

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขั้วความไวสูงและกินพลังงานต่ำ  
High Sensitivity and Low Power 3 terminal Magnetotransistor



ชื่อผู้วิจัย รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรภูด

RC4  
TX  
M891.96  
4355  
ตจว.ลค  
ค 1

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 115563  
วัน,เดือน,ปี 21 ส.ค. 2554

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน  
ประจำปีงบประมาณ 2553  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12313178  
b.....  
i.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการเอื้อเฟื้อสถานที่ และห้องปฏิบัติการในการวิจัยต้นแบบ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ ในการสร้างอุปกรณ์ด้วยเทคโนโลยีซีมอส ขอขอบคุณนายปัญญากร โสคติพย์ นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ในการสร้างอุปกรณ์ การวัดวิเคราะห์

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงแก่ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือเป็นกัลยามิตรไม่ว่าโดยตรง หรือโดยอ้อมก็ตาม อาทิเช่นคณะกรรมการพิจารณาให้ทุนสนับสนุน เป็นต้น และหวังว่าจะได้รับการสนับสนุนการวิจัยในโอกาสต่อไป



รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล  
(หัวหน้าโครงการ)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขั้วความไวสูงและกินพลังงานต่ำ  
 ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) High Sensitivity and Low Power 3 Terminal Magneto-transistor  
 แหล่งเงิน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.).....

ประจำปีงบประมาณ ..... 2553 ..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน ..... 340,000 ..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย ..... 1 ..... ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2552 ..... ถึง กันยายน 2553

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

..... รศ.ดร.เดิพงษ์ เพ็ชรกุล (หัวหน้าโครงการ).....

..... สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....

..... คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

คำสำคัญ (Keywords) Magneto-transistor, Hall Effect, CMOS.....

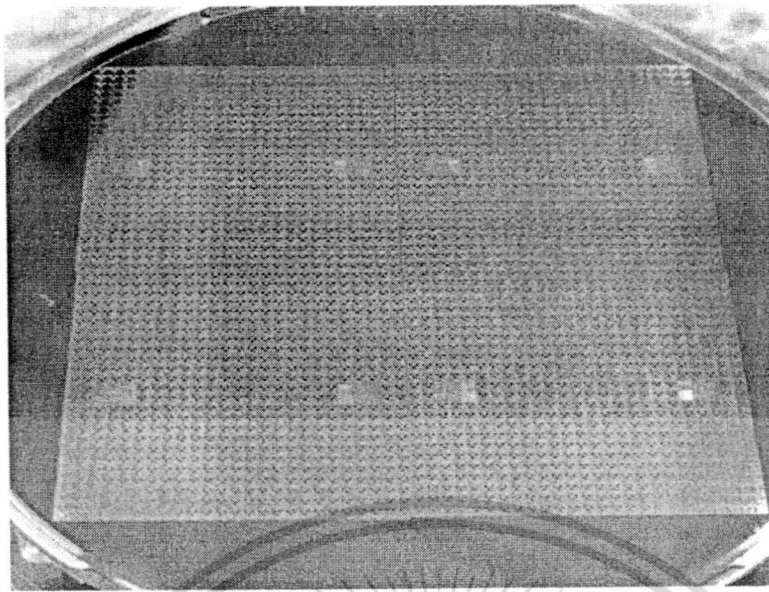
### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากกับพื้นผิวที่มีขาอิมิตเตอร์ ขาเบสและขาคอลเลกเตอร์เหมือนทรานซิสเตอร์ปกติทั่วไป หลักการทำงานอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะส่วนน้อยในเบสทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ โครงสร้างที่ทำวิจัยใช้ฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์มาป้องกันกระแสที่ไม่มีส่วนต่อเอาต์พุตรอบส่วนอิมิตเตอร์เพื่อประหยัดพลังงาน นอกจากนั้นจะทำให้ค่าความไวของอุปกรณ์ดีขึ้นที่กระแสไบแอสเท่ากัน จากการทดลองสามารถเพิ่มค่าความไวมากขึ้น 35.22% ในทิศทางสนามแม่เหล็กทิศ +B และ 40.62% ในทิศ -B เมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างสามขาแบบเริ่มแรก และช่วยประหยัดพลังงานลง 32.82% (-B) และ 32.04% (+B) ที่ค่ากระแสไบแอส 2.5 มิลลิแอมแปร์

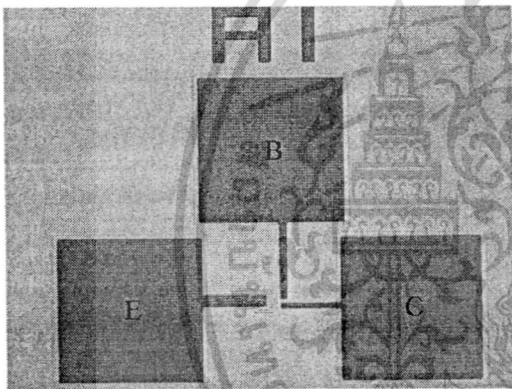
### Abstract

This research presents the low power magneto-transistor which detects magnetic field density in vertical direction. The devices can detect magnetic field by Lorentz's force act upon minority carrier in base and difference between base and collector current ( $\Delta I_{cb}$ ) is occurred. The structure of the low power magneto-transistor consist of one emitter, one collector and one base contact and designed decrease emitter injection area was 5 um and growth LOCOS oxide around emitter area. This structure increases sensitivity 35.22% (+B) and 40.62% (+B) of the low power magneto-transistor when compare the three terminals magneto-transistor and reduces the power consumption 32.82% (-B) and 32.04% (+B) at the same bias current 2.5mA.

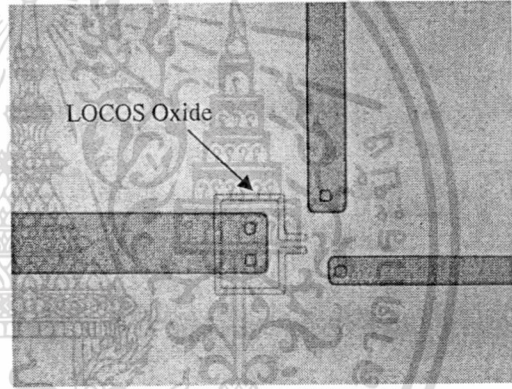
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สร้างเสร็จแล้วบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์

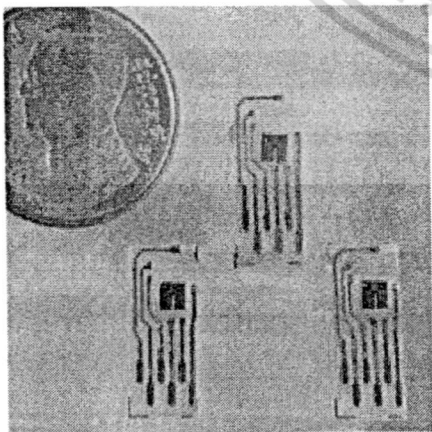


(ก).ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 40 เท่า

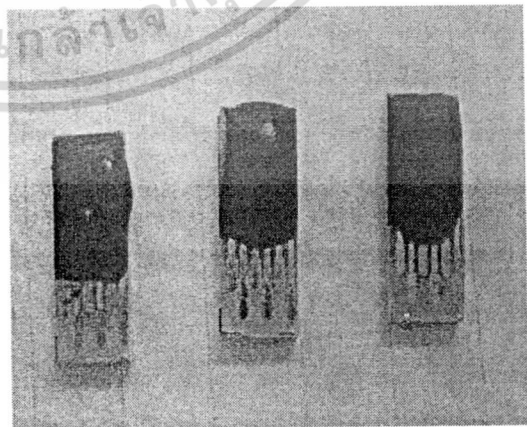


(ข).ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 400 เท่า

รูปแสดงภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 400 เท่า



(ก). การเชื่อมโลหะใช้งาน



(ข). การเคลือบอุปกรณ์ด้วยเรซิน

รูปแสดง (ก).การเชื่อมต่อโลหะสำหรับต่อใช้งานกับอุปกรณ์ภายนอก และ (ข).การบรรจุภัณฑ์โดย

