

กรมทอสมุคคอง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานโครงการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีงบประมาณ 2550

เรื่อง  
เครื่องวัดความเร็วรอบมอเตอร์โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ 3 ขา  
Round Speed Meter by 3 Terminal Magnetotransistor

RCH  
TK  
7871-96  
B55  
๓๓๑๑

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 84589  
วัน,เดือน,ปี..... 22 ต.ค. 2551

โดย  
รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

1199 ๕๕๕๕  
b.....  
i.....

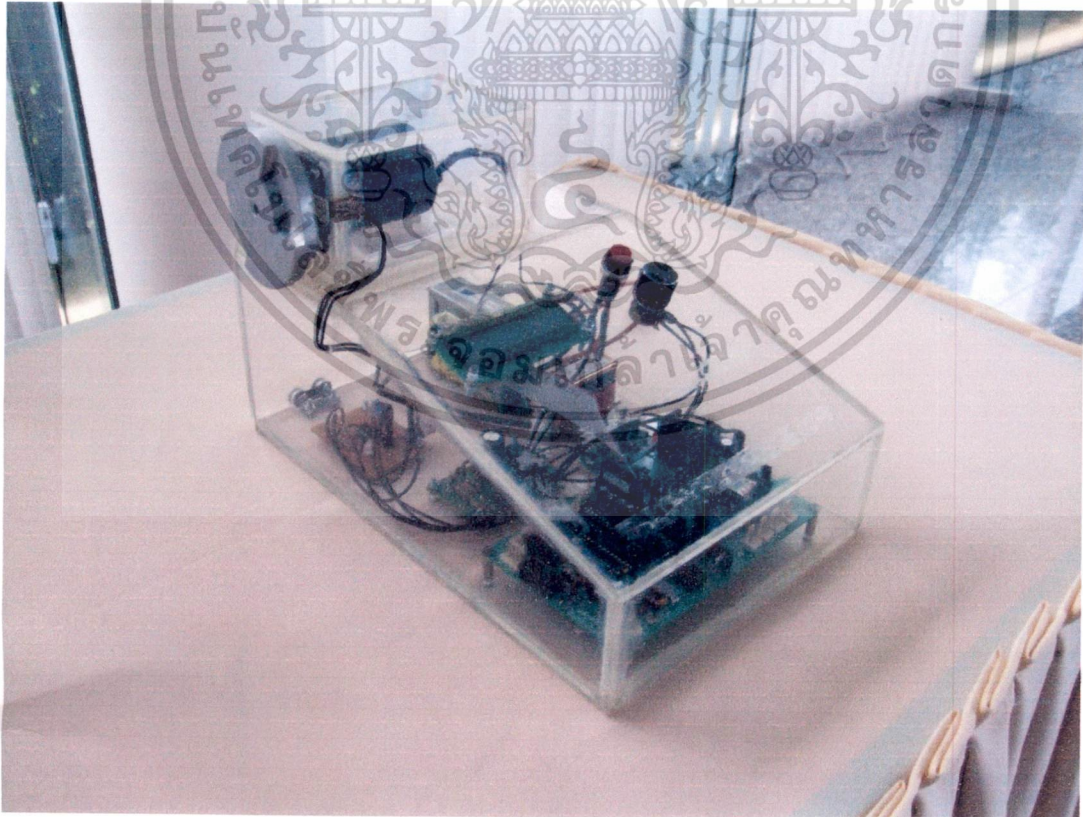
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เครื่องวัดความเร็วรอบมอเตอร์โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์

## แบบสามขา

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้งานเพื่อวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ตัวหัววัดแม่เหล็กชนิดแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำการออกแบบและสร้างขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ การทำงานอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยแรงลอเรนซ์จะกระทำต่อประจุพาหะที่ไหลในตัวทรานซิสเตอร์ทำให้กระแสเบี่ยงเบนทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสกับพาหะที่สะสมในคอลเลคเตอร์ ในส่วนของตัวเครื่องวัดความเร็วรอบอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรที่ติดอยู่กับตัวมอเตอร์ตัดกับตัวหัววัดแมกนีโตทรานซิสเตอร์ สัญญาณที่ตรวจจับได้ถูกขยายและปรับแต่งสัญญาณนำไปประมวลผลและแสดงค่าเป็นความเร็วรอบมอเตอร์ออกจอแสดงผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ ขอขอบคุณนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา นายเจริญมิตร วรเดช และนักศึกษาระดับปริญญาตรี นายนฤพล เชียงนิยม และนายชาญวิทย์ โชติภูมิ เวทย์ ที่มีส่วนในงานครั้งนี้

รศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	6
2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)	8
2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์	8
2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	14
2.2 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor)	17
2.3 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)	19
2.4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)	20
2.4.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง	20
2.4.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน	22
2.4.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	24
2.5 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์	25
บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์	29
3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา	29
3.1.1 การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection)	31
3.1.2 กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (Modulation Current Injection)	34
3.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	39
3.2.1 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	39
3.2.2 โครงสร้างสองตัวรวมกระแส	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์	45
4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กเหล็ก	45
4.1.1 ภาคขยาย	46
4.2 ส่วนแสดงผล	47
4.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์	47
4.3 วงจรวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงผลออกจอ LCD	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	56



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่	
รูปที่ 2.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ	6
รูปที่ 2.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	8
รูปที่ 2.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	9
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการได้ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก	11
รูปที่ 2.5 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	14
รูปที่ 2.6 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวคิง	15
รูปที่ 2.7 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวคิง	16
รูปที่ 2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง	17
รูปที่ 2.9 เอ้าท์พุทของเจ็มทิสแม่มเหล็ก	17
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตริซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม	18
รูปที่ 2.11 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด	19
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS	20
รูปที่ 2.13 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวคิง	21
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน	22
รูปที่ 2.15 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$	23
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	24
รูปที่ 2.17 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเบี่ยงเบน $\theta_H$	24
รูปที่ 2.18 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ	26
รูปที่ 2.19 ฮีสเตอร์ซิสติสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม	27
รูปที่ 3.1 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา	29
รูปที่ 3.2 ภาพด้านแสดงมิติ โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา	30
รูปที่ 3.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในมุมเบี่ยงเบน $\theta$	31
รูปที่ 3.4 (ก) เส้นศักย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์ และ (ข) แรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ	33
รูปที่ 3.5 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว $L$ ของอุปกรณ์ฮอลล์	33
รูปที่ 3.6 การลดลงของความยาว $L$ ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า	34
รูปที่ 3.7 กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากผลของกระแสการหนีตจากการมอดดูเลท	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8 โปรแกรม COREL DRAW สำหรับการออกแบบลวดลายต้นแบบ	36
รูปที่ 3.9 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำการออกแบบที่ค่า W และค่า L ต่างๆ	37
รูปที่ 3.10 ลวดลายต้นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา	38
รูปที่ 3.11 รูปโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	39
รูปที่ 3.12 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	39
รูปที่ 3.13 ด้านตัดขวาง โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแบบสองตัวรวมกระแส	41
รูปที่ 3.14 ลวดลายต้นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	44
รูปที่ 4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	45
รูปที่ 4.2 โครงสร้างและการต่อใช้งาน	46
รูปที่ 4.3 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง	46
รูปที่ 4.4 แสดงการจัดขาสัญญาของ T89C51AC2	48
รูปที่ 4.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ T89C51AC2	49
รูปที่ 4.6 บอร์ดที่ใช้ในการทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์	49
รูปที่ 4.7 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับจอ LCD	51
รูปที่ 4.8 วงจรวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงผลออกหน้าจอ LCD	52

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่	
ตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ	7
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ	28
ตารางที่ 4.1 แสดงไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่างๆ	48





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการวิจัยพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างต่อเนื่อง เช่น อุปกรณ์ตรวจจับแสง อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ฯลฯ การพัฒนาโครงสร้างและการทำงานเพื่อนำมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงเป็นอีกบทบาทของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น ไดโอด, ทรานซิสเตอร์, มอสเฟต ฯลฯ โดยอุปกรณ์เหล่านี้อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาณรบกวนที่เอาต์พุตมีค่าต่ำ, สามารถใช้งานกับวงจรรวมได้และสามารถประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้หลากหลาย [1]

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่นำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเรียกอีกแบบว่า แมกนีโตทรานซิสเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magnetotransistor) และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (lateral magnetotransistor) โดยปกติแล้วโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ประกอบด้วย คอลเลคเตอร์สองขา, อิมิตเตอร์หนึ่งขาและขั้วเบสสองขา ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนเกิดความไม่สมดุลของกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์จะขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะและอัตราการผลิตพาหะของอิมิตเตอร์[1-4]

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนา โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ตามแนวนอน ศึกษาโครงสร้างปกติของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีขาใช้งานห้าขาพัฒนามาใช้ในโหมดการทำงานสามขาและทำการพัฒนาออกแบบเป็นสามขาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_c$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) [8-11] แต่โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เพียงทิศแนวตั้งและมีการไบอัสที่ยุงยาก ศึกษาการใช้งานสามขาตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว(recombination)ในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและ

กระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) ทำการออกแบบเปลี่ยนแปลงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้มีขาใช้งานสามขา ประกอบด้วย อิมิตเตอร์, เบสและคอลเลกเตอร์ ตรวจสอบสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ สามารถตรวจสอบสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน มีความเหมาะสมที่จะทำเป็นอุปกรณ์เดี่ยว (discrete) ได้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
2. ศึกษาและทำความเข้าใจขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์
3. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กแนวตั้ง
4. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอน
5. วิเคราะห์คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
6. ศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์, ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า
7. ศึกษาค่าความไวในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์และสามขา
8. ศึกษาค่าความไวในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา
9. ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดสามขา ในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

## 1.3 สมมติฐานการศึกษา

1. แมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างปกติห้าขา สามารถตรวจสอบสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างขึ้นอยู่กับกระเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection)และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท(modulation current injection)

2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาสามารถพัฒนาเพื่อใช้งานสามขาได้ ตรวจสอบสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ )

3. แมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างสามขา สามารถตรวจสอบสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ใน

เบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์( $\Delta I_{CB}$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection)

4. ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสการทำงานอิมิตเตอร์

5. การลดจำนวนขาใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์จากห้าเป็นสามขาสามารถ พัฒนาเพื่อทำเป็นอุปกรณ์เดี่ยว (discrete) ได้

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทมากที่สุดและถูกนำมาใช้งานต่างๆ ได้หลากหลาย การใช้ประโยชน์จากโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงเป็นอีกหนึ่งบทบาทของทรานซิสเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างปกติห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง แต่โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เพียงทิศทางเดียว อีกทั้งการพัฒนาโครงสร้างเพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอนเป็นไปได้ยาก จึงทำการศึกษาเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้เหลือเพียงสามขา โดยการทำงานอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว(recombination)ในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กสนามแม่เหล็กทั้งในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยที่ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กไม่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

#### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้โครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เรียกอีกแบบว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เริ่มศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างปกติห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง ศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาในการใช้งานสามขาและทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้เหลือเพียงสามขาเพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน วิเคราะห์คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ เปรียบเทียบเอาท์พุทที่พารามิเตอร์ต่างๆ และศึกษาความสัมพันธ์ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์รวมทั้งการนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดสามขาไปประยุกต์ใช้ในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์
  2. ศึกษา โครงสร้างและการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
  3. ศึกษากระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์
  4. ศึกษาคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์
  5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งที่เป็นผลต่อเอาท์พุท ( $\Delta I_C$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างห้าขา
  6. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนที่มีผลต่อเอาท์พุท ( $\Delta I_{CB}$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา
  7. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสการทำงานอิมิตเตอร์
- โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้
- บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก กล่าวถึง หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ และชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น อุปกรณ์ฮอลล์, แมกนีโตริซิสเตอร์, แมกนีโตไดโอดและแมกนีโตทรานซิสเตอร์
- บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ กล่าวถึง การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาโดยทำการออกแบบเปรียบเทียบความยาวเบส L และความกว้างระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง W ที่พารามิเตอร์ต่างๆ ทำการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาโดยออกแบบเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในรูปแบบสองตัวรวมกระแสและการออกแบบมาส์คของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาและสามขา

บทที่ 4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวถึง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ต่อร่วมกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ในการวัดค่าของสนามแม่เหล็ก โดยในส่วนของวงจรมันจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของ วงจรที่ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก และ ส่วนของภาคแสดงผล

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย เป็นการสรุปผลของหลักการทำงานต่างๆของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

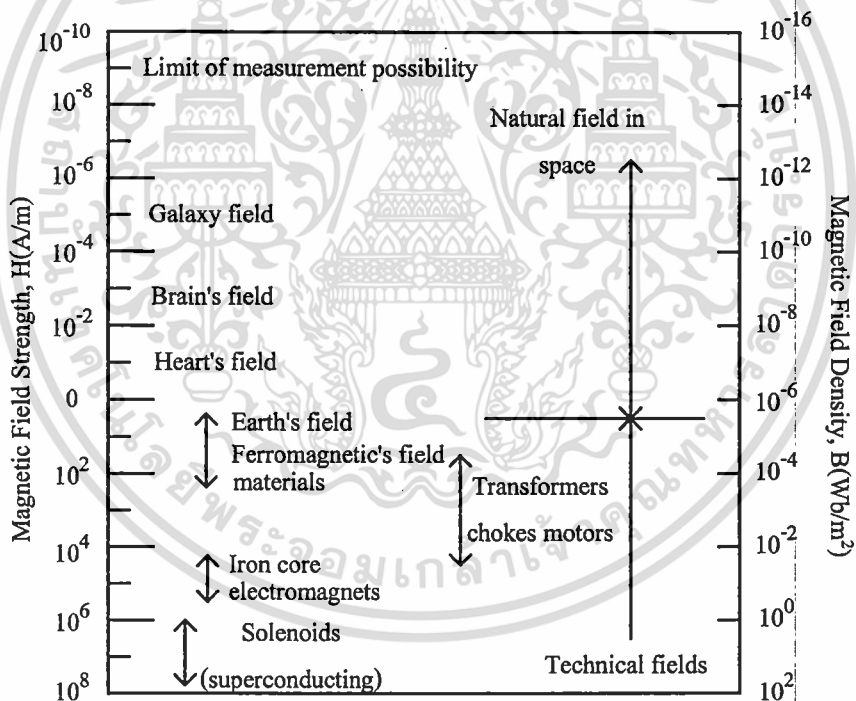


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติเช่น ร่างกายของมนุษย์บริเวณกล้ามเนื้อซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ  $2 \times 10^{-5}$  A/m หรือบริเวณพื้นผิวของดวงอาทิตย์ซึ่งมีสนามแม่เหล็กประมาณ 600 A/m [20] สนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบร่างกายของมนุษย์ยกตัวอย่างเช่น สมอของมนุษย์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเวียนในระดับไมโคร, หัวใจ และเส้นเอ็นกล้ามเนื้อซึ่งจะมีสนามแม่เหล็กประมาณ  $10^{-2}$  A/m อยู่ในร่างกายของมนุษย์ในรูปแบบที่ 2.1 แสดงระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่  $10^{-9}$  A/m จนถึง  $10^8$  A/m โดยสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูงสามารถเกิดได้จาก กระบวนการเทคนิคการสรีรวิทยา, สายส่งสัญญาณ, หม้อแปลงไฟฟ้า ( $10^{-1}$ - $10^5$  A/m), วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ( $1$ - $10^6$  A/m) และขดลวดสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด ( $10^6$ - $10^7$  A/m)



รูปที่ 2.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ[15]

ความเข้มสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (H) แสดงหน่วยเป็น แอมแปร์/เมตร (A/m) โดยที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) มีหน่วยเป็น เทสลา (T) ซึ่งนิยามของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B คือเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) 1 เวเบอร์ ตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ 1 ตารางเมตร ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ในวัสดุจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยแสดงได้โดย

