เป็นการวัดทดสอบเบื้องต้น แสดงคุณสมบัติของรีซิสเตอร์ ซึ่งได้จากกราฟการทดลองดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

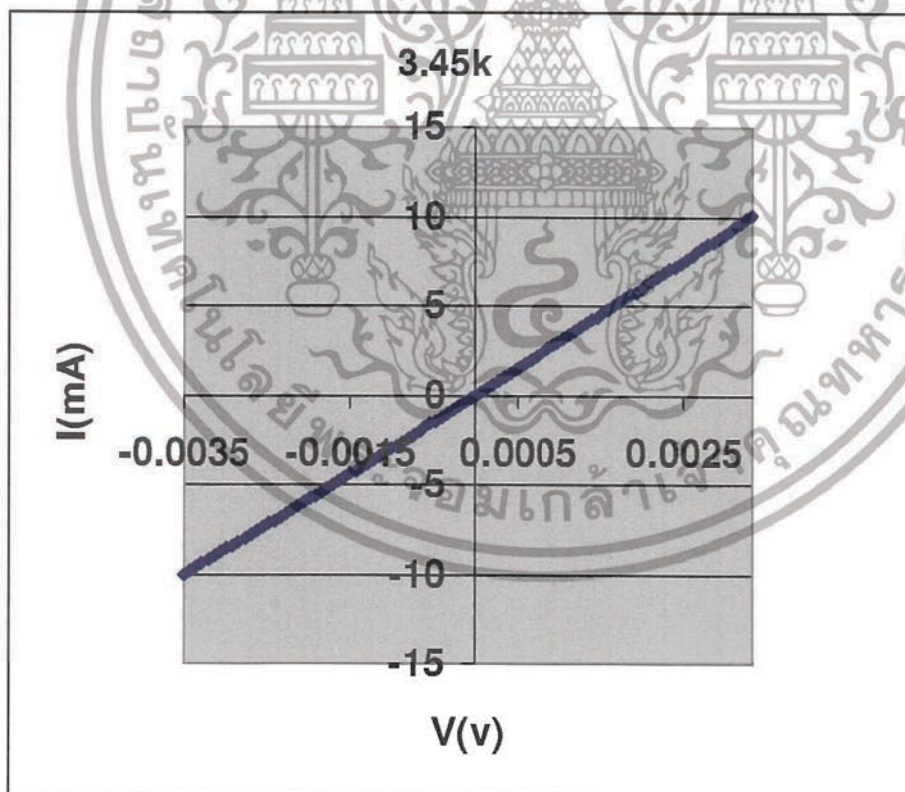


$$V/D = 2 \text{ v/div}$$

$$I/D = 1 \text{ mA/div}$$

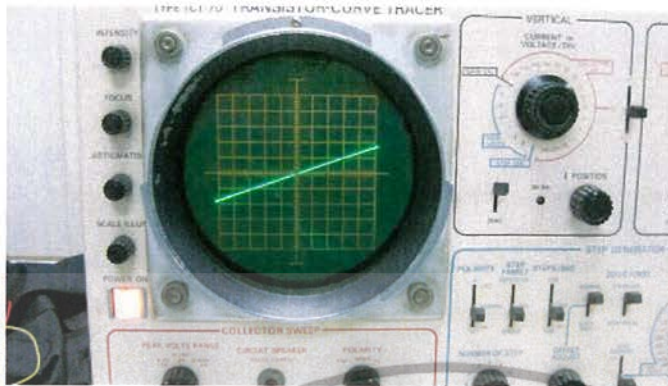
$$R = 3.45 \text{ k}\Omega$$

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรีซิสเตอร์ขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติที่ค่าความต้านทาน 3.45 กิโลโอมห์



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรีซิสเตอร์ขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ค่าความต้านทาน 3.45 กิโลโอมห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