เคลือบอุปกรณ์ด้วยเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
สัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	2
1.2. ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	3
1.3. สมมติฐานการศึกษา	3
1.4. ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย	4
1.5. ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.6. ขั้นตอนของการศึกษา	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1. อุปกรณ์ฮอสต์เซ็นเซอร์	8
2.1.1. หลักการปรากฏการณ์ของฮอสต์	8
2.1.2. แรงตอลเลนซ์	8
2.1.3. หลักการทำงานของแผ่นฮอสต์เพลต	9
2.1.4. เซ็นเซอร์แม่เหล็ก โครงสร้างฮอสต์	14
2.2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์	17
2.2.1. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน	17
2.2.2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง	19
2.3. คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์	21
บทที่ 3 โครงสร้างและหลักการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์	24
3.1. โครงสร้างและการใช้งานอุปกรณ์	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา	24
3.1.2 วิธีการใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา	25
3.1.3 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ	28
3.1.4 วิธีการใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ	30
3.2 หลักการทำงาน	30
3.2.1 กลไกการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะ	30
3.2.2 กลไกการรวมตัวใหม่	33
บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง	35
4.1 กระบวนการออกซิเดชัน	35
4.1.1 กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	36
4.1.2 กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก	37
4.1.3 การสร้างชั้นออกไซด์หนา	37
4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	38
4.2.1 ทำความสะอาดผิวหน้า	39
4.2.2 การเตรียมผิวหน้า	40
4.2.3 การเคลือบน้ำยาไวแสง	41
4.2.3.1 น้ำยาไวแสง	41
4.2.3.2 วิธีการเคลือบ	42
4.2.4 การอบ	44
4.2.5 การปรับมาส์คและการฉายแสง	45
4.2.5.1 การปรับมาส์ค	45
4.2.5.2 การฉายแสง	47
4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง	48
4.3 การกัด	48
4.3.1 การกัดแบบเปียก	49
4.3.2 การกัดแบบแห้ง	49
4.4 การแพร่สารเจือ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1 การแพร่สารเจือชนิดพี	50
4.4.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น	51
4.5 การยึงฝังประจุ	52
4.5.1 การยึงฝังประจุสารเจือชนิดพี	53
4.5.2 การยึงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็น	53
4.6 การสร้างชั้น โลหะ	54
4.7 กระบวนการสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์	56
4.7.1 การออกแบบมาส์ค	56
4.7.2 กระบวนการสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์	58
4.7.2.1 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่	58
4.7.2.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์	60
4.7.2.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้างเบส	61
4.7.2.4 ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ	62
<b>บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>66</b>
5.1 วงจรวัดผลการทดลอง	66
5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	68
5.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้า	68
5.2.2 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง	69
5.2.3 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกัน	71
5.2.4 ระยะเวลาเบี่ยงเบนพาหะและความกว้างของอิมิตเตอร์ต่อค่าความไวในการตอบสนอง ต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์	73
5.2.5 ความไม่สมมาตรของโครงสร้าง	76
5.2.6 ฮีสเตอร์รีซิส	79
5.2.7 ความเป็นเชิงเส้น	81
5.3 เปรียบเทียบผลการตอบสนองและการใช้พลังงานของเมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงาน ต่ำกับแบบสามขา	82
5.3.1 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของเมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำกับ แบบสามขา	85
5.3.3 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำกับแบบ สามขา	87
<b>บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>91</b>
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>93</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>95</b>
<b>การเผยแพร่ผลงานในวารสารและการประชุมวิชาการในประเทศและต่างประเทศ</b>	<b>96</b>



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 กระบวนการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน	37
4.2 แสดงขนาดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (Exposure Light Source) ชนิดต่างๆ	47
4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ระหว่างกระบวนการแพร่สารเจือกับการยิงฟุ้งประจุ	53
5.1 ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสमितเตอร์ค่าแตกต่างกัน	72
5.2 แสดงความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่พารามิเตอร์ค่าต่างๆ	74
5.3 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สองชนิดคือแบบสามขา (TTMT) และแบบพลังงานต่ำ (LPMT)	85
5.4 แสดงสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของค่าความไวในการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบบสามขา	87
5.5 ผลการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิด	89

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	7
รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ของฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำ	8
รูปที่ 2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	9
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโค้งในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค	10
รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก โครงสร้างแบบฮอลล์	14
รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง (ก).มุมมองด้านบน และ (ข).ภาคตัดขวาง	15
รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก).มุมมองด้านบน และ(ข)ภาคตัดขวาง	16
รูปที่ 2.8 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอนแบบต่างๆ ที่พัฒนามาจากอุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง	17
รูปที่ 2.9 แสดงหลักการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวราบ (ก).เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก และ (ข).เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ตัดผ่าน	18
รูปที่ 2.10 แสดง โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้งแบบต่างๆ	19
รูปที่ 2.11 ฮีสเตอร์รีซิสตีฟแอมพลิฟายเออร์ที่แตกต่างไปจากค่าเดิม	22
รูปที่ 2.12 ฮีสเตอร์รีซิสตีฟแอมพลิฟายเออร์ที่แตกต่างไปจากค่าเดิม	22
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา (ก). แสดงโครงสร้างแบบ 3มิติ (ข). แสดงโครงสร้างแบบมองจากด้านบน (Top. view) และภาคตัดขวาง (Cross section)	25
รูปที่ 3.2 การใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยให้ไบอัสระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสและคอลเลคเตอร์	26
รูปที่ 3.3 (ก). การเกิดกระแสรั่วของด้านข้างของขั้วอิมิตเตอร์ และ (ข). อิมิตเตอร์ที่มีพื้นที่การฉีดพาหะที่กว้างเกินไป ทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดได้ไม่เต็มที่	27
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (ก). แสดงโครงสร้างแบบ 3มิติ (ข). แสดงโครงสร้างแบบ มองจากด้านบน (Top. view) และภาคตัดขวาง (Cross section)	28
รูปที่ 3.5 การสร้างชั้นออกไซด์หน้าล้อมรอบอิมิตเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงาน	29