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

โดย  $\mu^B$  คือค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุซึ่งค่าซึมซาบแม่เหล็กในอวกาศ  $\mu_0^B$  จะมีค่า  $4\pi \times 10^{-7}$  และค่าซึมซาบแบบสัมพัทธ์  $\mu_r^B$  จะมีค่าประมาณ  $\mu_r^B \gg 1$  ในวัสดุที่ค่าซึมซาบระดับสูงแต่อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจะใช้ค่าซึมซาบระดับต่ำคือประมาณ  $\mu_r^B \cong 1$

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

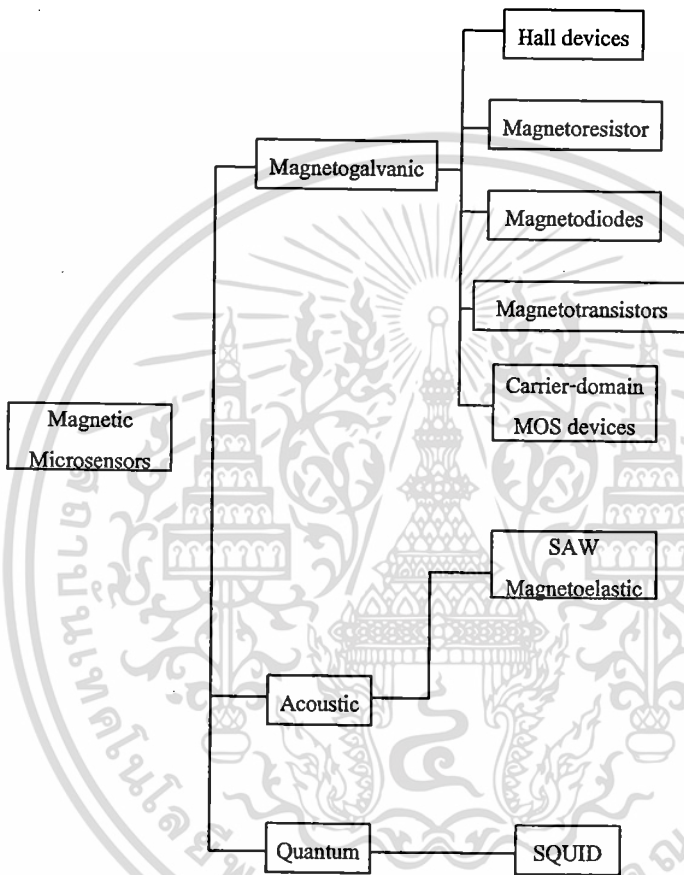
ตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ[15]

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.

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจัดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการป้องกันประเทศของกองทัพอากาศ  
อุปกรณ์ชนิดไมโครเซนเซอร์โดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการเกิดแรงลอเรนซ์กระทำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับประจุพาหะที่เคลื่อนที่ขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน รูปที่ 2.2 แสดงการจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยจำแนกตามหลักการพื้นฐานของแต่ละอุปกรณ์, ชนิดของอุปกรณ์ และชนิดของสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งชนิดที่ใช้ฟิล์มที่บางและหนาของเซมิคอนดักเตอร์ SAW (Surface Acoustic Wave) นอกจากนี้แสดงถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีหลักการแตกต่างชนิดอื่นและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กขนาดเล็กได้โดยมีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สูงมากคือ SQUID (Super Conducting Quantum Interference) [15]



รูปที่ 2.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก[15]

## 2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)

### 2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

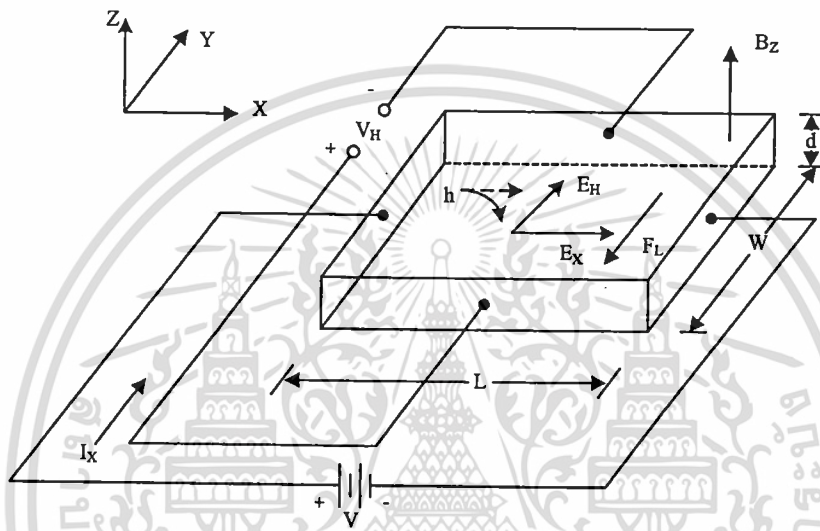
ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิด โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถอธิบายการทำงานจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มีแรงลอเรนซ์เกิดขึ้น ในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็ก

ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (charge carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัด และคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ อื่นๆ ได้อีกด้วย

แท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูป 2.3 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความต่างศักย์  $V$  โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density)  $J_x$  ไหลในทิศ  $+x$  และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density)  $B_z$  ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ  $+z$



รูปที่ 2.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี [21]

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $+x$  จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ววดริฟท์ (drift velocity)  $v_x$  ในทิศทาง  $+x$  และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแสจะเกิดมีแรงลอเรนซ์กระทำต่อโฮลด้วย ตามสมการ

$$\overline{F_L} = e\overline{v} \times \overline{B} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\overline{F_L}$  คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\overline{F_L}| = F_L = e.v_x.B_z \quad (2.2)$$

และมีทิศทางในแกน  $-y$  ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาแกน  $-y$  และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $E_H$  ในทิศ +y สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ +y ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ ( $F_L$ ) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน ( $eE_H$ ) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

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

จาก  $E_H = v_x.B_z \quad (2.4)$

$$J_x = p.e.v_x$$

หรือ  $v_x = \frac{J_x}{p.e}$

แทนค่า  $v_x$  ลงในสมการ (2.4) จะได้

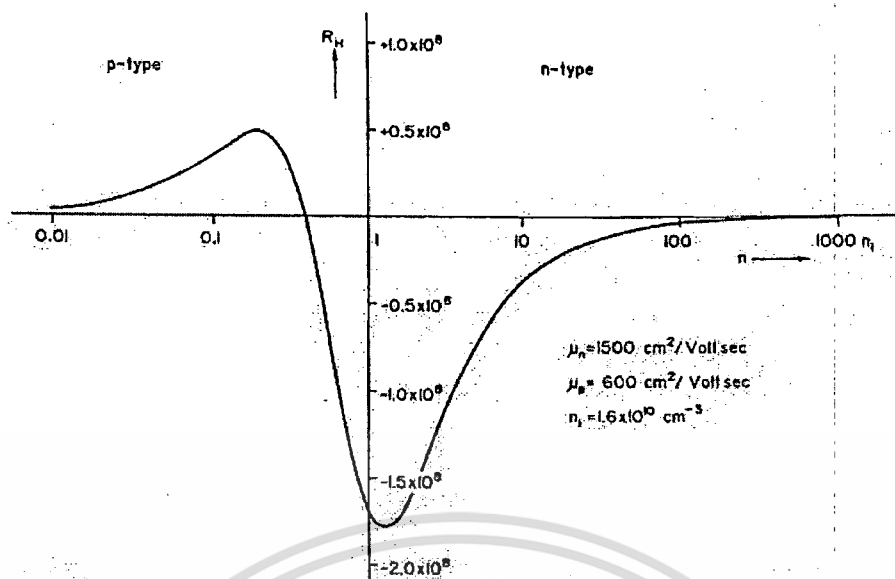
$$E_H = \frac{J_x.B_z}{p.e}$$

ดังนั้นจะได้

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

โดย  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการโด๊ประดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าแรงดันฮอลล์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการโด๊ประดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

จากรูป 2.3 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $w$  จะได้

$$V_H = E_H \cdot w \tag{2.6}$$

โดย  $V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่า  $J_x = \frac{I}{w.d}$  และ  $E_H = \frac{V_H}{w}$  ลงในสมการ (2.5) จะได้

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

หรือ

$$R_H = \frac{d.V_H}{I.B_z} = \frac{1}{p.e} \tag{2.7}$$

$$V_H = \frac{I.B_z}{p.e.d} \tag{2.8}$$

ความหนาแน่นของโฮล คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

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

จาก

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

ดังนั้นจะได้

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

จากสมการ (2.9), (2.10) และ (2.11) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น 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

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

จะเห็นว่า ค่าความไว ที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำ และฮอลล์เฟลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ  $E_H$  และ  $E_x$  ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม  $\theta_H$  กับแกน +x ดังรูปซึ่งมุม  $\theta_H$  ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

จะได้

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

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

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ  $R_{Hl}$  สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

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

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

หรือ

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

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

โดย  $\mu_H$  คือ สภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility) และ  $\mu_{Hl}$  คือสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ  $R_{Hl}$  แสดงได้ดังสมการที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

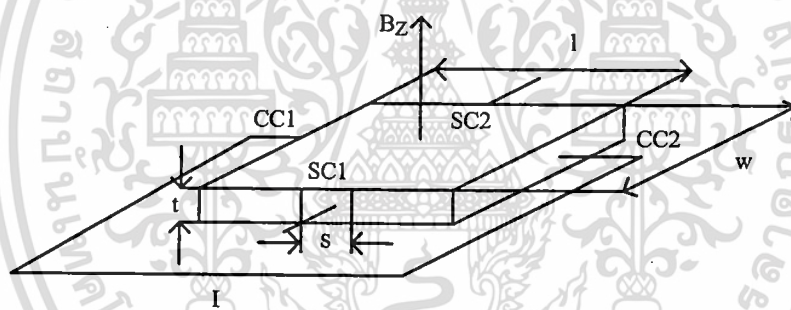
และ

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

โดย  $\mu_{Hi}$  คือสภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

### 2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีฮอลล์ (Hall Effect) โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนาที่บาง โครงสร้างประกอบด้วย 4 ขั้วใช้งานคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 ซึ่งแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) ถูกวัดที่ขั้ว SC1 และ SC2 โดยที่การไบอัสกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC1 และ CC2 แรงดันฮอลล์สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.18



รูปที่ 2.5 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ [1]

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

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

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

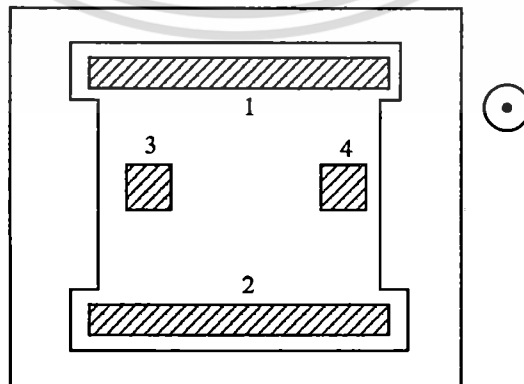
โดยที่  $r_n$  คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง  $G$  จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง  $G$  สามารถประมาณดังสมการที่ 2.20

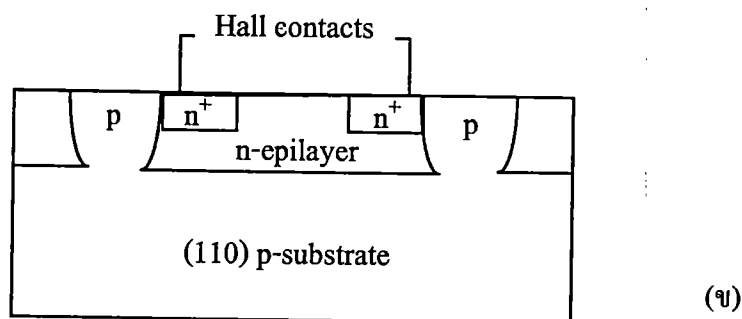
$$G = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.20)$$

โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า  $G=1$  ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้  $l/w = 3$  และ  $s/w < 1$  โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์คอนแทคจะออกแบบที่ระยะ  $l/2$

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคืออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน [15] โดยรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงด้านบนและด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งชนิดอื่น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ  $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียล 5 - 10  $\mu\text{m}$  โดยที่ออกแบบมิติของเฟลทประมาณ  $200 \times 200 \mu\text{m}$  สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการอิมพลานท์ (ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้



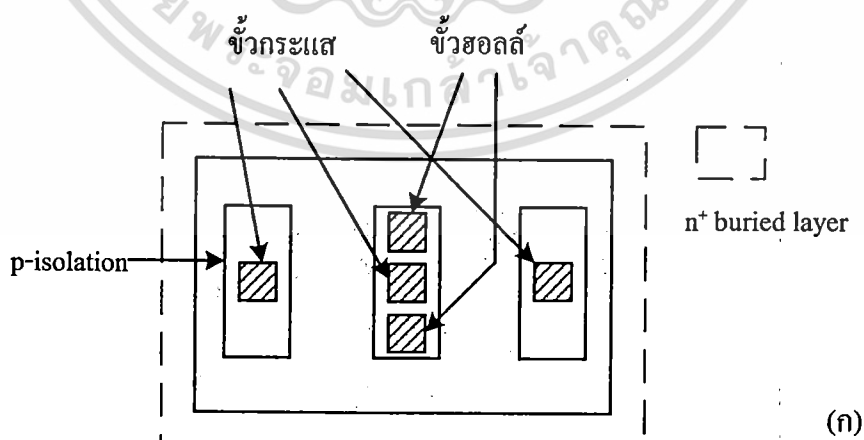
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.6 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง[15] ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



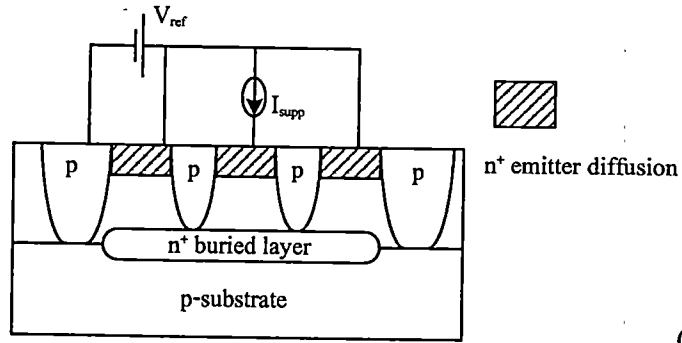
รูปที่ 2.7 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง [15]

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

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

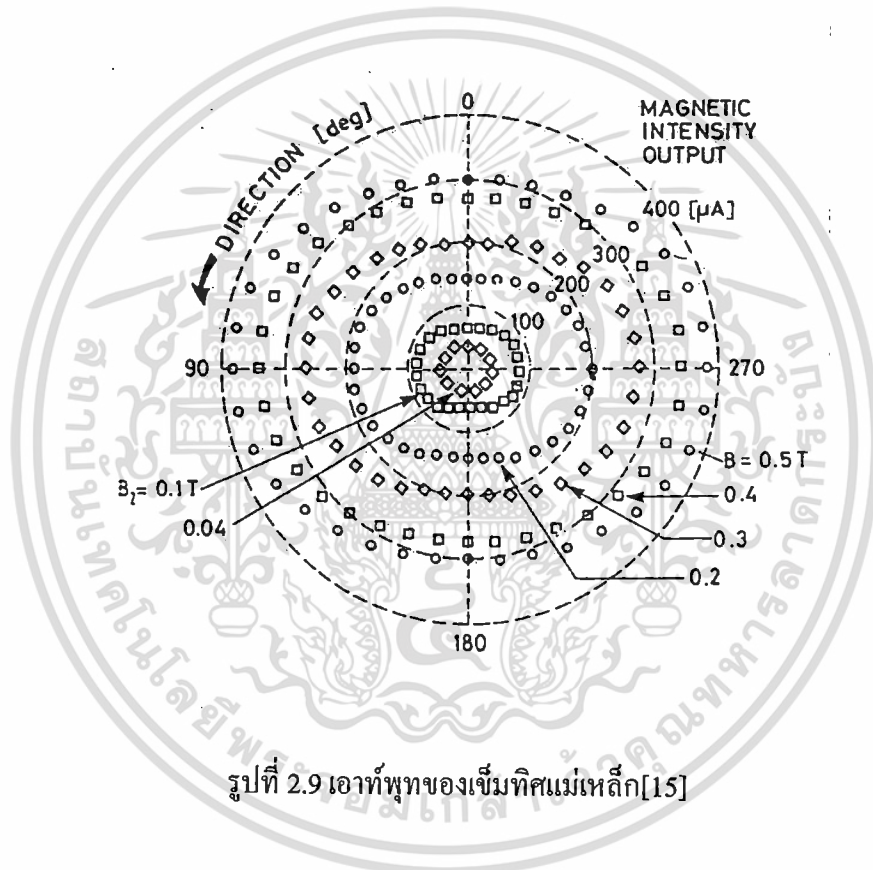






(ข)