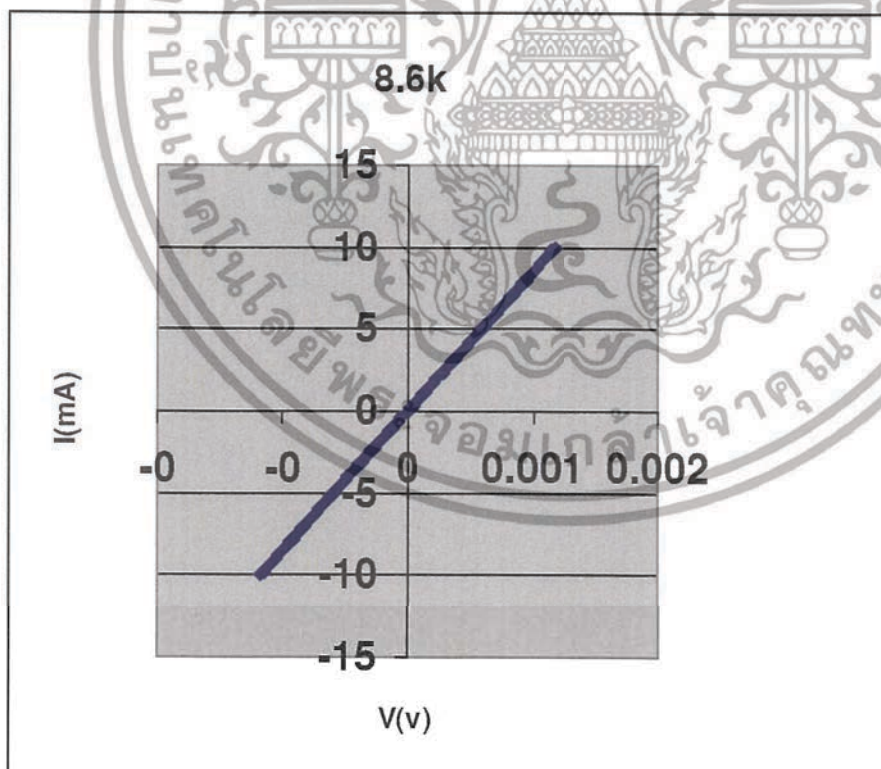


$$V/D = 2 \text{ v/div}$$

$$I/D = 1 \text{ mA/div}$$

$$R = 8.6 \text{ k}\Omega$$

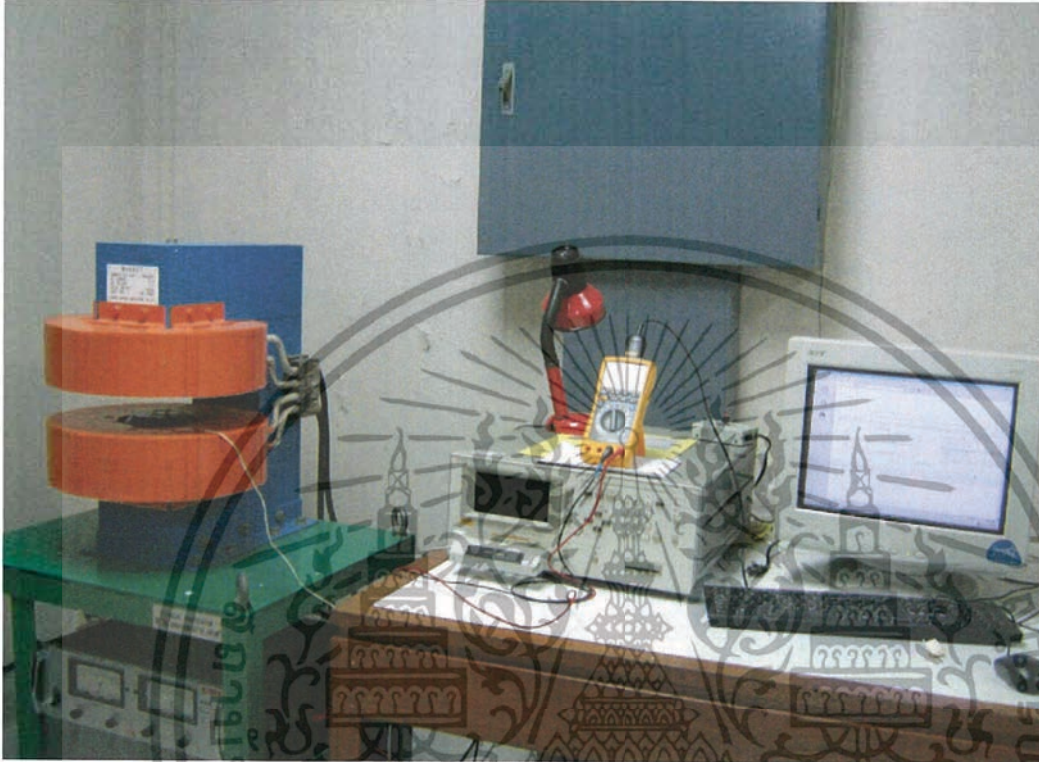
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรีซิสเตอร์ซึ่งได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ค่าความต้านทาน 8.6 กิโลโอมห์



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรีซิสเตอร์ซึ่งได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ค่าความต้านทาน 8.6 กิโลโอมห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