ต่ำเพื่อลดการเกิดกระแสรั่วทางด้านข้าง	
รูปที่ 3.6 แสดงการให้ไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ	30
รูปที่ 3.7 การเบี่ยงเบนของพาหะ(อิเล็กตรอน) เนื่องจากแรงลอเรนซ์	31
(ก) ปราศจากสนามแม่เหล็ก และ (ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน	
รูปที่ 3.8 แสดงพื้นที่การเบี่ยงเบนพาหะ (อิเล็กตรอน)	31
รูปที่ 3.9 แสดงกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะ	34
รูปที่ 3.10 การเกิดกลไกการเบี่ยงเบนและกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะ	34
รูปที่ 4.1 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน	36
รูปที่ 4.2 การสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่จากกระบวนการออกซิเดชัน	38
รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	39
รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์	40
รูปที่ 4.5 กระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง	40
รูปที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด	41
รูปที่ 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์	43
รูปที่ 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์	43
รูปที่ 4.9 แสดงกระบวนการถ่ายแบบจากมาสก์ไปยังผิวของแผ่นเวเฟอร์	45
รูปที่ 4.10 แสดงกระบวนการปรับมาสก์และการฉายแสงด้วยระบบสเต็ปเปอร์ (Stepper)	46
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลจากการกัดด้วยกระบวนการสองแบบ (ก) การแบบเปียก (Wet etch)	49
และ (ข) การกัดแบบแห้ง (Dry etch)	
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ	50
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการยิงฝิงประจุ	52
รูปที่ 4.14 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมตัวขาอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก	54
รูปที่ 4.15 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation)	55
รูปที่ 4.16 ลายมาสก์ต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์	57
ชนิดพลังงานต่ำ	
รูปที่ 4.17 (ก) – (ข) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น LOCOS ออกไซด์	59
รูปที่ 4.18 (ก) – (จ) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 (ก) – (จ) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วเบส	62
รูปที่ 4.20 ก – จ แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก	63
รูปที่ 4.21 ก - ง แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก (ต่อ)	64
รูปที่ 4.22 แสดงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่นที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว	64
รูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก).ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ (ข). ที่กำลังขยาย 400 เท่า	65
รูปที่ 4.24 (ก).การเชื่อมต่อโลหะสำหรับต่อใช้งานกับอุปกรณ์ภายนอก และ (ข).การบรรจุภัณฑ์ โดยเคลือบอุปกรณ์ด้วยเรซิน	65
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์	66
รูปที่ 5.2 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก).รอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์ และ (ค).รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์	68
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันคอลเลกเตอร์	68
รูปที่ 5.4 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก). กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง -200 ถึง 200 mT (ข). เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก (+B) และ (ค). เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ (-B)	70
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก	71
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ	72
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกัน เมื่ออุปกรณ์มีระยะเบี่ยงเบนพازهเท่ากับ 10 $\mu\text{m}$	73
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกัน เมื่ออุปกรณ์มีระยะเบี่ยงเบนพازهเท่ากับ 20 $\mu\text{m}$ .	74
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลของความกว้างของอิมิตเตอร์ต่อการเบี่ยงเบนของพازهที่ระยะเบี่ยงเบนที่เท่ากัน (ก).ความกว้างของอิมิตเตอร์แบบกว้าง และ (ข).ความกว้างของอิมิตเตอร์แบบแคบ	75
รูปที่ 5.10 ผลของระยะเบี่ยงเบนต่อการเบี่ยงเบนของพازهที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าเท่ากัน	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.11 (ก).การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อสนามแม่เหล็กที่ ตัดผ่านมีทิศทางเป็นบวก(+B) และ (ข).การไบอัสตรงของรอยต่อเบส-คอลเลคเตอร์	77
รูปที่ 5.12 (ก).การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อสนามแม่เหล็กที่ ตัดผ่านมีทิศทางเป็นลบ(-B) และ (ข).การไบอัสย้อนกลับของรอยต่อเบส-คอลเลคเตอร์	77
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนค่าความเข้มสนามแม่ เหล็กเมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกกับทิศทางเป็นลบ	78
รูปที่ 5.14 กราฟฮิสเตอร์รีซิสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวก	79
รูปที่ 5.15 กราฟฮิสเตอร์รีซิสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ	80
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบกราฟจากการทดลองจริงกับกราฟจากการประมาณค่า เพื่อแสดงความเป็น เชิงเส้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสไบอัสเท่ากับ 2.0 mA เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวก	81
รูปที่ 5.17 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สองชนิดคือ (ก).แมกนีโตทรานซิสเตอร์ แบบสามขาเดิม และ (ข).แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ	82
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสาม ขาที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก	83
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสาม ขาที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ	84
รูปที่ 5.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะจากอิมิตเตอร์ไปยังเบสกับคอลเลคเตอร์ของ (ก).แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา และ (ข).แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ	86
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนกระแสไบอัส ของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (LPMT) กับแบบสามขา (TTMT) เมื่อทิศทางของ สนามแม่เหล็กมีทิศเป็นบวก (+B)	88
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนกระแสไบอัส ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (LPMT) กับแบบสามขา (TTMT) เมื่อทิศทาง ของสนามแม่เหล็กมีทิศเป็นบวก (-B)	88
รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา(ก) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ(ข)	91

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$B$	Magnetic field	Wb/m <sup>2</sup>
$d$	Hall thickness	μm
$e$	Electron charge = $-1.602 \times 10^{19}$	C
$E_H$	Hall field	V/cm
$E$	Electric field	V/cm
$\vec{F}_L$	Lorentz force	-
$G$	Geometry Factor	-
$I_B$	Base current	A
$I_C$	Collector current	A
$I_E$	Emitter current	A
$J_n$	Electron density	A/cm <sup>2</sup>
$J_p$	Hole density	A/cm <sup>2</sup>
$J_x$	Current density	A/cm <sup>2</sup>
$K_g$	Constant of parameter structure	-
$L, l$	Length of hall	μm
$n$	Density of electron	cm <sup>-3</sup>
$p$	Density of hole	cm <sup>-3</sup>
$q$	Magnitude of electronic charge = $1.602 \times 10^{19}$	C
$r_n$	Scattering parameter	-
$R_H$	Hall constant	1/C.cm <sup>-3</sup>
$R_{Hi}$	Hall constant (Consider collusion of lactic)	1/C.cm <sup>-3</sup>
$s$	Contact width of hall	μm
$S_A$	Absolute sensitivity	V/T
$S_R$	Relative sensitivity	T <sup>-1</sup>
$v_x$	Velocity	cm/s
$V_H$	Hall voltage	V
$W, w$	Width of hall	μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu_H$	Hall mobility	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
---------	---------------	-------------------------------------

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\mu_{Hi}$	Hall mobility (Consider collusion of lactic)	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
$\mu_n$	Electron mobility	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
$\mu_p$	Hole mobility	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
$\theta_H$	Hall angle	rad
$\rho$	Resistivity	$\Omega - \text{cm}$
$\sigma$	Conductivity	$(\Omega - \text{cm})^{-1}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

สิ่งประดิษฐ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำได้มีการวิจัยพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อย่างหลากหลาย เช่น อุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ, อุปกรณ์ตรวจจับแสง หรืออุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ฯลฯ ซึ่งในการพัฒนาโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาโดยตลอดคือ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเซ็นเซอร์แม่เหล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น ฮอลล์เซ็นเซอร์, แมกนีโตไดโอด, แมกนีโตทรานซิสเตอร์ เป็นต้น โดยอุปกรณ์เหล่านี้อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก สำหรับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ถือเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาณรบกวนที่เอาต์พุตมีค่าต่ำ, สามารถใช้งานกับวงจรรวมได้และสามารถประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้หลากหลาย

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็กชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างคล้ายกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor) คือประกอบด้วย อิมิตเตอร์ (E), เบส (B) และ คอลเลคเตอร์ (C) ซึ่งอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยทั่วไปแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทด้วยกันคือ 1.แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะไหลในแนวตั้ง (Vertical Magnetotransistor) ใช้สำหรับวัดสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวอุปกรณ์ และ 2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะไหลในแนวนอน (Lateral Magnetotransistor) ใช้สำหรับวัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก โดยทั่วไปนั้นโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ประกอบไปด้วย อิมิตเตอร์หนึ่งขา, คอลเลคเตอร์สองขาและเบสอีกสองขา ซึ่งเรียกว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิด 5 ขา” ทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ (deflection) และกลไกการมอดูเลต (modulation) ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์ทั้งสองขา ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{C2}$ ) โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของสนามแม่เหล็กและอัตราการฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์ ดังนั้นจากหลักการที่กล่าวมานี้ทำให้สามารถนำอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดพาหะไหลในแวนอนอนในยุคเริ่มแรก เป็นแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดห้าขา โดยโครงสร้างประกอบขึ้นด้วย อิมิตเตอร์ ( $p^+$ ) 1 ขา, เบส ( $n^+$ ) 2 ขา และคอลเลคเตอร์ ( $p^+$ ) 2 ขา บนฐานรองชนิดเอ็น ( $n$ -Substrate) ซึ่งทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะและการมอดูเลต แต่การที่อุปกรณ์มีโครงสร้างเป็นแบบห้าขาซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นการนำไปใช้งานจำเป็นต้องให้ไบอัสทั้งจากอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์และระหว่างเบสกับเบสทั้งสอง เพื่อให้สามารถใช้งานอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งพบว่ามีความยุ่งยากของการนำอุปกรณ์ไปใช้งาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงแมกนีโททรานซิสเตอร์ขึ้นมาใหม่ให้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสะดวกต่อการนำไปใช้งาน โดยการลดจำนวนขาของอุปกรณ์ลงให้เหลือเพียงสามขา คือ อิมิตเตอร์ ( $p^+$ ), เบส ( $n^+$ ) และคอลเลคเตอร์ ( $p^+$ ) บนฐานรองชนิดเอ็น ( $n$ -Substrate) ซึ่งเรียกว่า “แมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดสามขา” ทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ (โฮล) และกลไกการรวมตัวใหม่ (recombination) ของพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์กับเบสเพียงอย่างเดียว ซึ่งการใช้งานจะเหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดแอกทีฟ ทำให้มีความสะดวกในการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น แต่พบว่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กยังอยู่ในระดับที่ต่ำ และมีการใช้กระแสไบอัสที่ค่อนข้างสูงอยู่