รูปที่ 2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์ (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง[15]



รูปที่ 2.9 เอ้าท์พุทของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก[15]

## 2.2 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

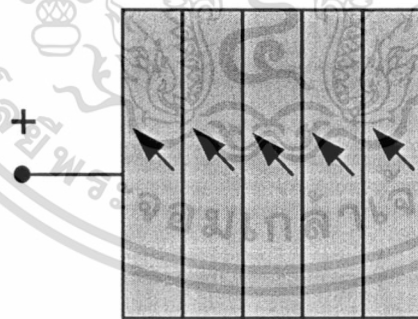
สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า แมกนีโตรีซิสเตอร์ อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ (magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม  $\theta$  ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระนาบที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ 2.21 และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบน  $\theta$  หาได้ดังสมการที่ 2.22

$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \quad (2.21)$$

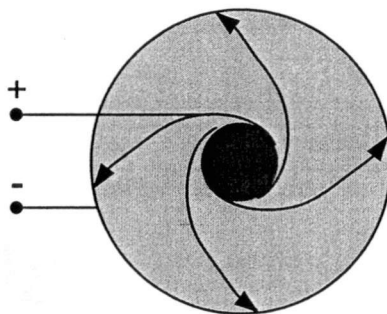
$$R(\theta) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{ar} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \quad (2.22)$$

โดยที่  $K_{ar}$  ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเพลทซึ่งในอุดมคติเพลทมีความกว้างมากกว่าความยาว

โดยปกติแล้วแมกนีโตรีซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (parallel Hall plates) และแบบวงกลม (caibino disc) ดังแสดงรูปที่ 2.10 โดยที่รูป 2.10(ก) แสดงโครงสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนานซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์คือในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์จะไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์แต่จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 2.10(ข) แสดงโครงสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์แบบวงกลมซึ่งเป็นโครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วย โดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีสภาพความคล่องตัวต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์จะเลือกสารประกอบที่มีค่าสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



(ก)



(ข)

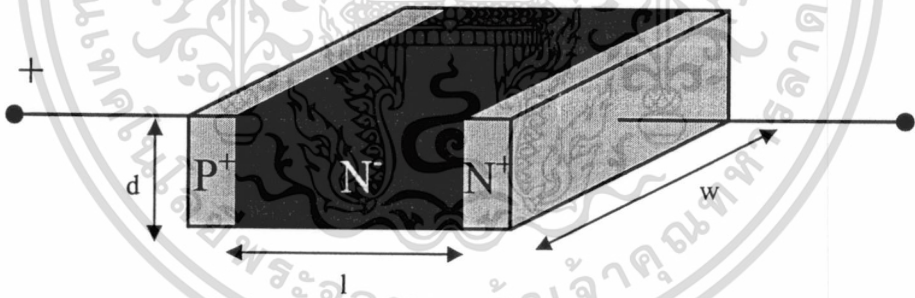
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รวมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม[15]  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างที่สามแสดงดังรูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดโดยมีมิติความยาว, ความกว้างและความสูง ( $l \times w \times d$ ) อาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะระหว่างสองรอยต่ออันเป็นผลเนื่องมาจากแมกนีโตคอนเซนเตรชัน (magneto concentration effect) โดยพาหะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของแมกนีโตไดโอดอีกด้วย โดยการใช้  $\text{Si-Al}_2\text{-O}_2$  และ  $\text{Si-SiO}_2$  ที่พื้นผิวเรียกว่า SOS (Silicon-On-Sapphire) ดังแสดงรูป 2.12(ก) ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่กระแสดังที่สามารหหาได้โดยสมการที่ 2.23 [15]

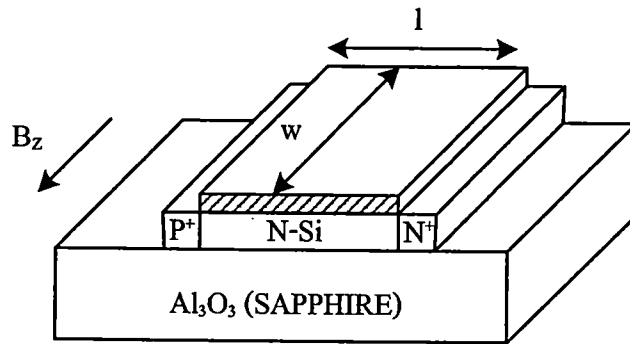
$$S_v = \frac{dV_f}{dB_z} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)\tau_{eff}(v_2 - v_1)}{8KI} V_f^2 \quad (2.23)$$

โดยที่  $l$  คือความยาวของซิลิคอนชนิดเอ็น,  $v_1$  และ  $v_2$  คืออัตราการรวมตัวของพาหะ,  $\mu_p$  และ  $\mu_n$  คือสภาพความคล่องตัวของพาหะ และ  $\tau_{eff}$  คืออายุของพาหะ

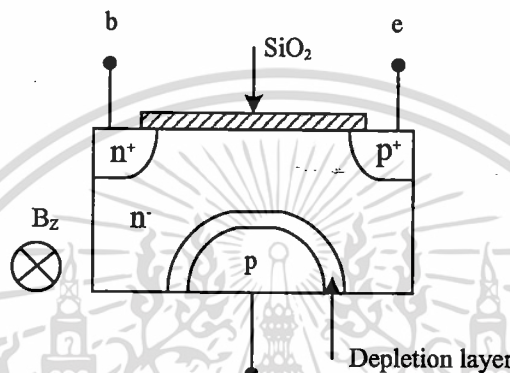


รูปที่ 2.11 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด [15]

ข้อเสียของ SOS แมกนีโตไดโอด เช่น การสร้าง  $\text{Si-Al}_2\text{-O}_2$  จะเกิดขึ้นได้ยากในบริเวณผิวหน้า, ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ พื้นฐานของการใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS แสดงดังรูป 2.12(ข) โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตราการรวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS แมกนีโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปจากคอลเลกเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลกเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS [15]

### 2.4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

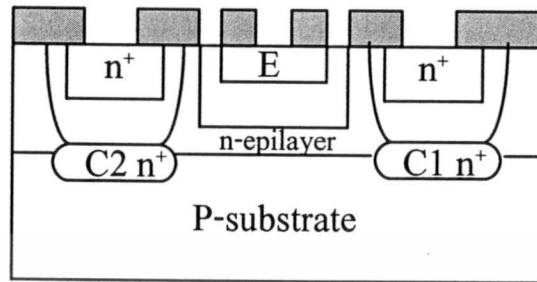
แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งโดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magnetotransistor) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (lateral magnetotransistor) ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) [1-6]

#### 2.4.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor)

รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้งโดยสร้างจากกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลคเตอร์ทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด  $n^+$  เพื่อไม่ให้ข้อต่อจอร์กิตจึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่าง ชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง



รูปที่ 2.13 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง [1]

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านส่วนเบสไปถึงชั้นอีพิกของคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วนโดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันอยู่ในสภาวะสมดุล  $I_{C1} = I_{C2} = I_{CO} / 2$  โดยที่  $I_{CO}$  คือผลรวมกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง  $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$  ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองหาได้โดยสมการที่ 2.24

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n^* (L/W_E) \cdot I_{CO} \cdot B \quad (2.24)$$

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

$$S = |\Delta I_C / I_{CO} B| \quad (2.25)$$

แทนสมการที่ 2.24 ลงในสมการที่ 2.25 จะได้

$$S = G \cdot \mu_n^* (L/W_E) \quad (2.26)$$

ในสภาวะปกติขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารได้ตั้งสมการที่ 2.27 และ 2.28 การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

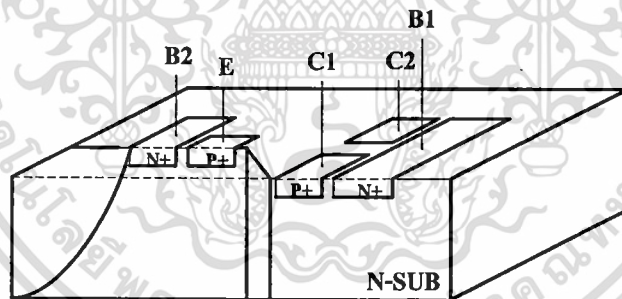
$$S_A = \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.27)$$

$$S = V_C^{-1} \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = I_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.28)$$

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

#### 2.4.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor)

โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองขาอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, สองคอลเลคเตอร์ C1, C2 และสองขั้วเบสคอนแทค B1, B2

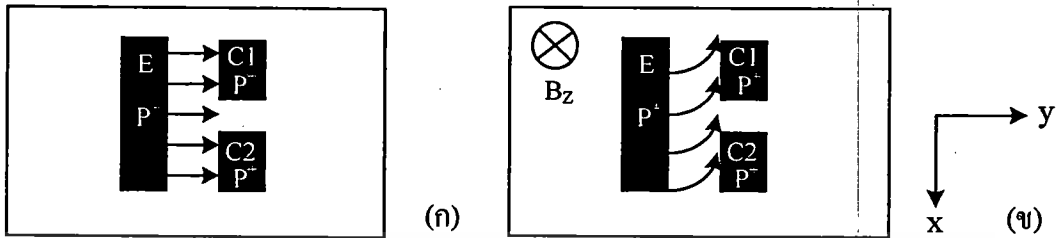


รูปที่ 2.14 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน[15]

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก (majority carriers) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลคเตอร์ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ( $\Delta I_C = 0$ ) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 2.15(ก) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุ

เอกสาพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสอง ารค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C \neq 0$ ) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุลแสดงดังรูปที่ 2.15(ข)



รูปที่ 2.15 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก)  $B_z = 0$  และ (ข)  $B_z > 0$

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  ได้ตั้งสมการที่ 2.29 เพราะฉะนั้นผลรวมของ  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  คือกระแสคอลเลคเตอร์ที่ไหลในภาวะปกตินั่นเอง ดังสมการที่ 2.30 ส่วนสมการที่ 2.31 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta I_C$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง  $\Delta I_C$  แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมผัสและแบบสมบูรณ์แสดงได้ดังสมการที่ 2.32-2.33

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \tag{2.29}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \tag{2.30}$$

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_z \cdot I_E \tag{2.31}$$

ซึ่ง  $\mu_p$  และ  $\mu_n$  คือค่าความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮล  $K_g$  เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์

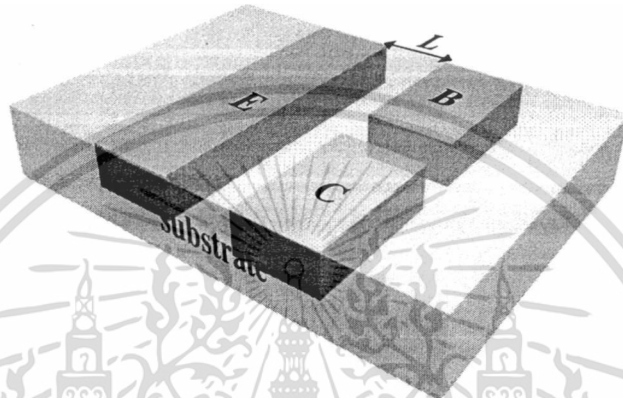
$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_O \cdot \Delta B_z} \tag{2.32}$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \tag{2.33}$$

ซึ่ง  $I_O$  คือแหล่งจ่ายกระแสคงที่และ  $\Delta B_z$  คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

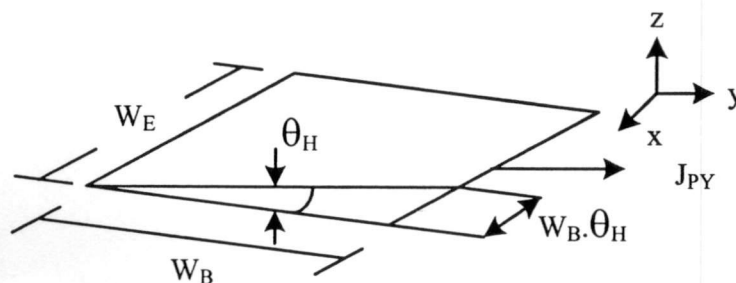
### 2.4.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Three terminal magnetotransistor)

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 2.16 เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และ คอลเลคเตอร์ C โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเป็นการพัฒนาจากโครงสร้างปกติห้าขา เพื่อสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์[7-11]



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ โครงสร้างสามขาในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กปริมาณพาหะโฮลเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากับปริมาณพาหะโฮลที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแสเบส แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากแนวตั้ง (ทิศทาง z) ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ พาหะถูกกระทำโดยแรงลอเรนซ์ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนและเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.17 โดยกระแสอิมิตเตอร์คือการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ดังสมการที่ 2.34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.17 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเบี่ยงเบน  $\theta_H$  ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$I_E = I_B + I_C \quad (2.34)$$

กระแสอิมิตเตอร์สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮล  $J_{PY}$  ดังสมการ 2.35

$$I_E = J_{PY} \cdot W_E \cdot d \quad (2.35)$$

โดยที่  $W_E$  คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ  $d$  คือความลึกกรอยต่อ

การไม่สมดุลของกระแสที่มีความสัมพันธ์กับความกว้างเบส  $W_B$ , สภาพคล่องตัวของโฮล  $\mu_p$  และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ดังสมการที่ 2.37 กระแสไหลตามแนวอนเบี่ยงเบนในมุม  $\theta_H$  ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 2.36

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z \quad (2.36)$$

$$(\Delta Y) = W_B \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (2.37)$$

$$\Delta I_{CB} = J_{PY} \cdot W_E \cdot W_B \cdot \tan \theta_H \quad (2.38)$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์สามารถหาได้โดยสมการที่ 2.38 สามารถคำนวณโดยความหนาแน่นกระแส  $J_{PY}$  ในระนาบ  $L = W_B$ , ความกว้างอิมิตเตอร์  $W_E$  และมุมเบี่ยงเบน  $\tan \theta_H$  ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดยสมการที่ 2.39

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot B_z} \quad (2.39)$$

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวอน ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

## 2.5 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซนเซอร์

การนำอุปกรณ์เซนเซอร์ไปใช้งาน โดยทั่วไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติเช่น ที่อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดัน เพื่อให้สามารถนำเซนเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซนเซอร์ต่างๆ ไป ค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปเป็นประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