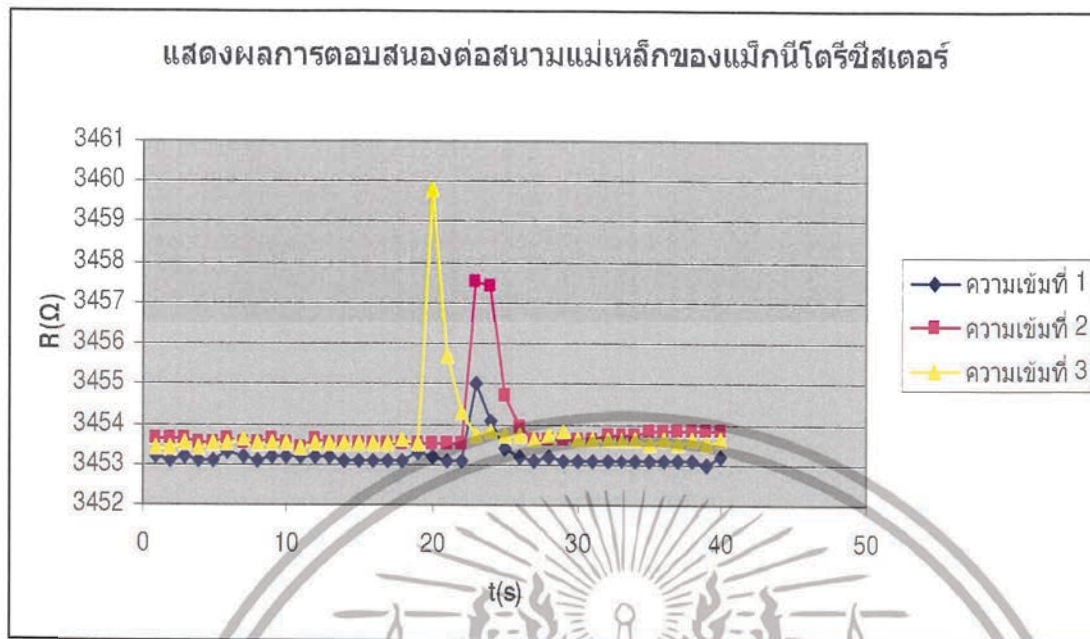
4.2 การวัดผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของแมกนีโตรีซิสเตอร์



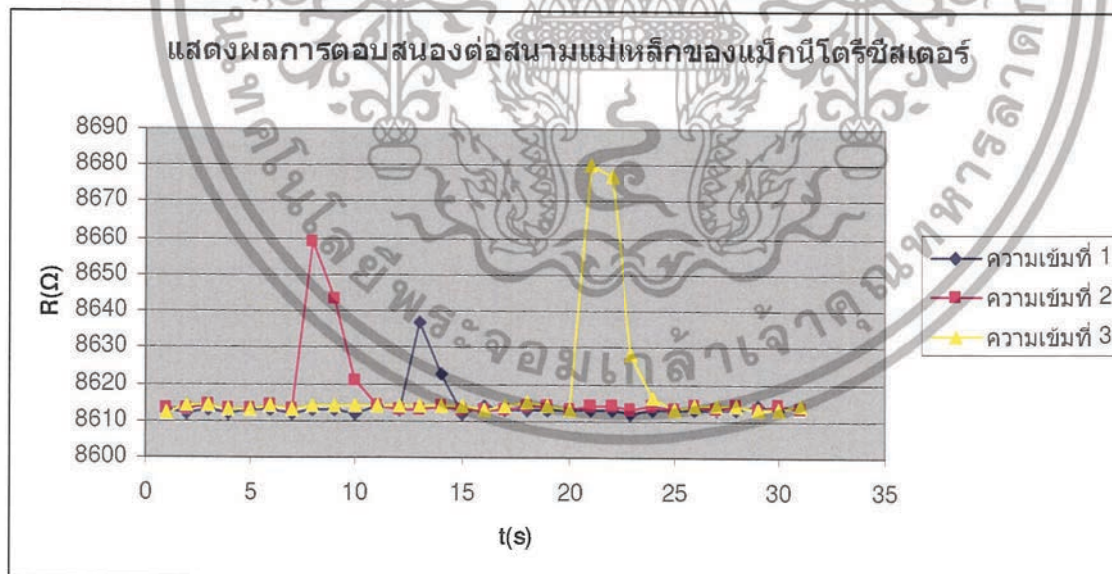
รูปที่ 4.9 รูปการวัดผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของแมกนีโตรีซิสเตอร์

สำหรับการวัดผลตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของแมกนีโตรีซิสเตอร์ เราใช้มิเตอร์วัดคร่อมที่ขาของแมกนีโตรีซิสเตอร์ แล้วปล่อยสนามแม่เหล็กจากเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ มิเตอร์จะนำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน แล้วส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Fluke View Forms บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงทุกๆ 1 วินาที แล้วนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

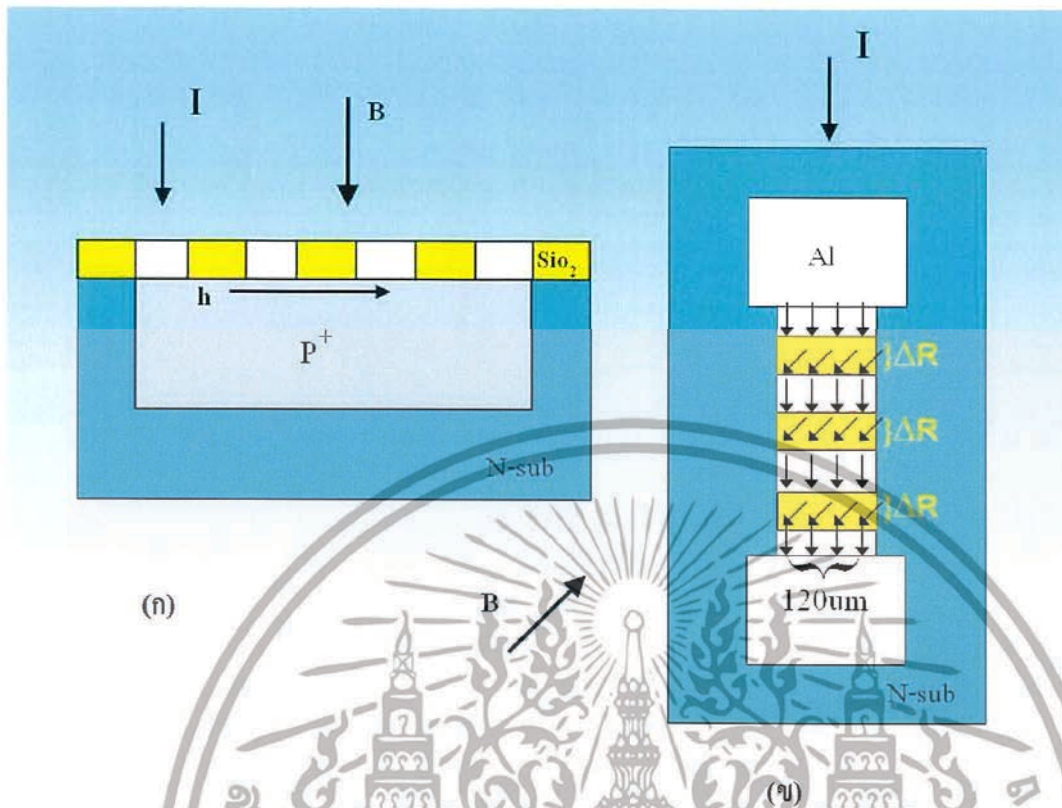


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของแมกนีโตรีซิสเตอร์
ที่ค่าความต้านทาน $3.45\text{ K}\Omega$ ที่ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 1500 เกาส์ ,3000 เกาส์ และ 4500
เกาส์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของแมกนีโตรีซิสเตอร์
ที่ค่าความต้านทาน $8.6\text{ K}\Omega$ ที่ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 1500 เกาส์ ,3000 เกาส์ และ 4500 เกาส์
ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รูปโครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (ก) รูปภาคตัดขวางของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ข) รูปด้านบนของแมกนีโตรีซิสเตอร์

จากผลการทดลอง เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแมกนีโตรีซิสเตอร์ ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าของแมกนีโตรีซิสเตอร์ ทำให้ด้านตรงข้ามมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่า จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ และมีแรงดันฮอลล์เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันฮอลล์จะมีขนาดเท่ากับแรงลอเรนซ์ จึงทำให้แรงดันฮอลล์ดึงโฮลกลับมาเคลื่อนที่ตามเดิม จึงทำให้ค่าความต้านทานกลับมาเท่าเดิม