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแมกนีโททรานซิสเตอร์แบบใหม่ที่พัฒนาและปรับปรุงมาจากแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดสามขา โดยโครงสร้างแบบใหม่นี้ให้ชื่อว่า “แมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดพลังงานต่ำ (Low Power Magnetotransistor)” เป็นแมกนีโททรานซิสเตอร์ที่มีความไวในการตอบสนองที่สูงขึ้นและการใช้พลังงานของอุปกรณ์อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าแบบเดิมมาก โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ ( $n^+$ ), เบส ( $p^+$ ) และคอลเลคเตอร์ ( $n^+$ ) บนฐานรองจากซิลิคอนชนิดพี ( $p$ -Substrate) ที่สำคัญคือมีการสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ขึ้นมาล้อมรอบอิมิตเตอร์ ซึ่งอุปกรณ์ทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะส่วนน้อย (อิเล็กตรอน) และกลไกการรวมตัวใหม่ในเบส โดยชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้นมานั้นมีส่วนช่วยในการลดการฉีดพาหะทางด้านข้าง และบังคับให้พาหะเคลื่อนที่อยู่เฉพาะบริเวณที่มีผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่านั้น ทำให้อุปกรณ์มีค่าความไวในการตอบสนองที่ดีขึ้นและลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงจากเดิมได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแมกนี

เอกสารโ้ทรานซิสเตอร์แบบสามขาเดิม ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการทํางาน ออกแบบและสร้างเซ็นเซอร์แม่เหล็กชนิดแมกนีโตทรานซิสเตอร์
2. พัฒนาและปรับปรุงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้มีค่าความไวในการตอบสนองที่สูงขึ้น และลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงจากของเดิมได้
3. เปรียบเทียบผลของระยะเบี่ยงเบนและความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
4. เปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพลังงานต่ำสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้ โดยอาศัยการทํางานจากกลไกการเบี่ยงเบนและการรวมตัวใหม่ของกระแสพาหะในเบส ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ )
2. การสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ล้อมรอบอิมิตเตอร์ สามารถลดการเกิดกระแสรั่วไหลทางด้านข้างของตัวอุปกรณ์ได้ ทำให้ช่วยลดการใช้ไบอัสกระแสอิมิตเตอร์ลงจากเดิมได้เมื่อเปรียบเทียบที่ความไวในการตอบสนองค่าที่เท่ากัน ถือเป็นลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงในรูปของการลดกระแสไบอัส
3. การเปลี่ยนขนาดของกระแสไบอัสของอิมิตเตอร์ มีผลทำให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) เปลี่ยนแปลงได้
4. การเปลี่ยนแปลงระยะเบี่ยงเบนและความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะ ส่งผลทำให้ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงได้
5. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่อาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะจากอิล็กตรอน จะมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดีกว่าแบบที่อาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะจากโฮล
6. ความไม่สมมาตรทางโครงสร้างของอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ ทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กมีผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ทำการพัฒนาและปรับปรุงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงจากเดิม โดยพัฒนามาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา ซึ่งมีโครงสร้างแบบ NPN ที่ประกอบด้วย อิมิตเตอร์( $n^+$ ) เบส( $p^+$ ) และคอลเลคเตอร์( $n^+$ ) บนฐานรองชนิดพี (p - Substrate) และทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะส่วนน้อย(อิเล็กตรอน) ในเบสกับกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะ แต่เนื่องจากผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ยังมีค่าต่ำ และการใช้พลังงานของอุปกรณ์ยังอยู่ในระดับที่สูงอยู่ ดังนั้นจึงทำการพัฒนาอุปกรณ์ขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีชื่อว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ” เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็กตัวใหม่ที่มีโครงสร้างแบบ NPN ประกอบด้วยอิมิตเตอร์(N) เบส(P) และคอลเลคเตอร์(N) บนฐานรองชนิดพี และมีโครงสร้างที่สำคัญ ชั้นฉนวนออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ล้อมรอบอิมิตเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ลดการเกิดกระแสรั่วทางด้านข้างของตัวอุปกรณ์ และช่วยลดการใช้ไบอัสกระแสได้ ส่งผลให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและสามารถลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงได้อีกทางหนึ่ง

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยสำหรับรายงานฉบับนี้ ศึกษาหลักการทำงานพื้นฐานของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก โดยลงรายละเอียดเฉพาะในส่วนของเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ หรือเรียกว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์” ซึ่งจะอธิบายถึง โครงสร้าง หลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก คุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆ และการนำไปประยุกต์ใช้งาน ศึกษาและพัฒนาปรับปรุงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดสามขา ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลง ได้เป็นอุปกรณ์ตัวใหม่ที่มีชื่อว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพลังงานต่ำ” ซึ่งเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะไหลในแนวอน ใช้สำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ และทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดระหว่าง ชนิดสามขาแบบเดิม กับ ชนิดสามขาแบบพลังงานต่ำ รวมทั้งการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงระยะเบี่ยงเบนและความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะ ส่วนท้ายเป็นตัวอย่างของการนำเซ็นเซอร์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์
2. ศึกษาการออกแบบและกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์
3. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เปรียบเทียบกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์
4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนกระแสไบอัสต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งต่อ
5. เปรียบเทียบการใช้ระหว่างพลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพลังงานต่ำและแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดสามขา
6. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงระยะเบี่ยงเบนและความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะ

โดยเนื้อหาในรายงานการวิจัยนี้จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

### บทที่ 1 บทนำ

เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนของการศึกษา สำหรับงานวิจัยเช่นนี้

### บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เช่น หลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ หลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก และกล่าวถึงแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบต่างๆ รวมทั้งหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ รวมทั้งคุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์

### บทที่ 3 โครงสร้างและหลักการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานเปรียบเทียบกับแบบสามขา และหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ ทั้งกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ และกลไกการรวมตัวใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงเทคโนโลยีพื้นฐานการผลิตอุปกรณ์ทางด้านเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor device) และกระบวนการผลิตแบบต่างๆ การออกแบบและขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์เมกนีโททรานซิสเตอร์

#### บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง

วิธีการวัดผลและผลการทดลอง การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์และคุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆ รวมถึงจะเปรียบเทียบให้เห็นผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของเมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดที่มีชั้นผนังออกไซด์กับชนิดที่ไม่มีผนังออกไซด์ เพื่อแสดงให้เห็นการใช้พลังงานของเมกนีโททรานซิสเตอร์ทั้งสองแบบ

#### บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลองทั้งหมด



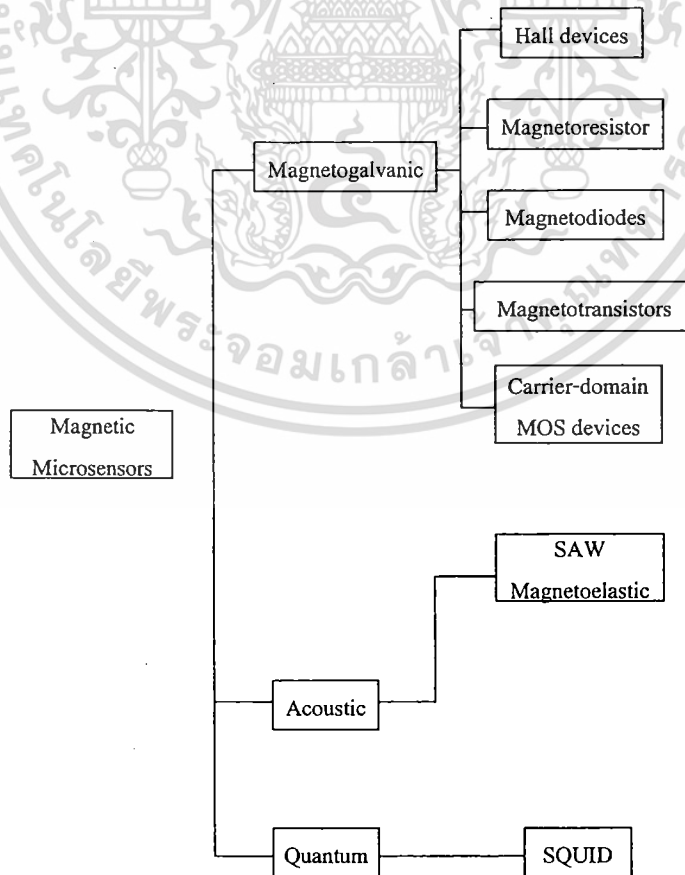
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor) เป็นประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำที่มนุษย์สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์หลายอย่างด้วยกัน เช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect), ปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetoresistive Effect)[1] เป็นต้น ซึ่งจากปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กหลายๆชนิดด้วยกัน เช่น ฮอลล์เซ็นเซอร์, แมกนีโตทรานซิสเตอร์, แมกนีโตไดโอด เป็นต้น โดยในปัจจุบันเซ็นเซอร์แม่เหล็กได้มีการพัฒนาให้มีโครงสร้างที่หลากหลายมากตามแต่วัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ดังนั้นความสามารถในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของ โครงสร้างแต่ละแบบก็就会有ความแตกต่างกันออกไป

โดยสามารถจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็ก ซึ่งจำแนกตามหลักการทำงานพื้นฐานในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของแต่ละอุปกรณ์แต่ละชนิด ได้ดังรูปต่อไปนี้



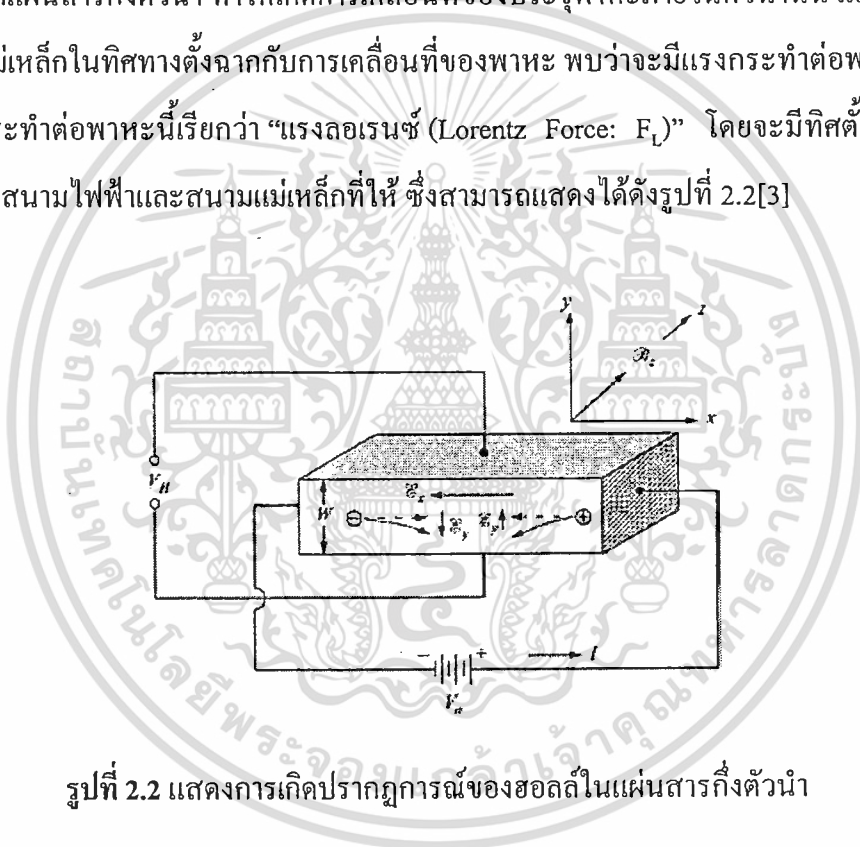
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้วางไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็ก[2]**  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 อุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall sensor)

ในงานชิ้นวิจัยนี้หลักการของการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์อาศัยหลักการพื้นฐานจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 2.1.1 หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์

ปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่แผ่นสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุพาหะภายในตัวนำนั้น และเมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของพาหะ พบว่าจะมีแรงกระทำต่อพาหะเกิดขึ้น ซึ่งแรงที่กระทำต่อพาหะนี้เรียกว่า “แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force:  $F_L$ )” โดยจะมีทิศตั้งฉากกับทั้งทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ให้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2[3]



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ของฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำ

### 2.1.2 แรงลอเรนซ์ (Lorentz force)

แรงลอเรนซ์ คือแรงที่กระทำต่อประจุพาหะ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อประจุพาหะขนาด  $q$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย  $v$  (ภายใต้สนามไฟฟ้า  $E = qV$ ) และมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก  $B_z$  พบว่ามีแรงกระทำต่อประจุนั้นเกิดขึ้น โดยสามารถคำนวณขนาดของแรงได้จากสมการที่ 2.1 [3]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

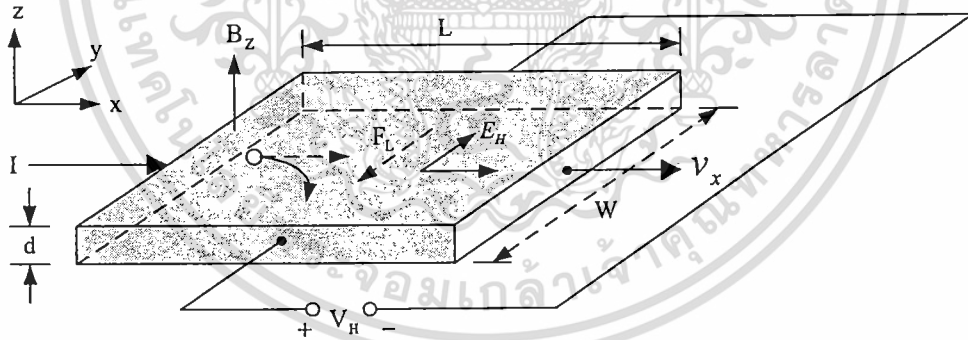
เมื่อ  $F_L$  คือแรงลอเรนซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดบ  $q$  คือประจุไฟฟ้า และ  $B_z$  คือขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอก

### 2.1.3 หลักการทำงานของแผ่นฮอลล์เพลต (Hall plate principle)

ในการศึกษาหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์ นั้น จะอาศัยพื้นฐานมาจากหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแผ่นฮอลล์เพลต ในการศึกษาถึงปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น

พิจารณาแผ่นฮอลล์เพลตดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อนำไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าความต่างศักย์  $V$  โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density)  $J_x$  ไหลในทิศ  $+X$  และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density)  $B_z$  ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ  $+Z$

เมื่อโฮล (Hole) คือพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวก ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $+X$  ส่งผลให้เกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ววริฟท์ (drift velocity)  $v_x$  ในทิศทาง  $+X$  และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับทิศทางของกระแส จะทำให้เกิดมีแรงลอเรนซ์กระทำต่อโฮลเกิด ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

จากสมการที่ 2.1 เมื่อ  $\vec{F}_L$  คือแรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะ ดังนั้นจะได้ว่า

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

จากสมการที่ 2.2 ดังนั้นจะได้ทิศทางของแรงลอเรนซ์อยู่ในแกน  $-Y$  ซึ่งจะทำให้โฮลที่เป็นพาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปยังแกน  $-Y$  และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวน

มากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $E_H$  ในทิศ +Y สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ +Y ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์  $F_L$  และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน  $eE_H$  มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

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

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

และสมการ 
$$J_x = p \cdot e \cdot v_x \quad \text{หรือ} \quad v_x = \frac{J_x}{p \cdot e} \quad (2.5)$$