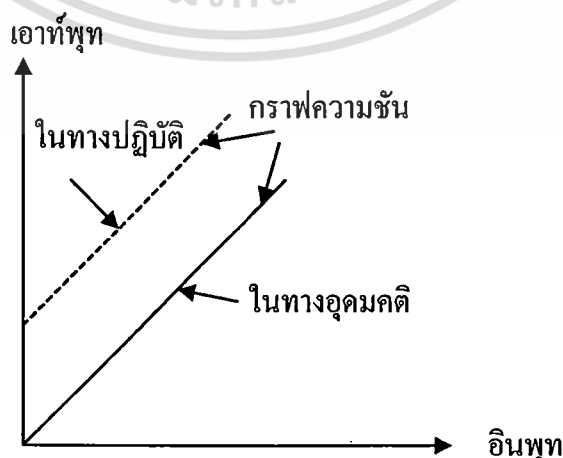
**1. ย่านวัด (Range)** เป็นการจำกัดค่าอินพุท และเอาท์พุทของเซนเซอร์ในการใช้งาน เช่น เซนเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้กับความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสด้านเอาท์พุท อยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

**2. ความผิดพลาด (Error)** เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาว่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (uncertainty) รวมอยู่ด้วยเสมอ

**3. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision)** ในการวัดค่า ความแม่นยำ และความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง จะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึงสามารถวัดได้ละเอียด (sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง สเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือค่าที่วัดได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึง ความคงเส้นคงวา (consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึงค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงต่ำ

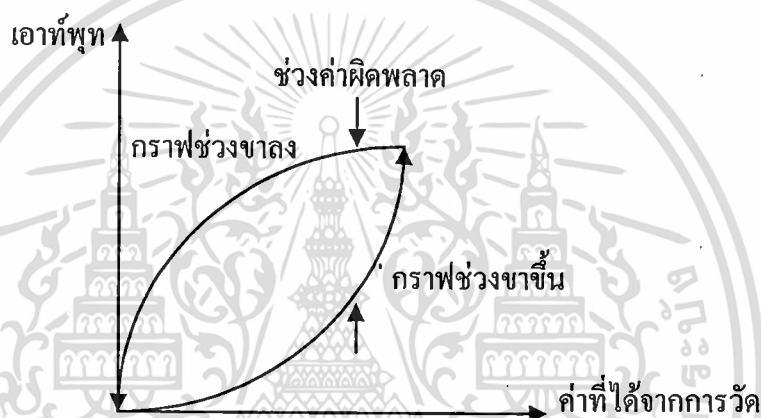
**4. ความไว (Sensitivity)** หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาท์พุทหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุท หรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น  $0.5 \Omega/^{\circ}\text{C}$  เป็นต้น

**5. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)** หรือความแม่นยำ โดยความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่ามีกราฟตัวอย่างไรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมากแต่มีความเอียง, ความชัน หรือออฟเซ็ท จากค่าที่ถูกกำหนด



**6. ความมีเสถียรภาพ (Stability)** ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึงความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การลื่นไหล (drift) มักถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การลื่นไหลอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การลื่นไหลเป็นศูนย์ (zero drift) ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุต เมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์

**7. ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)** การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด



รูปที่ 2.19 ฮิสเทอรีซิสสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

**8. การแยกชัด (Resolution or Discrimination)** บอกถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ถูกรวัด

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

**10. ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response)** แสดงถึงเวลาที่เอาต์พุตมีค่าอยู่ใน 63 % ของค่าสุดท้ายที่ทำการการตอบสนองของอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดทดลอง

โดยปกติแล้วในการออกแบบกระบวนการสร้างและการทดสอบของอุปกรณ์เซนเซอร์ในความเป็นจริงจะมีคุณสมบัติไม่เป็นอุดมคติเพราะฉะนั้นจึงเป็นหน้าที่ของนักออกแบบและนักวิจัยที่จะพัฒนาอุปกรณ์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือเข้าใกล้ความเป็นอุดมคติมากที่สุด โดยรายละเอียดคุณสมบัติของเซนเซอร์ในทางอุดมคติสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ

คุณลักษณะ	ค่าในทางอุดมคติ
Response, $\Delta y$	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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

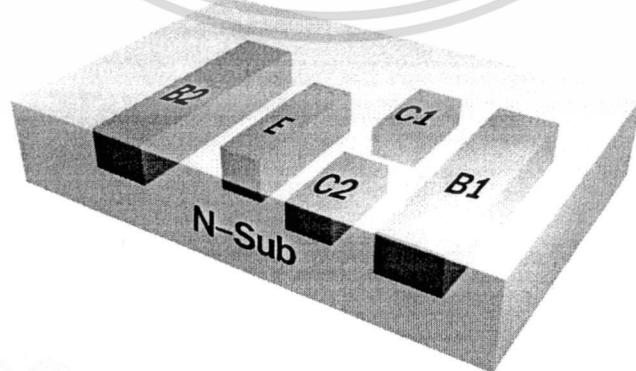
## บทที่ 3

### โครงสร้างและการออกแบบเมกนีโตทรานซิสเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบห้าขาและสามขา อธิบายกลไกการทำงานและอธิบายความสัมพันธ์ทางโครงสร้างอัตราส่วน  $L/W$  ที่มีผลต่อความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ เมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาทำการศึกษาโดยการออกแบบเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์โดยในแต่ละพารามิเตอร์ทำการเปลี่ยนแปลงระยะความกว้างเบส  $L$  และระยะระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง  $W$  เพื่อเปรียบเทียบเอาท์พุท ( $\Delta I_C$ ) และค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กและเมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขารูปแบบโครงสร้างประกอบด้วยอิมิตเตอร์, เบสและคอลเลคเตอร์ โดยทำการออกแบบโครงสร้างแบบปกติและโครงสร้างสองตัวรวมกระแส อีกทั้งบทนี้กล่าวถึงรูปแบบมาส์คและวิธีการออกแบบมาส์คโดยการใช้โปรแกรม COREL DRAW ของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองอีกด้วย

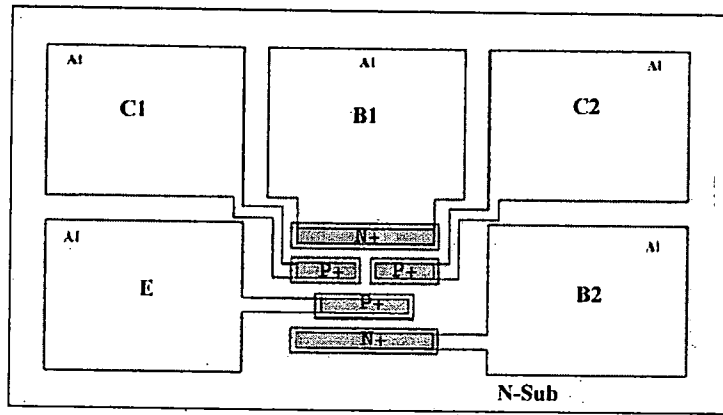
#### 3.1 เมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

โครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา ซึ่งนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยรูปที่ 3.1 เป็นภาพโครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน คอลเลคเตอร์ทั้งสองมีขนาดสมมาตรกันและแยกออกจากกันซึ่งสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด  $P^+$  อิมิตเตอร์สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด  $P^+$  โดยมีความยาวคาบเกี่ยวระหว่างชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ส่วนของขั้วเบสสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด  $N^+$  แบ่งเป็นสองขั้ว ซึ่งจะอยู่ด้านนอกสุดของตัวอุปกรณ์และครอบคลุมทั้งอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ ทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น



รูปที่ 3.1 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ภาพด้านแสดงมิติโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านบนมิติของไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามลักษณะการออกแบบประกอบด้วย อิมิตเตอร์หนึ่งขา, คอลเลคเตอร์สองขา และเบสสองขาอธิบายหน้าที่ความสำคัญของแต่ละขาได้ดังนี้

C1 และ C2 ชั้นสารคอลเลคเตอร์ (Collector) สองชั้น ขนาดเท่ากันแยกออกจากกัน ในสถานะปกติ(ไม่มีสนามแม่เหล็ก)กระแสที่ไหลผ่านชั้นสารทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตั้งฉากกับ ทิศทางการไหลของกระแส แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำกับพาหะทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะเบี่ยงเบน ปริมาณสะสมที่ชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสองชั้นมีปริมาณไม่เท่ากัน ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมากจะทำให้ปริมาณความแตกต่างกระแสระหว่างชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสองมีค่ามากขึ้นด้วยระยะห่างระหว่างชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสอง มีผลต่อการเบี่ยงเบนของพาหะด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าระยะห่างระหว่างชั้นสารทั้งสองมากจะต้องใช้ปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมาก ในการทำให้พาหะเบี่ยงเบน

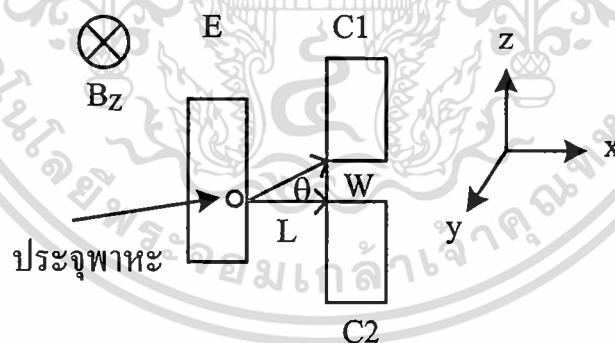
E ชั้นสารอิมิตเตอร์(Emitter) มีความยาวที่คาบเกี่ยวระหว่างชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันทำให้สถานะปกติพาหะถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านไปยังคอลเลคเตอร์ทั้งสองชั้น ในปริมาณเท่ากัน ระยะห่างระหว่างชั้นสารอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์ทั้งสองชั้น มีผลกับประสิทธิภาพการฉีดพาหะ เนื่องจากโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบมี ระยะห่างระหว่างชั้นสารอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์มาก จึงจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดพาหะโดยการไบอัส B1และ B2 เพื่อให้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัส B1 และ B2 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

B1 และ B2 (Base) ชั้นสารเบสสองชั้น ไบอัสเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดพาหะ โดยให้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัส ช่วยในการฉีดพาหะ การออกแบบชั้นสารเบส ต้องให้มีความยาวครอบคลุมชั้นสารทุกชั้นสารของอุปกรณ์ เพื่อให้สนามไฟฟ้าที่ได้จากการไบอัส B1 และ B2 ครอบคลุมทุกชั้นสารของอุปกรณ์

ขั้ว (Pad) ขั้วลูมิเนียมสำหรับใช้ในการวัดทดสอบอุปกรณ์ ออกแบบให้มีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่สะดวกเพื่อความคล่องตัวในการตรวจวัดทดสอบ เนื่องจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้ำขาตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยการอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการทำงานเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบได้ดังนี้

### 3.1.1 การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้ำขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิ่งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และอัตราการฉีดพาหะอิมิตเตอร์ (modulation current injection) ในสภาวะที่มีสนามแม่เหล็กแวนดิ่งตัดผ่านอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่ระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ในระยะความยาว  $L$  แรงลอเรนซ์จะกระทำกับพาหะทำให้เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุม  $\theta$  ซึ่งระยะการเบี่ยงเบน  $W$  คือระยะระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง รูปที่ 3.2 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะขณะที่มีสนามแม่เหล็กแวนดิ่งตัดผ่านในระยะความยาว  $L$  โดย  $\theta$  คือมุมเบี่ยงเบนของพาหะและ  $W$  คือระยะการเบี่ยงเบนของพาหะ



รูปที่ 3.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในมุมเบี่ยงเบน  $\theta$

จากทฤษฎีฮอลล์ซึ่งอธิบายจากบทที่ 2 มุมการเบี่ยงเบนของพาหะหาได้จากสมการที่ 2.36 แสดงได้โดย

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z$$

จากรูปที่ 3.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางโครงสร้างได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{W}{L} = \mu_p \cdot B_z$$

จะได้

$$B_z = \frac{W}{L \cdot \mu_p} \quad (3.1)$$

จากนิยามของสมการความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กคืออัตราส่วนระหว่างเอาท์พุทและอินพุทของอุปกรณ์ โดยความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาคืออัตราส่วนระหว่างความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ( $\Delta B$ ) แสดงได้โดยสมการที่ 3.2 [13-14]

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta B} \quad (3.2)$$

แทนสมการที่ 3.1 ลงในสมการที่ 3.2 จะได้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์โครงสร้างแสดงได้โดยสมการที่ 3.3

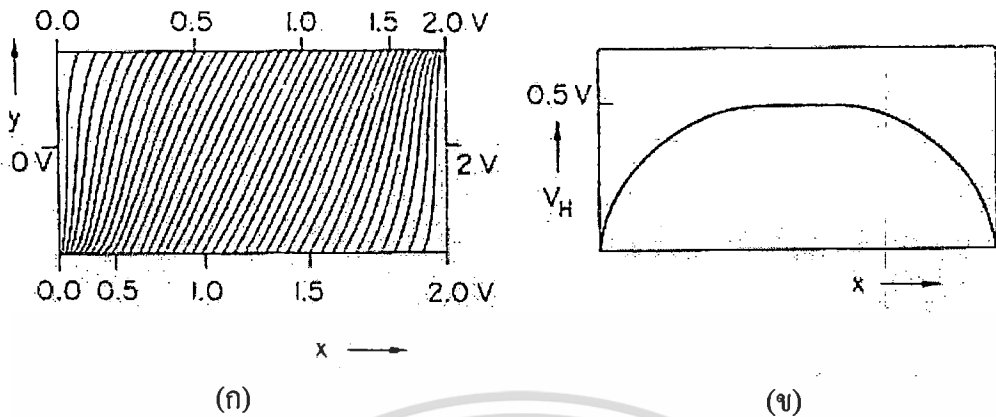
$$S = \frac{\Delta I_C \cdot L \cdot \mu_p}{W} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 สามารถอธิบายได้ว่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับระยะ L และ ระยะ W ในการออกแบบอุปกรณ์การกำหนดให้ระยะ W มีค่าน้อย และ ระยะ L ที่มีความยาวสามารถทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงขึ้นได้ ความกว้าง W กำหนดเป็นระยะระหว่างคอลเลกเตอร์ C1 และ C2 จากสมการที่ 3.3 ความกว้าง W ควรจะมีค่าน้อยที่สุดซึ่งในเทคโนโลยีการสร้างสามารถสร้างได้ที่ความกว้างสั้นที่สุดคือ 10  $\mu\text{m}$  จึงทำการออกแบบเปลี่ยนแปลงความกว้าง W มีค่า 10  $\mu\text{m}$  และ 20  $\mu\text{m}$  เพื่อเปรียบเทียบเอาท์พุทที่เกิดขึ้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

ในการพิจารณาการกำหนดระยะความยาว L สามารถทำการศึกษาจากทฤษฎีฮอลล์โดยที่รูปที่ 3.4(ก)แสดงเส้นศักย์เท่ากัน (equipotential lines) ของอุปกรณ์ฮอลล์ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทำให้พาหะเคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่คงที่ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ได้สมบูรณ์ ซึ่งจะแตกต่างกับบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์โดยสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถมีค่าได้สูงสุดรูปที่ 3.4(ข) แสดงค่าแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) ที่ตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ฮอลล์ แรงดันฮอลล์มีค่าสูงสุดในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์และบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์จะมีค่าแรงดันฮอลล์ที่น้อย

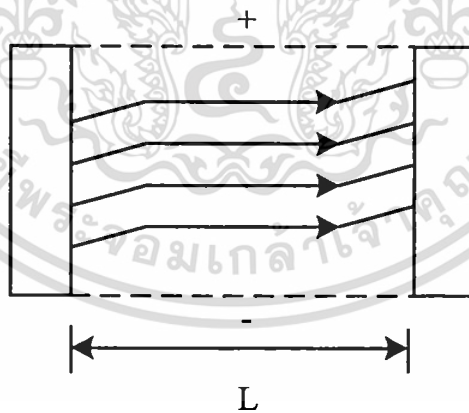


เพราะฉะนั้นการออกแบบเพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้ววัดแรงดันฮอลล์โดยส่วนใหญ่แล้วจะ ออกแบบให้อยู่ตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์



รูปที่ 3.4 (ก) เส้นสัจย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์ และ (ข) แรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ [14]

จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 3.4 สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้ โดยในการออกแบบจะกำหนดระยะความยาว  $L$  เป็นระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา โดยอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีความยาว  $L$  รูปที่ 3.5 แสดงการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็กได้สมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ นั่นคือกระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวตรง ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์จะมีการเบี่ยงเบนเพราะสนามไฟฟ้าไม่สามารถเหนี่ยวนำได้อย่างสมบูรณ์

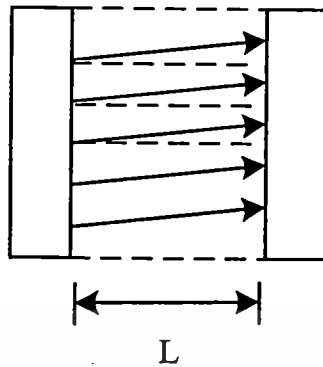


รูปที่ 3.5 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว  $L$  ของอุปกรณ์ฮอลล์

รูปที่ 3.6 แสดงการลดลงของความยาว  $L$  ซึ่งสามารถแสดงการเบี่ยงเบนได้ชัดเจน เนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ ทำให้กระแสเกิดการเบี่ยงเบนได้อย่างชัดเจน ( $\Delta V_C$ ) ซึ่งลักษณะของกระแสที่เบี่ยงเบนจะเป็นพื้นฐานในการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ นั่นคือแสดงให้เห็นว่าระยะความยาว  $L$  ไม่สามารถที่จะออกแบบให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

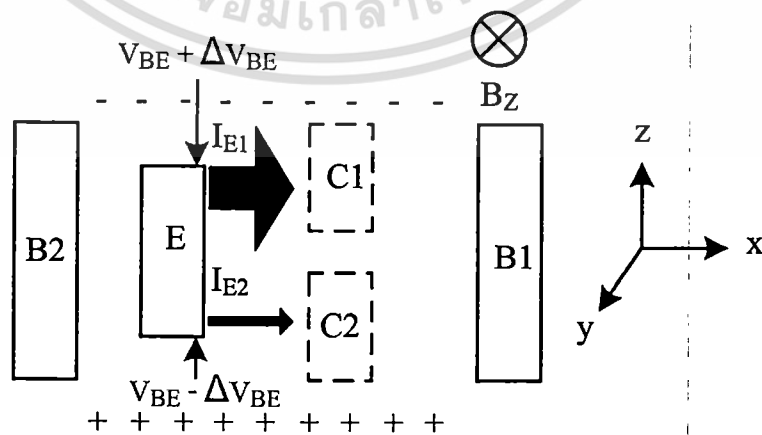
ความยาวที่ยาวมากได้ การออกแบบจึงกำหนดระยะความยาวเบส  $L$  ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์  
 ห้าขาที่ระยะ  $10\ \mu\text{m}$  และ  $20\ \mu\text{m}$  เพื่อแสดงการเปรียบเทียบเอาท์พุทที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.6 การลดลงของความยาว  $L$  ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า

**3.1.2 กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (Modulation Current Injection)**

การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขานั้นนอกจากอาศัย  
 กลไกการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection)แล้วยังอาศัยกลไกในการเกิดความแตกต่าง  
 ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเนื่องจากกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท(modulation current  
 injection)อีกด้วย พิจารณาจากรูปที่ 3.7 สนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะซึ่ง  
 ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ บริเวณรอยต่อ  
 อิมิตเตอร์-เบสด้านบนมีแรงดันคกร่อมรอยต่อมากขึ้น ( $V_{BE} + \Delta V_{BE}$ ) เนื่องจากการเกิด  
 แรงดันฮอลล์ ซึ่งแตกต่างกับกรณีบริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสด้านล่างที่แรงดันคกร่อมรอยต่อมี  
 ค่าลดลง ( $V_{BE} - \Delta V_{BE}$ ) เพราะผลจากสนามไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไบอัสไปข้างหน้า  
 ทำให้พาหะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์บริเวณด้านบนมากกว่าด้านล่าง ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง  
 กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองได้



รูปที่ 3.7 กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์สมการกระแสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายจากสมการกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ปกติโดยสมการอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ในวงจรเบสร่วมหรือค่าของอัลฟา ( $\alpha$ ) แสดงได้ดังสมการที่ 3.4

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (3.4)$$

เนื่องจากรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสได้รับไบอัสตรงทำให้พาหะถูกฉีดจากอิมิตเตอร์เข้าไปในเบสกลายเป็นกระแสอิมิตเตอร์ซึ่งในสภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านแสดงได้โดยสมการที่ 3.5

$$I_{E0} = \frac{I_S}{\alpha} e^{V_{BE}/V_T} \quad (3.5)$$

โดยที่  $I_S$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ,  $V_{BE}$  คือ แรงดันตกคร่อมรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสและ  $V_T$  คือ แรงดันที่อุณหภูมิต่างๆสามารถหาได้โดย  $V_T = kT/q$  ซึ่ง  $k$  คือค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์,  $T$  คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเคลวินและ  $q$  คือ ประจุอิเล็กตรอน

สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะซึ่งจะเกิดประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์แสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าบริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสด้านบนและด้านล่างของอิมิตเตอร์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสอิมิตเตอร์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\Delta I_E = \frac{I_S}{\alpha} e^{V_{BE} + \Delta V_{BE}/V_T}$$

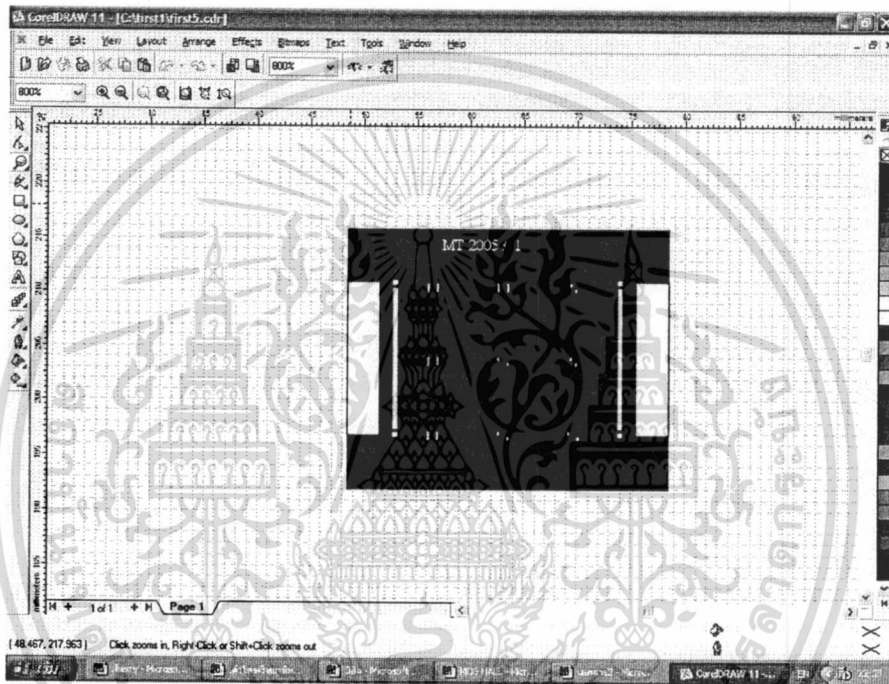
โดยที่  $\Delta V_{BE}$  คือ แรงดันตกคร่อมระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ที่เพิ่มขึ้นจากกระแสการฉีดจากการมอดคูเลทเนื่องจากแรงดันฮอลล์

จะได้

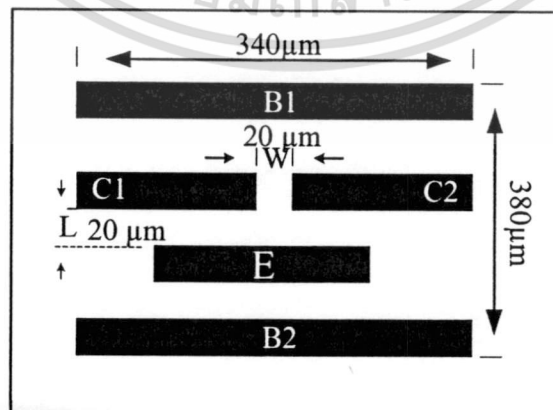
$$I_E = I_{E0} + \Delta I_E \quad (3.6)$$

จากการศึกษาความกว้าง  $W$  และความยาว  $L$  ของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถนำประยุกต์ใช้ในการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาได้ ซึ่งสรุปได้ว่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถสูงขึ้นจากการออกแบบให้ระยะ  $W$  มีความกว้างที่น้อยและระยะ  $L$  มีค่าที่สูงโดยที่ระยะ  $L$

นั้นไม่สามารถออกแบบให้มีระยะที่ยาวมากได้ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 แสดงมิติของแมกนีโททรานซิสเตอร์ห้าขาโดยออกแบบเปรียบเทียบระยะระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (W) และระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์ (L) ซึ่งในการออกแบบมีค่า W และ L ดังนี้ พารามิเตอร์ที่ 1  $W=20\mu\text{m}$ ,  $L=20\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 2  $W=20\mu\text{m}$ ,  $L=10\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 3  $W=10\mu\text{m}$ ,  $L=20\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 4  $W=10\mu\text{m}$ ,  $L=10\mu\text{m}$  โดยทำการออกแบบด้วยโปรแกรม COREL DRAW ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 หลังจากนั้นทำการถ่ายมาสก์บนฟิล์มเพื่อใช้ในการสร้างต่อไป

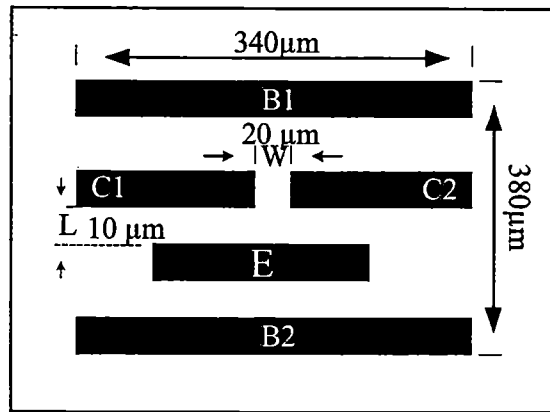


รูปที่ 3.8 โปรแกรม COREL DRAW สำหรับการออกแบบลวดลายต้นแบบ

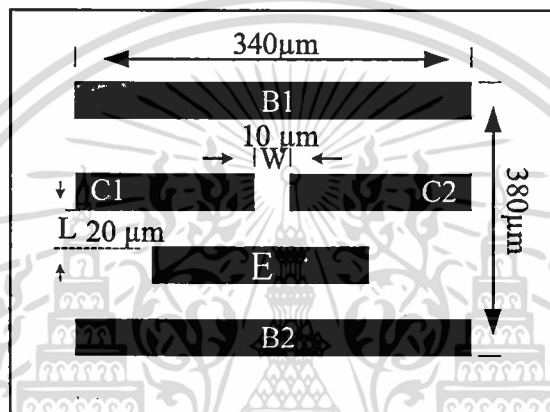


(ก) พารามิเตอร์ที่ 1  $W=20\mu\text{m}$ ,  $L=20\mu\text{m}$

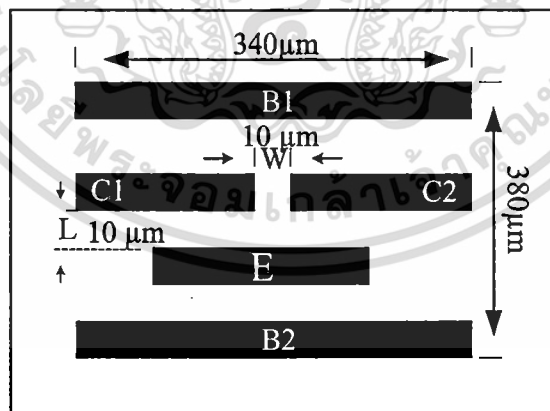
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) พารามิเตอร์ที่ 2  $W=20\mu\text{m}$ ,  $L=10\mu\text{m}$



(ค) พารามิเตอร์ที่ 3  $W=10\mu\text{m}$ ,  $L=20\mu\text{m}$



(ง) พารามิเตอร์ที่ 4  $W=10\mu\text{m}$ ,  $L=10\mu\text{m}$

รูปที่ 3.9 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำการออกแบบที่ค่า  $W$  และค่า  $L$  ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการออกแบบอุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แล้ว  
ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ ความยาว  $L$  และความกว้าง  $W$  ทั้ง 4 ค่า จากนั้นทำการออกแบบมาสก์ ซึ่ง  
หลังจากการออกแบบมาสก์แล้วจะมีมาสก์ทั้งหมด 4 มาสก์

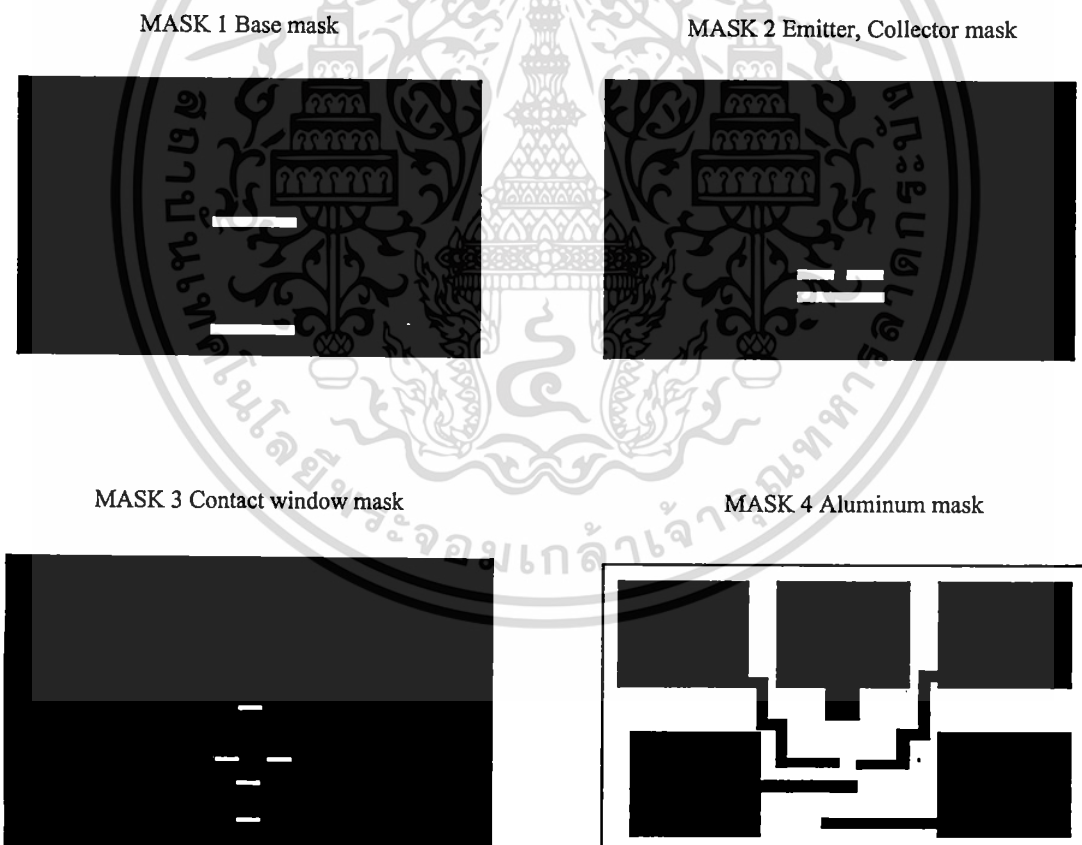
ในการออกแบบทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 4 มาสก์ ซึ่งประกอบด้วย

มาสก์ที่ 1 : Base Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับสร้างชั้นเบสทั้งสอง โดยการ  
แพร่อะตอมสารเจือโบรอน ( $N^+$ )