และยังพบว่าแมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีจำนวนเซลล์มากกว่า จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานมากกว่าแมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีจำนวนเซลล์น้อยๆ เพราะว่าค่าความต้านทานหลังจากที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน เท่ากับ ค่าความต้านทานเดิมบวกกับค่าความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ตามสมการนี้

$$R_{\text{magnetoresistor}} = R + \Delta R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 เป็นแนวทางการแก้ไข โดยจากรูป (ก) กระแสบางส่วนสามารถไหลผ่าน ด้านล่างตรงส่วนที่เป็น P⁻ ได้ ทำให้เปรียบเสมือนเป็นตัวต้านทานธรรมดาทั่วไป ถ้าเราออกแบบ ใหม่ให้เป็นตามรูป (ข) คือแยกส่วนที่เป็น P⁻ ออกจากกัน และเชื่อมต่อกับขอลูมิเนียมเนื้ขมด้านบน จะทำให้เสมือนเป็นตัวต้านทานหลายๆตัวต่ออนุกรมกัน



รูปที่ 5.2 การออกแบบแมกนีโตริซิสเตอร์ที่สามารถให้ค่าความต้านทานคงที่

ควรออกแบบให้ตัวแมกนีโตริซิสเตอร์แต่ละเซลล์ให้มีความกว้าง (W) มากๆและความยาว (L) ควรจะสั้นมากๆ เพราะในกรณีนี้ที่แมกนีโตริซิสเตอร์มีความกว้างมากกว่าความยาว แรงดันฮอลล์จะเหนี่ยวนำไม่เต็มที่ ส่งผลให้เกิดมุมฮอลล์ที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้แรงลอเรนซ์มีค่ามากกว่าค่าแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ จะทำให้แมกนีโตริซิสเตอร์สามารถคงค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นไว้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] H. P. Baltes and R. S. Popovic, "Integrated semiconductor magnetic field sensors," IEEE, vol. 74, 1986.
- [2] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35, 1990.
- [3] L. Ristic (ed), **Sensor Technology and Devices**, Artech House, Norwood, 1994
- [4] Julian W. Gardner, **Microsensors Principles and Application**, John Wiled & Sons, Chichester, 1994, Ch. 8, pp. 199-220.
- [5] Boll. R and Overshott KT (1998) **Sensors: A Comprehensive Survey**, vol. 5: Magnetic Sensors (eds.w.Gopel, J. Hesse and J.N.Zemel), VCH Publishers In, Germany, 513 pp.
- [21] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช " เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม " แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

1. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน

Properties of Si at 300 K	
Properties	Si
Atoms/cm ³	5.0×10^{22}
Atomic weight	28.09
Breakdown field, V/cm	$\sim 3 \times 10^5$
Crystal Structure	Diamond
Density, g/cm ³	2.328
Distance between neighboring atoms, nm	0.2328
Effective density of states	
Valence band, cm ³	1.04×10^{19}
Conduction band, cm ³	2.8×10^{19}
Effective mass, m [*] /m ₀	
Electron	$m_e^* = 0.98$
	$m_c^* = 0.19$
Holes	$m_{lh}^* = 0.16$
	$m_{hh}^* = 0.49$
Electron affinity, V	4.05
Energy gap, eV	1.12
Index of refraction	3.42
Intrinsic carrier concentration, cm ⁻³	1.45×10^{10}
Intrinsic Debye length, μm	24
Intrinsic resistivity, W-cm	2.3×10^5
Lattice constant, nm	0.5431
Linear coefficient of thermal expansion, cm/(cm-K)	2.6×10^{-6}
Melting point, °C	1415

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Properties	Si
Minority-carrier lifetime, s	2.5×10^{-3}
Mobility, $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	
Electron	1500
Holes	475
Optical phonon energy, eV	0.063
Phonon mean free path, nm	7.6 (electron) 5.5 (hole)
Poisson's ratio	0.42
Relative permittivity	11.9
Specific heat, J/(g·K)	0.7
Thermal conductivity, W/(cm·K)	1.5
Thermal diffusivity, cm^2/s	0.9
vapor pressure, Pa	1 at 1659 °C 10^{-6} at 900 °C
Young's modulus, g/cm	1.089×10^9

2. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิกอนไดออกไซด์

Properties of SiO ₂ at 300 K	
Properties	SiO ₂
Density, g/cm^3	2.2
DC resistivity, $\mu\text{m}\cdot\text{cm}$	10^{14} - 10^{16}
Dielectric strength, V/cm	$\sim 10^7$
Energy gap, eV	9
Infrared absorption band, μm	9.3
Melting point, °C	~ 1600
Refraction index	1.46
Relative permittivity (dielectric constant)	3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Properties of SiO ₂ at 300 K	
Properties	SiO ₂
Structure	Amorphous
Thermal expansion coefficient, K ⁻¹	5×10 ⁻⁷
Thermal conductivity, W/(cm.K)	0.014



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้