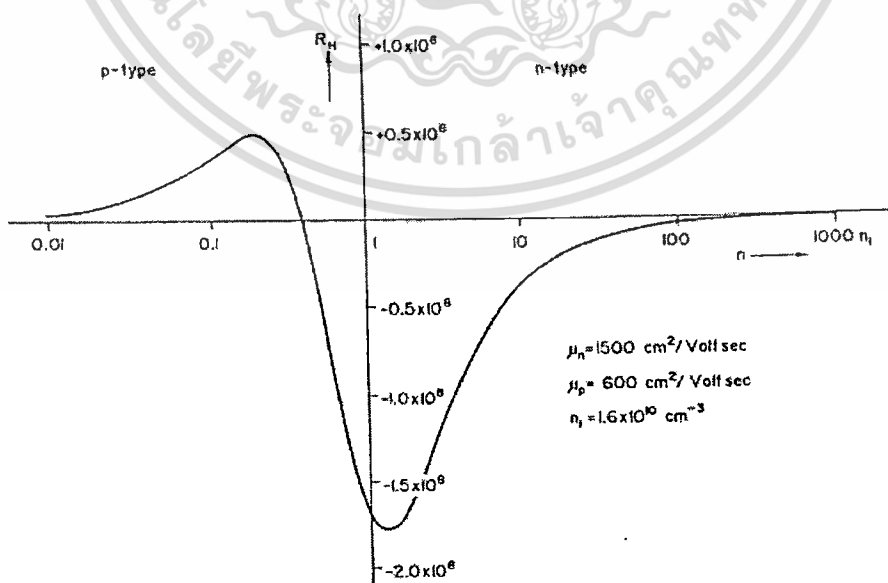
ดังนั้นแทนค่า  $v_x$  ในสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.4 จะได้ค่าสนามไฟฟ้าภายในดังสมการต่อไปนี้

$$E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ได้ดังนี้

$$\frac{E_H}{J_x \cdot B_z} = \frac{1}{p \cdot e} = R_H \quad (2.7)$$

เมื่อค่า  $R_H$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค

เอกซาร... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ป (Doping) ในสารกึ่งตัวนำชนิดคอนซิดินทรินซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ได้ดังกราฟในรูปที่ 2.4 ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการโด๊ประดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการโด๊ประดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะเป็นผลให้แรงดันฮอลล์ที่ได้มีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำ

จากรูป 2.3 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $w$  จะได้

$$V_H = E_H \cdot w \quad \text{หรือ} \quad E_H = \frac{V_H}{w} \quad (2.8)$$

โดย  $V_H$  คือแรงดันฮอลล์ ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่าสมการกระแส  $J_x = \frac{I}{w \cdot d}$  และสมการที่ 2.8 ลงในสมการที่ 2.7 จะได้ว่า

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

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

ดังนั้นจะได้สมการแรงดันฮอลล์ในรูปของกระแสกับสนามแม่เหล็กคือ

$$V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.9 และ 2.10 สามารถหาสมการความหนาแน่นของโฮลได้ดังนี้

$$p = \frac{1}{e \cdot R_H} = \frac{I \cdot B_z}{e \cdot d \cdot V_H} \quad (2.11)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \frac{w \cdot d}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{w \cdot d}{l} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และจากสมการ  $\rho = \frac{1}{e \cdot p \cdot \mu_p}$  ดังนั้นจะได้ว่า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งที่  $\sigma = e \cdot p \cdot \mu_p$  และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_p = \frac{1}{e \cdot \rho \cdot p} = \frac{1}{\rho} R_H \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.11), (2.12) และ (2.13) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

และทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือ มีค่าเป็นลบ และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ( $R_H$ ) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_H = -\frac{1}{n \cdot e} \quad (2.14)$$

ดังนั้น โดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ขณะที่ค่าความไวในการตอบสนอง (Sensitivity: S) คือ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H \cdot G}{d} = \frac{G \cdot r_n}{p \cdot e \cdot d} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า ค่าความไวในการตอบสนอง ที่ค่าสูงๆจะมีความหนาแน่นของประจุค่าต่ำ และฮอลล์เฟลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ  $E_H$  และ  $E_x$  ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม  $\theta_H$  กับแกน +x ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมุม  $\theta_H$  ที่เกิดขึ้นเรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta_H = \frac{E_H}{E_x} \quad (2.16)$$

โดยการแทนค่า  $E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e}$  และ  $J_x = \sigma \cdot E_x$  ลงในสมการที่ 2.16 จะได้ว่า

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

หรือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

หรือ 
$$\mu_p = \sigma \cdot R_H \quad (2.17)$$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันของพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ  $R_{Hi}$  สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{Hi} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (2.18)$$

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

ดังนั้นจะได้ว่า 
$$\mu_{Hi} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (2.19)$$

เมื่อ  $\mu_H$  คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility)

และ  $\mu_{Hi}$  คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ  $R_{Hi}$  แสดงได้ดังสมการที่ (2.20)

$$R_{Hi} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93 R_H \quad (2.20)$$

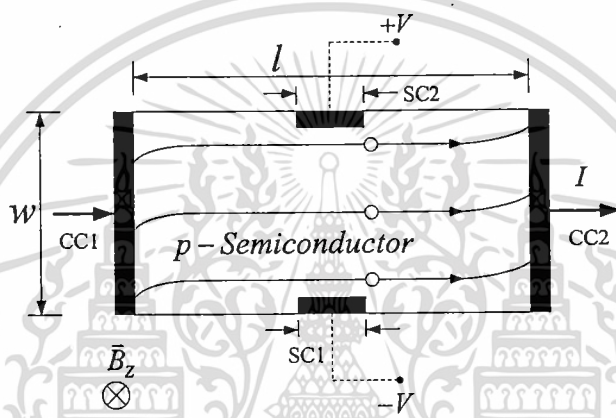
และ 
$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\mu_{Hi}$  คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

และ  $\mu_p$  คือ ค่า Mobility ของโฮล

### 2.1.4 เซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างฮอลล์ (Hall plate sensor)

เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบ โครงสร้างฮอลล์ เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการทำงาน โดยลักษณะของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงโครงสร้างของแผ่นฮอลล์เซ็นเซอร์จริงสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-substrate) ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ  $w$ , ความยาวเท่ากับ  $l$  และความหนาของแผ่นฮอลล์เท่ากับ  $d$  โดยประกอบด้วยขั้วใช้งาน 4 ขั้ว คือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 เมื่อให้ไบอัสไฟฟ้าระหว่างขา CC1 กับ CC2 จะได้ค่าแรงดันฮอลล์  $V_H$  ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขา SC1 กับ SC2 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.22 [2]-[5]



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก โครงสร้างแบบฮอลล์

$$V_H = \frac{R_H \cdot G \cdot I \cdot B_z}{d} \quad (2.22)$$

โดยที่  $R_H$  คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์,  $G$  คือพารามิเตอร์โครงสร้าง,  $d$  คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์,  $B_z$  คือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง

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

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot d} \cdot G \cdot B \cdot I \quad (2.23)$$

โดยที่  $r_n$  คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

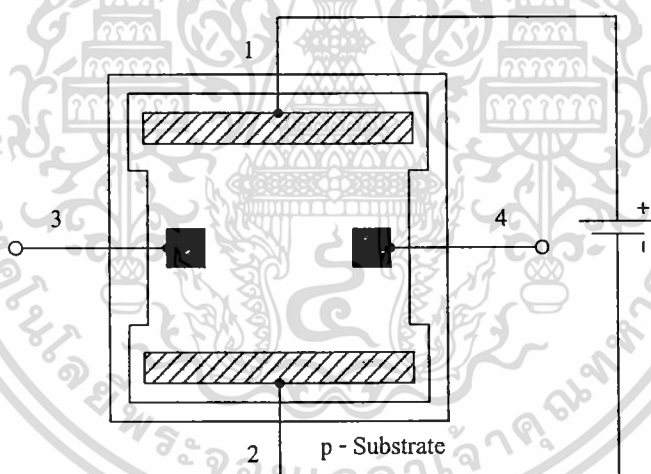
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง  $G$  จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง  $G$  สามารถประมาณได้ดังสมการที่ (2.24)

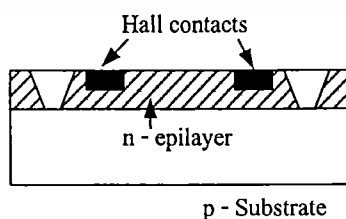
$$G = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.24)$$

โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า  $G=1$  ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้  $l/w = 3$  และ  $s/w < 1$  โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์จะออกแบบที่ระยะ  $1/2$  [4]

ในปัจจุบันเซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์-เซ็นเซอร์ชนิดแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยรูปที่ 2.6(ก) และ 2.6(ข) แสดงมุมมองด้านบนและด้านภาคตัดขวางของฮอลล์-เซ็นเซอร์แนวตั้งชนิดเอ็น ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์ โครงสร้างคือ ใช้ฐานรองชนิดพี และ



(ก).