มาสก์ที่ 2 : Emitter, Collector Mask โดยการเปิดช่องออกไซค์ และแพร่อะตอมสารเจือ  
ฟอสฟอรัส ( $P^+$ ) สร้างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์

มาสก์ที่ 3 : Contact Windows Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องบริเวณที่จะสร้าง  
ขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม กับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม

มาสก์ที่ 4 : Aluminum Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน เพื่อสกดชั้น  
อะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 ลวดลายต้นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

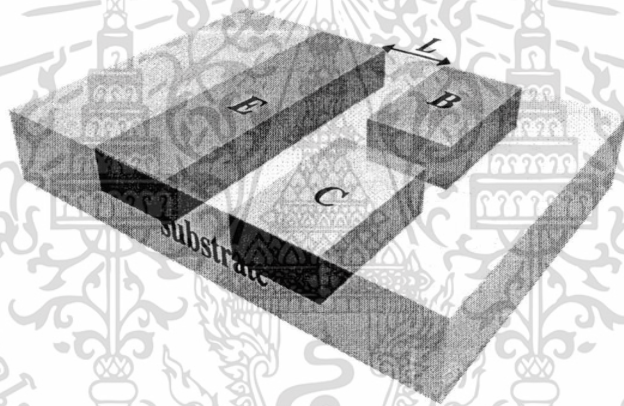
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

### 3.2.1 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 3.11 แมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างสามขานี้เป็นการพัฒนารูปแบบโครงสร้างเพื่อลดความยุ่งยากการไบอัสและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอนเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และคอลเลคเตอร์ C

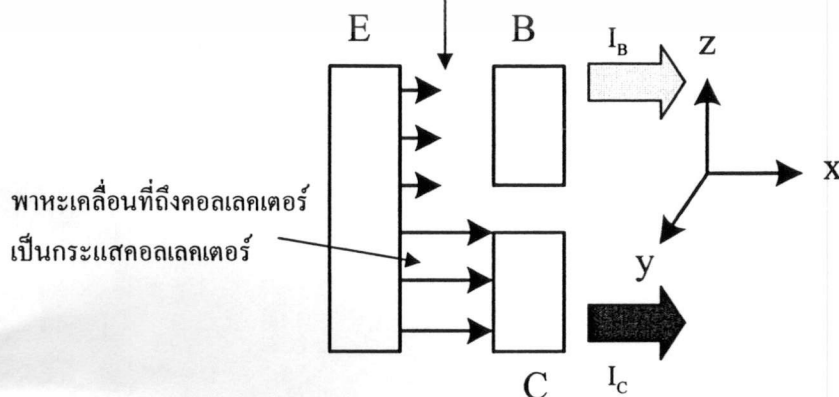
แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบส (recombination) เป็นกระแสเบส และพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection) โดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) พิจารณาจากรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 รูปโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา [11]

พาหะรวมตัวในเบส

เป็นกระแสเบส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.12 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่ออิมิตเตอร์-เบสได้รับแรงดันไปข้างหน้าทำให้พาหะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปสู่เบสกลายเป็นกระแสอิมิตเตอร์โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถแสดงกระแสอิมิตเตอร์ โดยการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ดังอธิบายจากบทที่ 2 แสดงได้ดังสมการที่ 2.31

$$I_E = I_B + I_C$$

สมการความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังสมการที่ 3.7 [10-11]

$$S = \frac{\Delta I_{CB}}{\Delta B} \quad (3.7)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กกับพารามิเตอร์โครงสร้างสมการที่ 3.3  $S = \frac{\Delta I_C \cdot L \cdot \mu_p}{W}$  สามารถแสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาได้ดังสมการที่ 3.8

$$S \propto \Delta I_{CB} \cdot L \cdot \mu_p \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.8 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์กับระยะความกว้างเบส  $L$  โดยที่ไม่มีผลของระยะ  $W$  เนื่องจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาอาศัยพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสระยะการเบี่ยงเบนจึงไม่มีผลต่อเอาต์พุตของอุปกรณ์เสมือนระยะ  $W$  เท่ากับศูนย์ โดยในการออกแบบระยะความยาวเบส  $L$  จะกำหนดที่ระยะ  $20 \mu\text{m}$  ซึ่งเป็ระยะที่คาดว่าจะได้เอาต์พุตที่ดีที่สุดดังอธิบายแล้วในแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา ออกแบบความยาวอิมิตเตอร์ให้มีขนาดครอบคลุมส่วนเบสและส่วนคอลเลกเตอร์โดยขนาดของเบสและคอลเลกเตอร์มีขนาดเท่ากัน

### 3.2.2 โครงสร้างสองตัวรวมกระแส

การศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขานี้้นนอกจากโครงสร้างแบบปกติแล้วยังทำการศึกษาคู่อสร้างสองตัวรวมกระแสโดยการทำงานอาศัยการรวมกันของกระแสเบส ( $I_{B(a)} + I_{B(b)}$ ) กับกระแสคอลเลกเตอร์ ( $I_{C(a)} + I_{C(b)}$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสอง (MT(a) และ



MT(b)) ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาโครงสร้างสองตัวรวมกระแส ดังแสดงรูปที่ 3.14 ประกอบด้วยอิมิตเตอร์หนึ่งขั้ว, คอลเลคเตอร์สองขั้วและขั้วเบสสองขั้ว ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์แสดงได้โดยสมการที่ 3.8

$$\Delta I_{CB} = [(I_{B(a)} + I_{B(b)}) - (I_{C(a)} + I_{C(b)})] \quad (3.9)$$

สมการความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โครงสร้างสองตัวรวมกระแสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.9 ซึ่งจากการทำงานทำให้ค่าเอาต์พุต ที่ได้มีค่าเป็นสองเท่าเปรียบเทียบกับ โครงสร้างตัวเดี่ยวนั้นคือทำให้ค่าความไวในการตรวจจับ สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าอีกด้วย



รูปที่ 3.13 ด้านตัดขวางโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแบบสองตัวรวมกระแส [11]

การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่มีรูปแบบ โครงสร้างสองตัวรวมกระแส กำหนดระยะความกว้างเบส  $L=20\mu\text{m}$  โดยความยาวอิมิตเตอร์ครอบคลุมขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ โดยที่ขั้วเบสและคอลเลคเตอร์มีขนาดเท่ากันและสมมาตรกันเนื่องจากพหุเมทริกซ์ทางเคลื่อนที่ เบี่ยงเบนแตกต่างกันสองทิศทาง โครงสร้างนี้จึงสามารถแสดงค่าเอาต์พุตที่สูงกว่าแบบปกติได้ การออกแบบมาส์คของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาทำการออกแบบด้วยโปรแกรม COREL DRAW หลังจากนั้นทำการถ่ายมาส์คลงบนฟิล์มเพื่อใช้ในการสร้างต่อไป

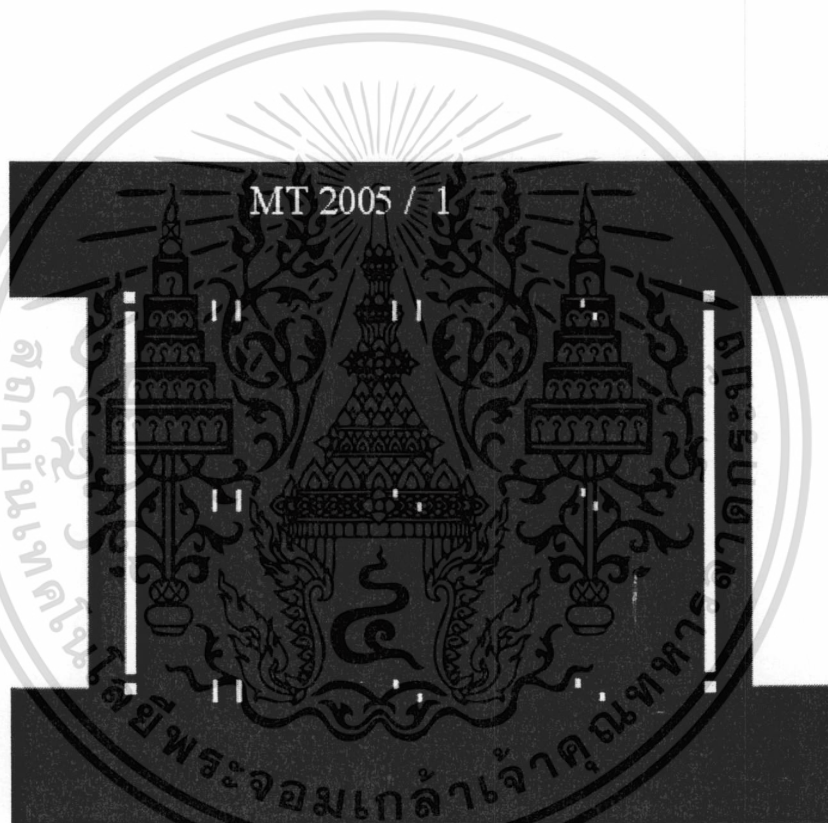
ในการออกแบบทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 4 มาส์คดังแสดงรูปที่ 3.15 ซึ่งประกอบด้วย

มาส์คที่ 1 : Base Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับเพื่อสร้างส่วน Base โดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน ( $N^+$ )

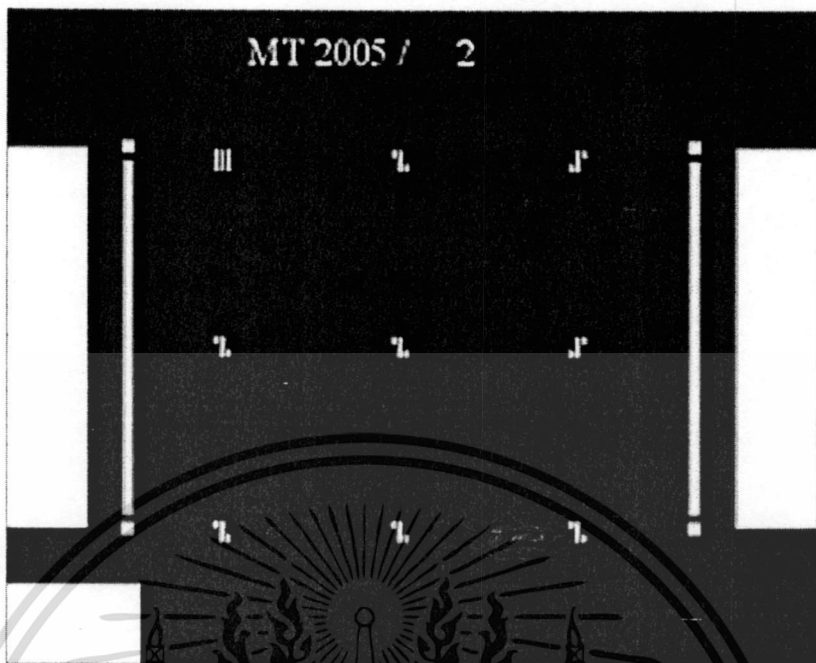
มาส์คที่ 2 : Emitter, Collector Mask โดยการเปิดช่องออกไซค์ และแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ( $P^+$ )

มาส์คที่ 3 : Contact Windows Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม กับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม

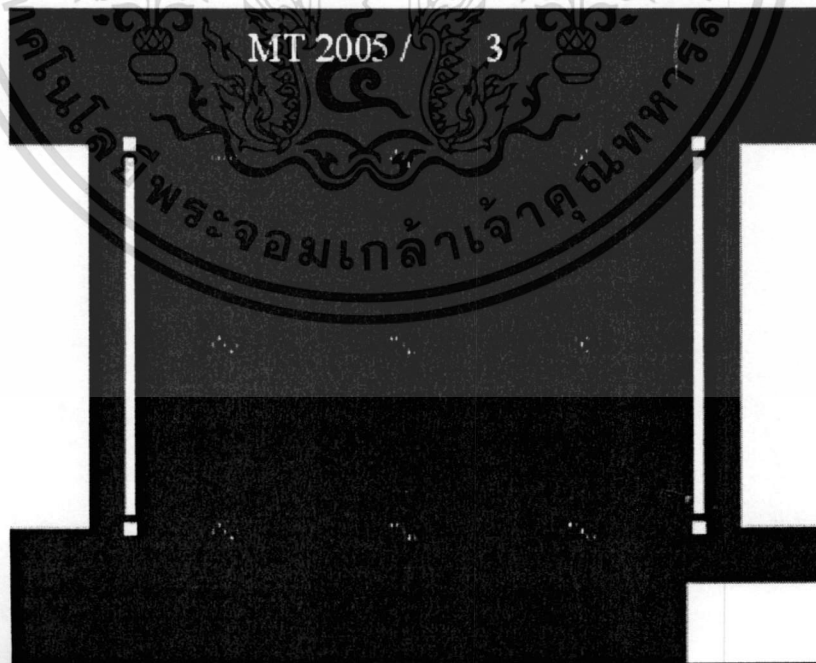
มาส์คที่ 4 : Aluminum Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน เพื่อสะกัดชั้นอะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า



(ก) Base Mask

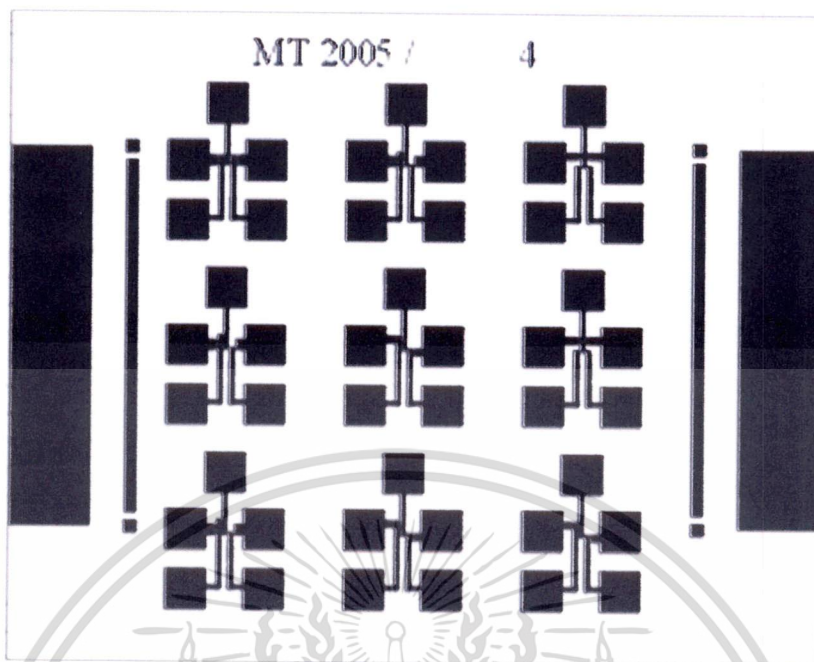


(ข) Emitter, Collector Mask



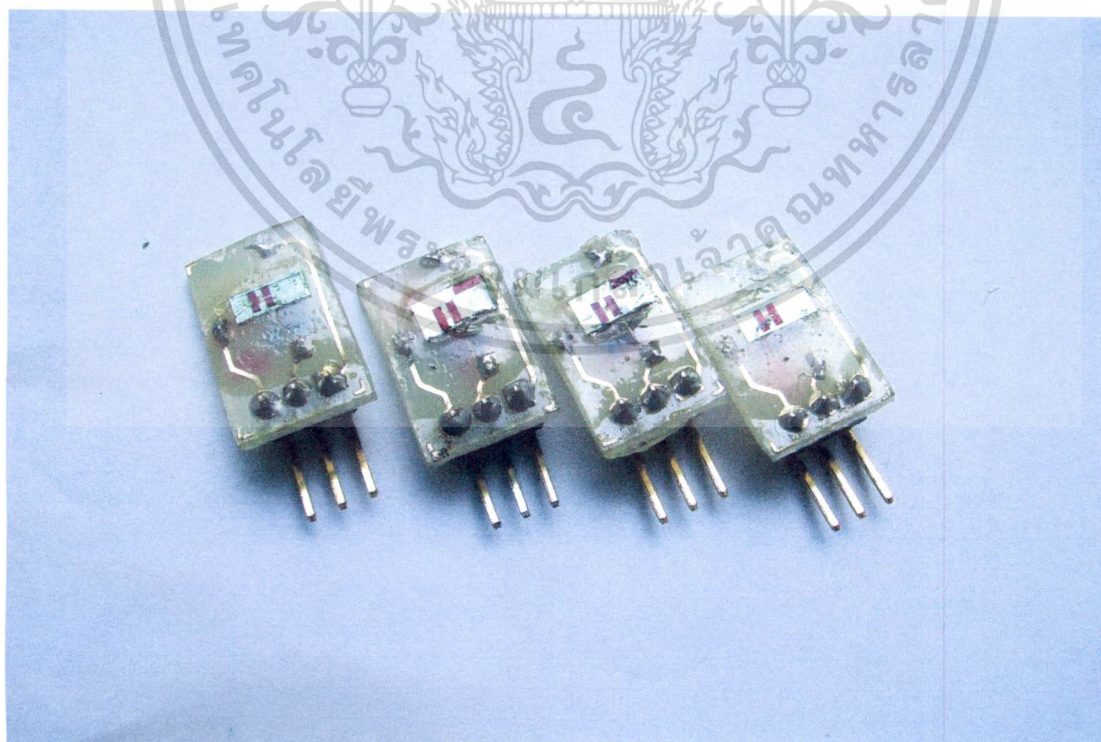
(ค) Contact Window Mask

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) Aluminum Mask

รูปที่ 3.14 สวดลายต้นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา



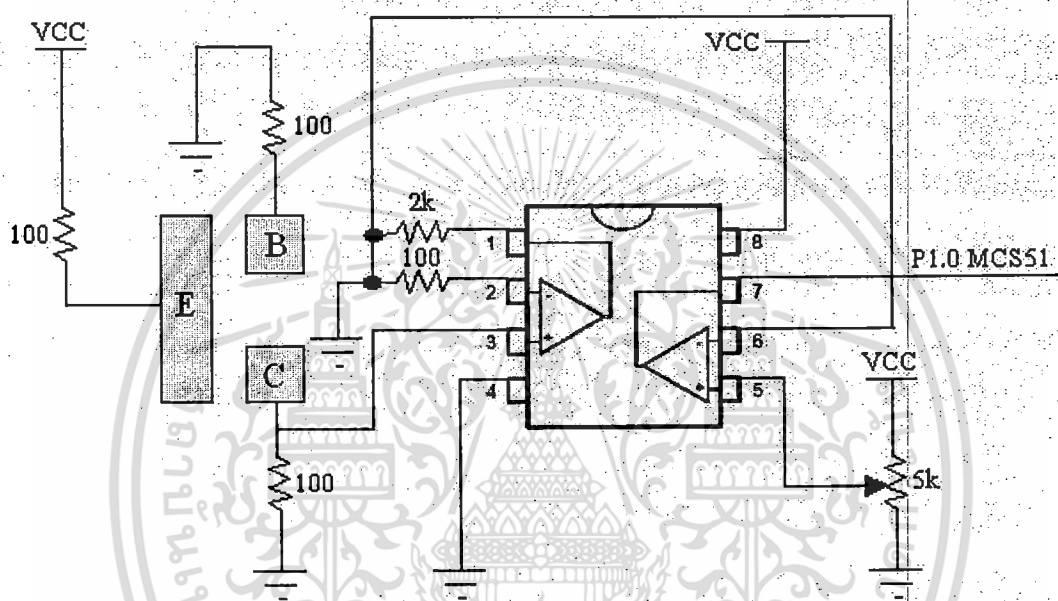
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ต่อร่วมกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการวัดค่าของสนามแม่เหล็ก โดยแบ่งเป็นสองส่วนวงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กและส่วนแสดงผล

#### 4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กหลัก



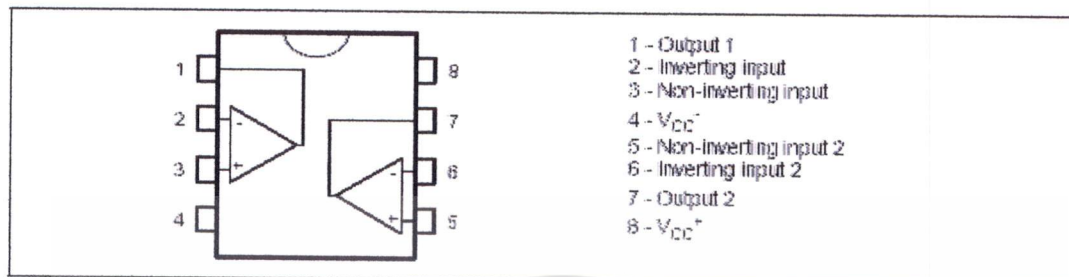
รูปที่ 4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

#### การทำงานของวงจร

จากรูปประกอบไปด้วยวงจรไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เมื่อแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำงานจะทำให้มีกระแสที่ขา B และขา C เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะทำให้กระแสที่ไหลเกิดความเปลี่ยนแปลง โดย IC LM358 ตัวแรกจะทำหน้าที่ขยายแรงดันให้มีค่าพอเหมาะ และ ต่อมา IC LM358 ตัวที่สองจะทำหน้าที่เปลี่ยนเทียบแรงดัน และส่งต่อไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล

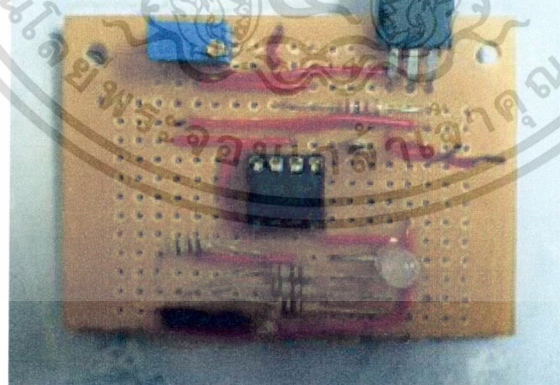
## ภาคขยาย

โดย IC LM358 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ โดยมีอัตราขยายอยู่ที่ 21 เท่า และทำการส่งแรงดันที่พอเหมาะไปยังภาคเปรียบเทียบแรงดันต่อไป



Symbol	Parameter	LM158,A	LM258,A	LM358,A	Unit
$V_{cc}$	Supply voltage		+32		V
$V_i$	Input Voltage		-0.5 to +32		V
$V_{id}$	Differential Input Voltage		+32		V
$P_{tot}$	Power Dissipation <sup>(1)</sup>		500		mW
	Output Short-circuit Duration <sup>(2)</sup>		Infinite		
$I_{in}$	Input Current <sup>(3)</sup>		50		mA
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
$T_{stg}$	Storage Temperature Range		-65 to +150		°C

รูปที่ 4.2 โครงสร้างและการต่อใช้งาน



รูปที่ 4.3 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ส่วนแสดงผล

### 4.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่รวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณเอาต์พุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบ ในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้น

โครงสร้างของ MCS- 51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีด้วยกันหลายเบอร์ขึ้นกับโครงสร้างภายในของมัน บางเบอร์จะมีหน่วยความจำภายในเป็นแบบ ROM บางเบอร์เป็นแบบ EPROM บางเบอร์ RAM ภายใน 128 ไบต์ บางเบอร์มี 256 ไบต์ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดจะศึกษาได้จากคู่มือของมันโดยตรง และลักษณะของขาต่าง ๆ จะเหมือนกัน คุณสมบัติที่สำคัญของ MCS-51 มีดังนี้

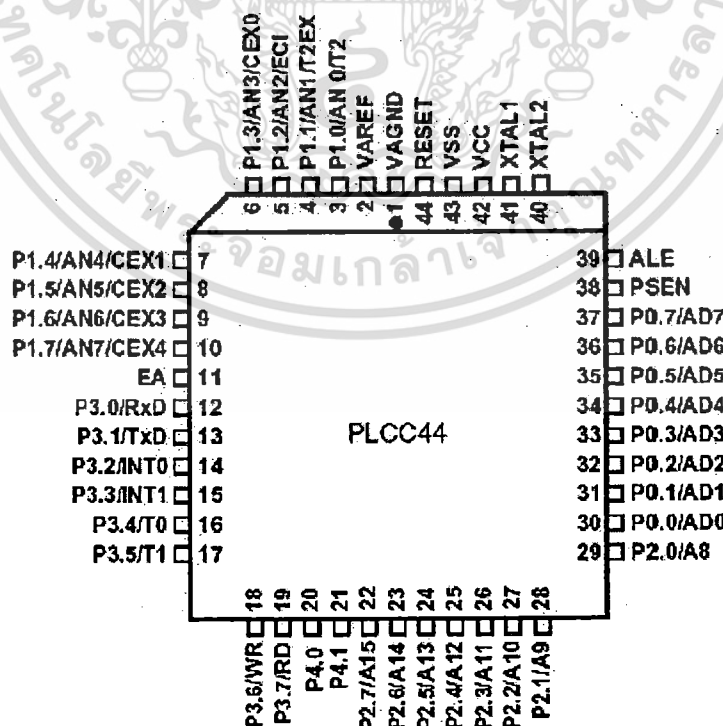
- มีหน่วยความจำ ROM 4 k bytes
- มีหน่วยความจำ RAM 128 bytes
- มีพอร์ต I/O ขนาด 8 บิต 4 พอร์ต เป็นแบบสองทิศทาง สามารถใช้งานได้ทั้งอินพุตเอาต์พุต
- มี Time 16 บิต 2 ตัว
- สามารถอินเตอร์รัพท์ได้ 5 แหล่ง
- มีวงจรออสซิลเลเตอร์และวงจรมานาฬิกาบนชิพ
- สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
- มีพอร์ตอนุกรมที่สามารถรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex ความเร็วสูง
- สามารถประมวลผลทีละบิตได้
- สามารถอ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ 64 k

ตัวอย่างไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 และลักษณะต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่าง ๆ

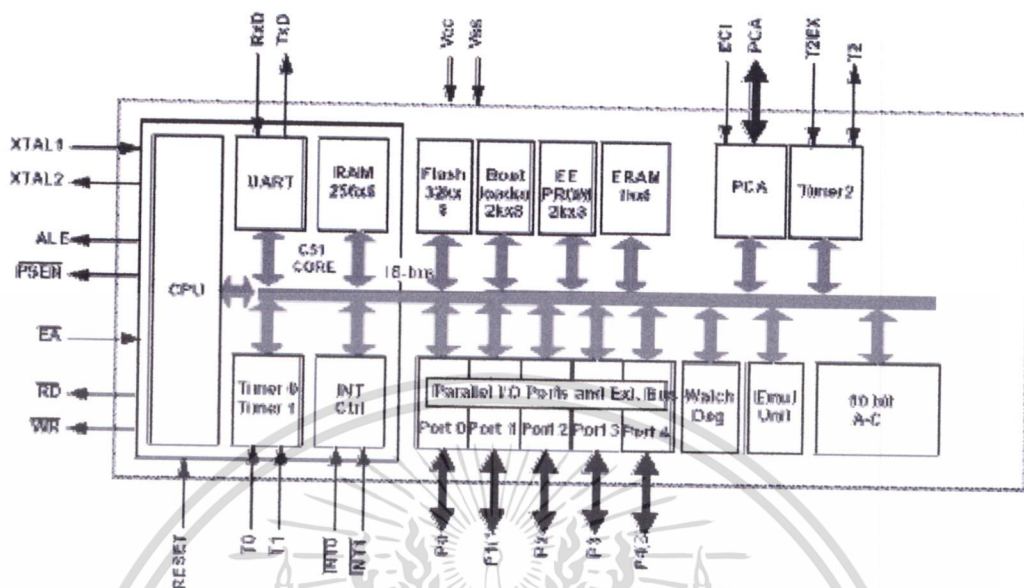
เบอร์	หน่วยความจำ โปรแกรมบนชิพ	หน่วยความจำข้อมูล บนชิพ	TIMERS
8051	4k ROM	128 bytes	2
3031	-	128 bytes	2
8751	4k EPROM	128 bytes	2
8052	8k ROM	256 bytes	3
8032	-	256 bytes	3
8752	8k EPROM	256 bytes	3
AT89C51	4K FLASH	128 bytes	2
AT89C52	8k FLASH	256 bytes	3
AT89C2051	2k FLASH	128 bytes	2

โดยในโครงการนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ T89C51AC2 ซึ่งมีขาต่อใช้งานดังนี้

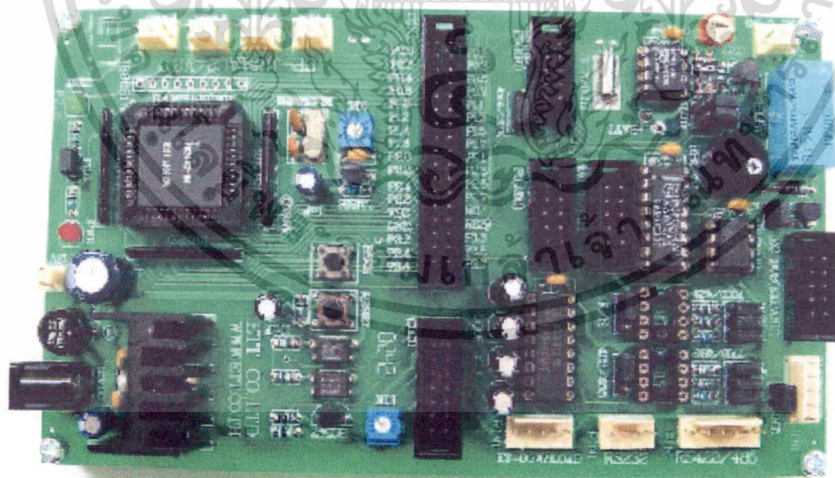


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะขององค์กรศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.4 แสดงการจัดขาสัญญาณของ T89C51AC2  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.5 แสดงบล็อกโคจระกรมของ T89C51AC2



รูปที่ 4.6 บอร์ดที่ใช้ในการทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดสรร I/O ของพอร์ตต่าง ๆ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชมีพอร์ตใช้งานทั้งหมด 4 พอร์ตคือ พอร์ต 0 ถึง พอร์ต 3 แต่ละพอร์ตมีขนาด 8 บิตเป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง กล่าวคือ สามารถเป็น ได้ทั้งอินพุต สำหรับรับสัญญาณข้อมูลเข้า และเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณข้อมูลออก

โดย ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ T89C51AC2 จะมีขาที่สามารถนำมาใช้งานเป็น I/O พอร์ตได้ ทั้งหมด 34 เส้นประกอบด้วย

- P0 (0...7) จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- P1 (0...7) จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- P2 (0...7) จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- P3 (0...7) จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- P4 (0...7) จำนวน 2 เส้นสัญญาณ

โดยมีการจัดสรรพอร์ตต่างให้นำไปใช้งานต่าง ได้ดังนี้

P0.0-P0.7 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้สามารถใช้งานเป็น input หรือ Output ได้ตาม ต้องการ โดยในบอร์ดนั้นขาสัญญาณของ P0 ทั้งหมด จะถูกเชื่อมต่อไปยังขั้วต่อ 34 PIN และ ขั้วต่อ P0 ไว้ด้วย โดยที่ P0.0-P0.6 จะต่อตรงไปยังขั้ว P0(kbi)ทั้งหมด สัญญาณ P0.7 0จะต่อไป ควบคุมลำโพง

P1.0-P1.7 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้จะสามารถใช้งานได้หลายหน้าที่ เช่น ใช้งานเป็น ADC ใช้งานเป็น Input หรือ Output และบางขายังสามารถใช้งานในหน้าที่พิเศษของระบบ Timer และ PCA ได้อีกด้วย โดยขาสัญญาณทั้งหมดจะถูกเชื่อมต่อไปยังขั้วต่อ 34 PIN และขั้วต่อ P1(ADC)