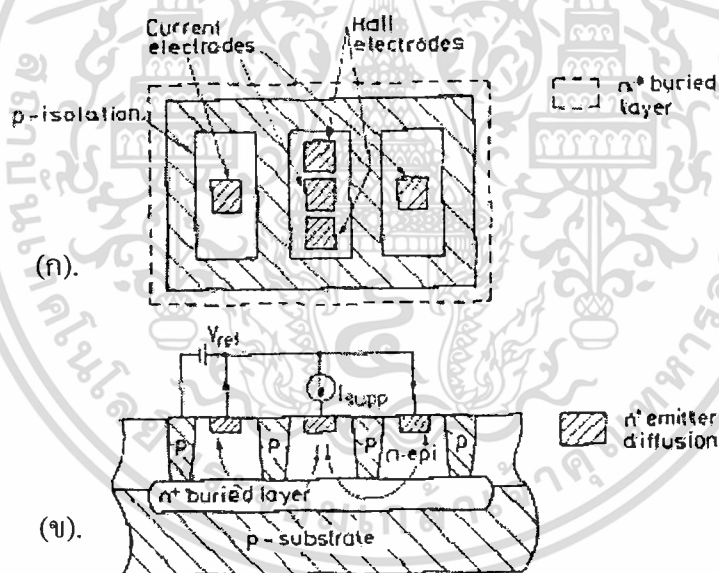
(ข).

รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง (ก). มุมมองด้านบน และ (ข). ภาคตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันขอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ  $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียระหว่าง  $5 - 10 \text{ } \mu\text{m}$  โดยที่ออกแบบมิติของเฟลทประมาณ  $200 \times 200 \text{ } \mu\text{m}$  สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิ (Epilayer) สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการยิงฝังประจุ (Ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้ [ ]

ฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน โดยแสดงดังรูปที่ 2.7(ก) และ 2.7(ข) โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเจมทิสแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และพาหะจะมีทิศทางการฉีดในลักษณะแนวตั้ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวของอุปกรณ์ [2]-[5]



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก).มุมมองด้านบน และ (ข). ภาคตัดขวาง

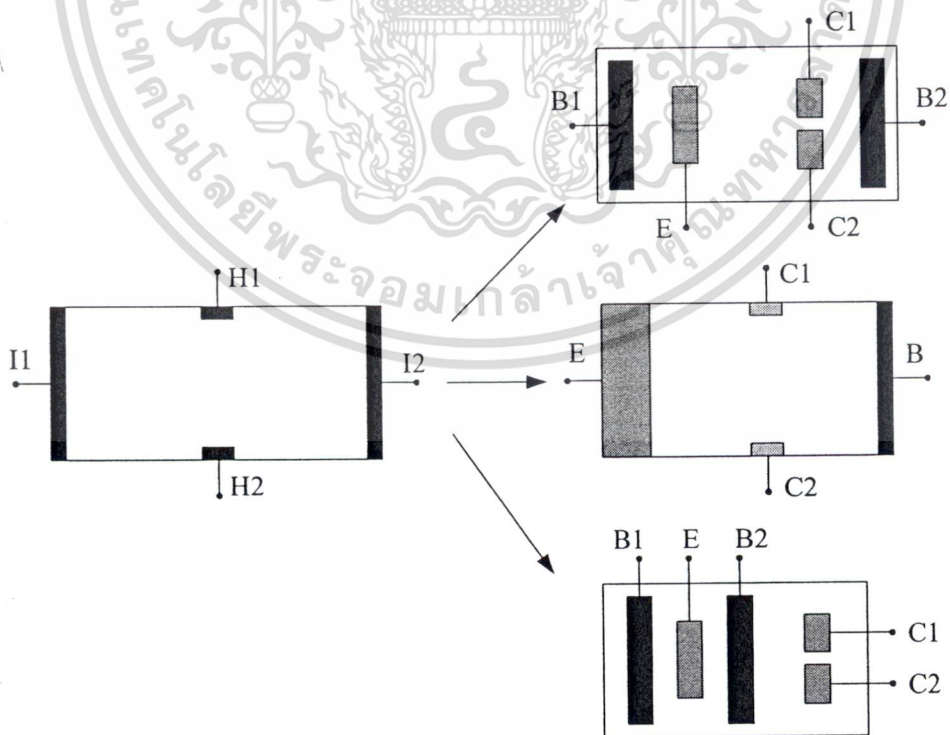
## 2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magneto transistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar transistor) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งพัฒนาและปรับปรุงมาจากอุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (Lateral magnetotransistor)

หลักการในการตรวจจับสนามแม่เหล็กอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ที่ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง โดยกลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_c$ ) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดูเลต (Modulation current injection)

### 2.2.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน

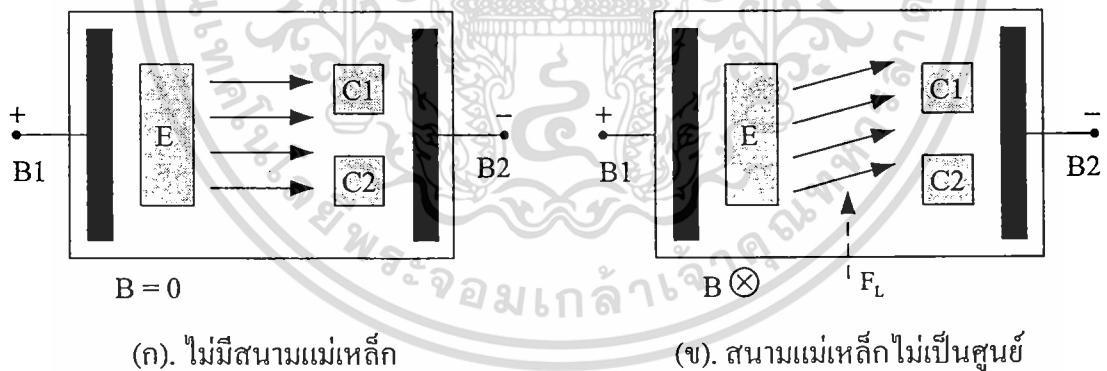
โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยประกอบด้วย อิมิตเตอร์ (E), เบส (B1, B2) และคอลเลคเตอร์ (C1, C2) จัดวางตำแหน่งแตกต่าง



รูปที่ 2.8 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอนแบบต่างๆ ที่พัฒนา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มาจากอุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันออกไปตามโครงสร้างที่เลือกใช้ ซึ่งแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดนี้พัฒนามาจากอุปกรณ์ฮอลล์ เซ็นเซอร์ชนิดแวนดิง โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่ สองข้างอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแวนดิงอาศัยความแตกต่าง ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของ พาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

หลักการทำงานคือ เมื่อให้ไบอัสระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสแบบ ไบอัสตรง อิมิตเตอร์จะทำ หน้าที่ฉีดกระแสพาหะไปยังเนื้อเบสและข้ามไปยังคอลเลคเตอร์ทั้งสองที่อยู่อย่างสมมาตร เกิดเป็น กระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  โดยสนามไฟฟ้าในเบสจะช่วยพาหะเกิดการเคลื่อนที่จากเบสไปยัง คอลเลคเตอร์ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งในสภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก ( $B = 0$ ) ปริมาณกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองจะเท่ากันนั่นคือผลต่างของกระแสคอลเลคเตอร์จะเป็นศูนย์ ( $\Delta I_C = 0$ ) แต่เมื่อให้ สนามแม่เหล็กในแวนดิง จากปรากฏการณ์ของฮอลล์จะทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทาง เดิม ส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสมดุล ทำให้ผลต่างของกระแส คอลเลคเตอร์ไม่เป็นศูนย์ ( $\Delta I_C \neq 0$ ) จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแวนดิงได้ สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการทำงานของแมกนี โดทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแวนวราบ

(ก)เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก และ (ข)เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ตัดผ่าน

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  สามารถหาได้จากสมการที่ 2.25 เพราะฉะนั้นผลรวมของ  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  คือกระแสคอลเลคเตอร์ที่ไหลในภาวะปกตินั้นเอง ดังสมการ ที่ (2.26) ส่วนสมการที่ (2.27) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta I_C$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง  $\Delta I_C$  แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์ สำหรับค่าความไวในการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมผัสและแบบสมบูรณ์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \tag{2.25}$$

$$I_0 = I_{C1} + I_{C2} \tag{2.26}$$

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) B_z \cdot I_0 \tag{2.27}$$

ซึ่ง  $\mu_p$  และ  $\mu_n$  คือค่าความคล่องตัว (Mobility) ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ  
 $K_g$  เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์