P2.0-P2.7 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้จะสามารถใช้งานได้ทั้งเป็น Input และ Output โดย ขาสัญญาณทั้งหมดของ P2 จะถูกต่อไปยังขั้วต่อ 34 PIN ส่วน P2.0-P2.5 แล้วต่อไปยังขั้วต่อ CLCD เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของ LCD

P3.0 ทำหน้าที่เป็น RXD ของวงจรถ่ายโอนข้อมูล RS232/422/486

P3.1 ทำหน้าที่เป็น TXD ของวงจรถ่ายโอนข้อมูล RS232/422/486

P3.2 ใช้งานเป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา INT0

P3.3 ใช้งานเป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา INT1

P3.4 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับสัญญาณ ไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0

P3.5 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1

P3.6 ใช้เป็นขาสัญญาณ WR ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P3.7 ใช้เป็นขาสัญญาณ RD ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P4.0 จะใช้ทำหน้าที่ติดต่อกับอุปกรณ์ I2C BUS โดยทำหน้าที่เป็น SCL

P4.1 จะใช้ทำหน้าที่ติดต่อกับอุปกรณ์ I2C BUS โดยทำหน้าที่เป็น SDA

ขา รีเซ็ต(Reset) ใช้ในการรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซ็ตสถานะที่ขานี้

ขา ALE เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมการแลชของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำ

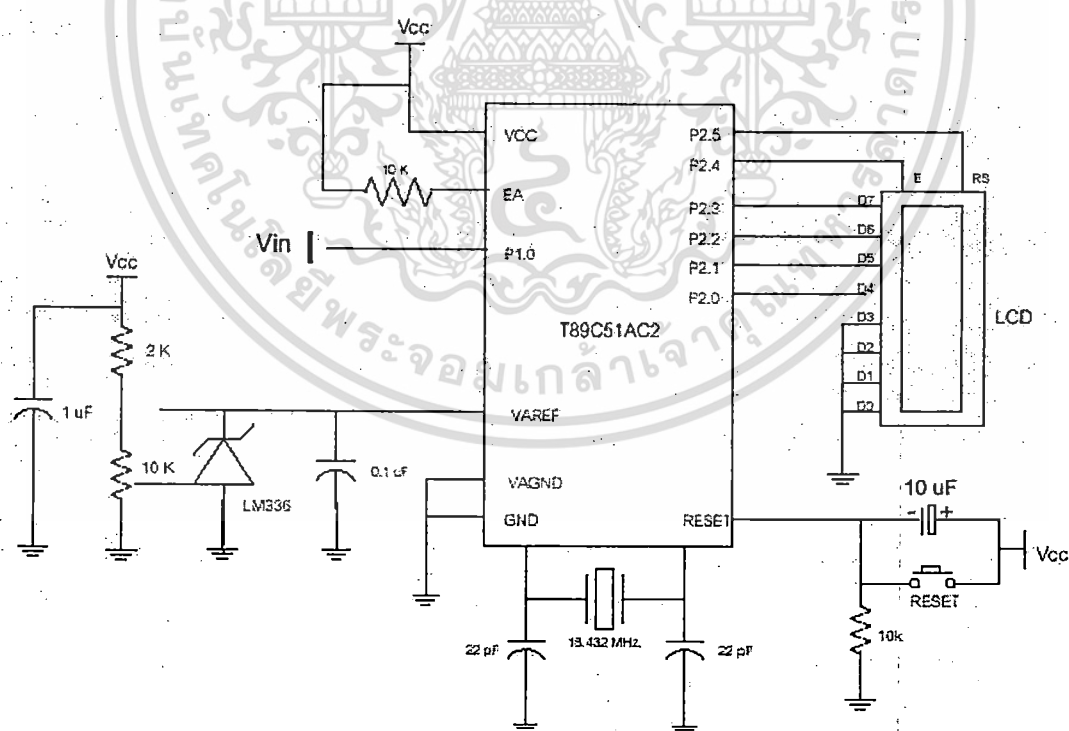
ขา PSEN ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรม

ภายนอก

ขา EA ใช้สำหรับเลือกการติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมจากภายนอกหรือภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

ขา XTAL1 และขา XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตัลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการรันหนดังหะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

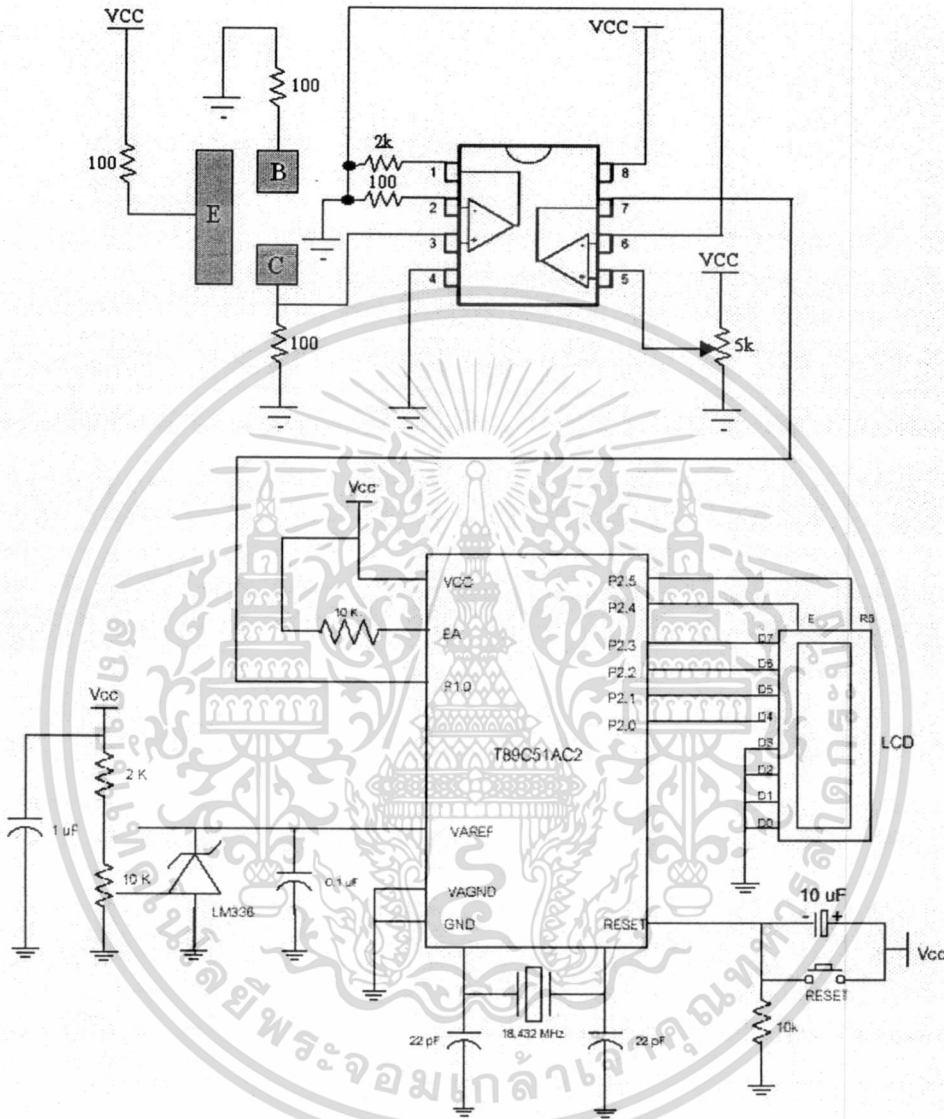
การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับส่วนแสดงผล LCD



รูปที่ 4.7 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 วงจรวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กแสดงผลออกจอ LCD



รูปที่ 4.8 วงจรวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กแสดงผลออกหน้าจอ LCD

จากรูปแสดงการเชื่อมต่อวงจรส่วนของวงจรวัดและส่วนแสดงผล โดย Output ของวงจรภาคขยายในวงจรวัดจะต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พอร์ต P1.0 ซึ่งเป็นพอร์ตใช้งาน ADC จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอนาลอกให้เป็นดิจิทัลเพื่อส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลแล้วแสดงค่าออกมาที่หน้าจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

โครงการนี้เป็นการประดิษฐ์หัววัดแม่เหล็กชนิดสามขาที่พัฒนาขึ้นเอง ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาอาศัยความแตกต่างระหว่างของกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ที่เกิดจากการกระทำของแรงลอเรนซ์อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กโดยมีทิศทางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของกระแส โดยแรงลอเรนซ์จะกระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเบี่ยงเบนซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสอง

นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบวงจรเพื่อสร้างเป็นชุดทดลองและนำไปใช้ร่วมกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์เพื่อวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้งาน วงจรที่ออกแบบประกอบด้วยส่วนของวงจรจ่ายกระแสคงที่ ส่วนของวงจรขยายสัญญาณและตกแต่งสัญญาณ และส่วนแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม ผลการทดลองแสดงได้ดังวิทยุทัศน์แนบอยู่ที่ปกหลังด้านใน

จากผลการทดลองเครื่องวัดความเร็วรอบด้วยหลักการแม่เหล็กและตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถยืนยันว่าสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี นั้นแสดงว่า หลักการและอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถนำมาใช้งานจริง และสามารถพัฒนาเครื่องให้มีประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น ในส่วนของหัววัดก็เช่นเดียวกันที่สามารถที่จะพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพสูง มีค่าความไวมากขึ้นและประหยัดพลังงาน

หลักการเครื่องวัดความเร็วรอบนี้มีข้อดีที่แม่ตัวกลางคืออากาศจะมีความสกปรก เช่นมีฝุ่นละอองหรือหมอกที่หนา เส้นแรงแม่เหล็กสามารถที่จะวิ่งตัดผ่านได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดเซนเซอร์ประเภทแสง นอกจากนี้เส้นแรงแม่เหล็กสามารถที่ผลิตจากแม่เหล็กถาวร ได้ซึ่งไม่ต้องการไบแอสใดๆ ทำให้เกิดความสะดวกแก่การใช้งาน

## บรรณานุกรม

- [1] H. P. Baltes and R. S. Popovic, **“Integrated semiconductor magnetic field sensors,”** IEEE, vol. 74, p.1107, 1986.
- [2] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, **“Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor,”** Sensors and Actuators A, 45 (1994) 179-182.
- [3] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues and F. Rodrigues, **“Merged lateral bipolar magnetotransistor,”** Sensors and Actuators A, 50 (1995) 177-181.
- [4] L. Ristic, T. Smy and Henry P. Baltes, **“A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic field,”** IEEE Trans Electron Devices, vol.36, NO 6, 1989.
- [5] Henry P. Baltes, **“Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor,”** IEEE Trenton Electron Devices, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986.
- [6] T. Nakamura and K. Maenaka, **“Integrated Magnetic Sensor,”** Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [7] ชนะ สีกัทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, **“ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวคิง”**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เดือน พฤศจิกายน ปี 2546, หน้า 1419-1424
- [8] Toempong Phetchakul, Weera Pengchan, Chana Leepattarapongpan, **“Three Terminals Magnetotransistor Sensing by Difference of Base and Collector Current,”** International Conference on Materials for Advance Technologies, D-4-OR9, 2005.
- [9] Agnes Nagy and Hector Trujillo, **“3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals,”** Sensors and Actuators A, 58 (1997) 137-140.
- [10] ชนะ สีกัทรพงศ์พันธ์, วีระเพ็ญจันทร์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, **“แมกนีโตทรานซิสเตอร์โหมคการทำงานตามขั้ว”**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เดือน พฤศจิกายน ปี 2547, หน้า 273-276
- [11] ชนะ สีกัทรพงศ์พันธ์, วีระเพ็ญจันทร์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, **“ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์”**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, เดือน ตุลาคม ปี 2548, หน้า 1225-1228
- [12] T. Smy and Lj. Ristic, **“Optimization of Magnetotransistor Structure in CMOS Technology,”** IEEE Transactions on MAGNETICS, vol.28, NO.5, SEPTEMBER 1992.
- [13] L. Ristic (ed), **Sensor Technology and Devices**, Artech House, Norwood, 1994, Ch. 7,

- [13] L. Ristic (ed), **Sensor Technology and Devices**, Artech House, Norwood, 1994, Ch. 7, pp. 239-285.
- [14] S. Middelhoek and S.A. Audet, **Silicon Sensors**, Academic Press, London, 1989, Ch. 5, pp. 201-244.
- [15] Julian W. Gardner, **Microsensors Principles and Application**, John Wiled & Sons, Chichester, 1994, Ch. 8, pp. 199-220.
- [16] Toempong Phetchakul, Chana Leepattarapongpan Weera Pengchan, **“Magnetotransistor Sensing by the Difference of Base and Collector Current,”** International Symposium on Integrated Circuits, 2004.
- [17] Agnes Nagy and Hector Trujillo, **“Highly sensitive magnetotransistor with new topology,”** Sensors and Actuators A, 65 (1998) 97-100.
- [18] O. Neagoe, M. Avram, C. Ravariu, **“The Efficiency Increase for Integrated Lateral Dual Collector Magnetotransistor,”** IEEE, (1998) 289-291.
- [19] M. Avram, O. Neagoe, C. Codreanu, C. Voitincu, M. Simion, **“An Optimised Bipolar Lateral Magnetotransistor,”** IEEE, (1998) 83-86.
- [20] 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 สุขเดช “เซมิคอนดักเตอร์ฟิลิสิกส์” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542.
- [22] รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “ฟิลิสิกส์สารกึ่งตัวนำ” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542.
- [23] รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544.
- [24] รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “เซนเซอร์และทรานดิวซ์เซอร์” เอกสารประกอบการสอน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545.

## ภาคผนวก

## 1. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน

Properties of Si at 300 K	
Properties	Si
Atoms/cm <sup>3</sup>	$5.0 \times 10^{22}$
Atomic weight	28.09
Breakdown field, V/cm	$\sim 3 \times 10^5$
Crystal Structure	Diamond
Density, g/cm <sup>3</sup>	2.328
Distance between neighboring atoms, nm	0.2328
Effective density of states	
Valence band, cm <sup>-3</sup>	$1.04 \times 10^{19}$
Conduction band, cm <sup>-3</sup>	$2.8 \times 10^{19}$
Effective mass, m/mo	
Electron	$m_e = 0.98$
	$m_i = 0.19$
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 <sup>-3</sup>	$1.45 \times 10^{10}$
Intrinsic Debye length, $\mu\text{m}$	24
Intrinsic resistivity, W-cm	$2.3 \times 10^5$
Lattice constant, nm	0.5431
Linear coefficient of thermal expansion, cm/(cm-K)	$2.6 \times 10^{-6}$
Melting point, °C	1415
Minority-carrier lifetime, s	$2.5 \times 10^{-3}$
Mobility, cm <sup>2</sup> /(V.s)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในสถานศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Properties	Si
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 <sup>2</sup> /s	0.9
vapor pressure, Pa	1 at 1659 °C 10 <sup>-6</sup> at 900°C
Young's modulus, g/cm	1.089×10 <sup>9</sup>

## 2. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิกอนไดออกไซด์

Properties of SiO <sub>2</sub> at 300 K	
Properties	SiO <sub>2</sub>
Density, g/cm <sup>3</sup>	2.2
DC resistivity, μm.cm	10 <sup>14</sup> -10 <sup>16</sup>
Dielectric strength, V/cm	~10 <sup>7</sup>
Energy gap, eV	9
Infrared absorption band, μm	9.3
Melting point, °C	~1600
Refraction index	1.46
Relative permittivity (dielectric constant)	3.9
Structure	Amorphous
Thermal expansion coefficient, K <sup>-1</sup>	5×10 <sup>-7</sup>
Thermal conductivity, W/(cm.K)	0.014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้