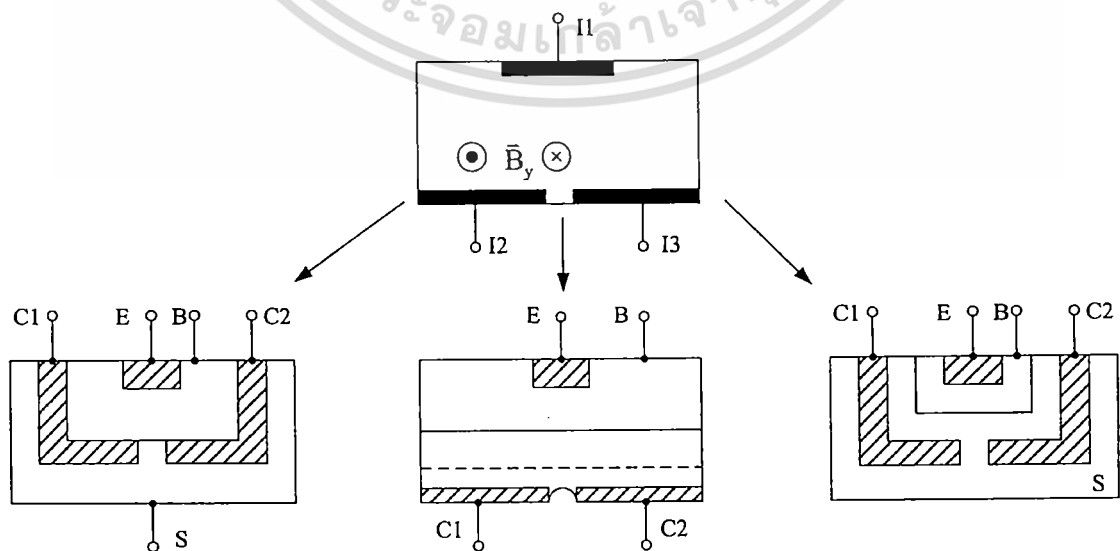
$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_0 \cdot \Delta B_z} \tag{2.28}$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \tag{2.29}$$

เมื่อ  $I_0$  คือค่ากระแสคงที่ และ  $\Delta B_z$  คือการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก [2]-[9]

### 2.2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยประกอบขึ้นด้วย อิมิตเตอร์(E), เบส (B1, B2) และคอลเลคเตอร์ (C1, C2) ในการจัดวางตำแหน่งจะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของโครงสร้างที่เลือกใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้งแบบต่างๆ  
 ไม่ว่าจะผลิตด้วยวิธีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้งนี้ พัฒนาและปรับปรุงมาจากอุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์แนวอน ซึ่งมีหลักการทำงานแบบเดียวกันกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวอน คือใช้หลักการจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะ และหลักการกระแสการหนีจากการมอดดูเลท [2]-[9]

การทำงานคือ เมื่อให้ไบอัสตรงระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ ทำให้พาหะถูกหนีจากอิมิตเตอร์เข้าไปยังเบสและข้ามต่อไปยังคอลเลคเตอร์เกิดเป็นกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  ซึ่งในสถานะสมดุลที่ปราศจากสนามแม่เหล็กกระแส  $I_{C1} = I_{C2}$  แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวขนานกับผิวอุปกรณ์ จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะไปจากแนวสมดุล ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปคือ  $I_{C1} \neq I_{C2}$  ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองสามารถหาได้จากสมการที่ 2.31

$$I_0 = I_{C1} + I_{C2} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $I_0$  คือผลรวมของกระแสคอลเลคเตอร์

$$I_C = G \cdot \mu_n^* (L/W) \cdot I_{CO} \cdot B \quad (2.31)$$

โดยที่  $L$  คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์,  $W$  คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ  $G$  คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ และ  $\mu_n^*$  คือค่า mobility โดยสามารถหาค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ 2.32

$$S = \frac{\Delta I_C}{I_0 \cdot B} \quad (2.32)$$

แทนสมการที่ 2.31 ลงในสมการที่ 2.32 จะได้

$$S = G \cdot \mu_n^* \cdot \frac{L}{W} \quad (2.33)$$

ในสถานะปกติขณะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กตัดผ่าน สามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (2.34) และ (2.35)

$$S_A = \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและทบวงมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = V_C^{-1} \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = I_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.35)$$

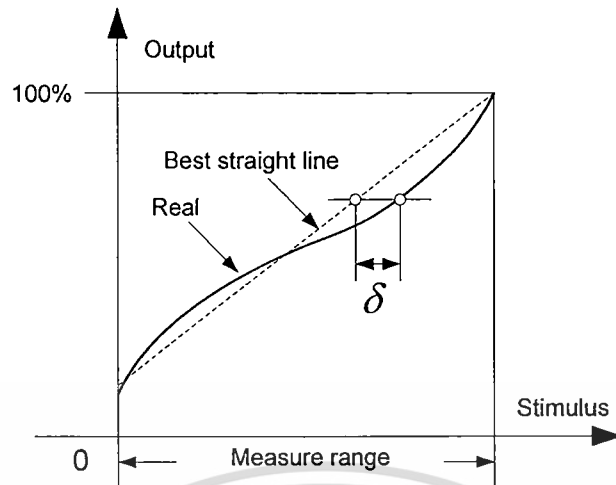
## 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์

การนำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไปใช้งานโดยทั่วๆ ไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติเช่น ที่อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดัน เพื่อให้สามารถนำเซ็นเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซ็นเซอร์ทั่วๆ ไป ค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

1. **ย่านวัด (Range)** เป็นการจำกัดค่าอินพุต และเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ในการใช้งาน เช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้กับความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสดันเอาต์พุต อยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น
2. **ความผิดพลาด (Error)** เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (uncertainly) รวมอยู่ด้วยเสมอ
3. **ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision)** ในการวัดค่า ความแม่นยำ และความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง จะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึงสามารถวัดได้ละเอียด (sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึงสเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือค่าที่วัดได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึง ความคงเส้นคงวา (consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงต่ำ
4. **ความไว (Sensitivity)** หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต หรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น  $0.5 \Omega/^{\circ}\text{C}$  เป็นต้น
5. **ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)** หรือความแม่นยำ โดยความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่ามีการวางตัวอย่างไรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมาก

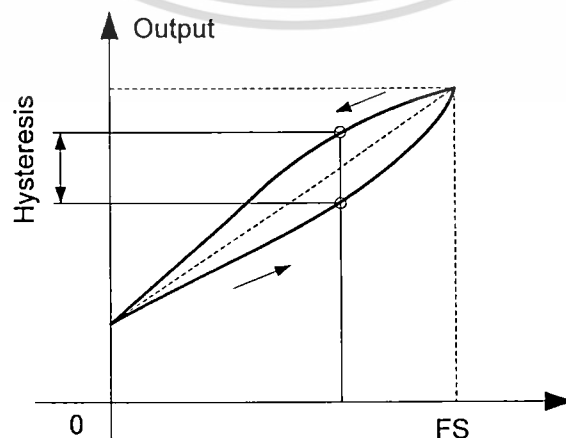
แต่มีความเอียง, ความชัน หรือออฟเซ็ท จากค่าที่ถูกกำหนด ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ฮิสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

6. **ความมีเสถียรภาพ (Stability)** ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่าการคลาดเคลื่อนมักถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การคลาดเคลื่อนอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่าการคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์เป็นศูนย์ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์
7. **ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis)** การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฮิสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

8. การแยกชัด (Resolution or Discrimination) บอกลถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ถูกวัด
9. ออฟเซ็ท (Offset) เป็นค่าเอาต์พุตของเซนเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่สัญญาณอินพุตเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ค่าออฟเซ็ท หมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์
10. ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response) แสดงถึงเวลาที่เอาต์พุตมีค่าอยู่ใน 63 % ของค่าสุดท้ายที่ทำการการตอบสนองของอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## โครงสร้างและหลักการทำงานของแมกนีโททรานซิสเตอร์

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของแมกนีโททรานซิสเตอร์ทั้งแบบสามขาเดิมและแบบพลังงานต่ำ โดยแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ทั้งการจัดเรียงตำแหน่งขั้วอุปกรณ์, พื้นที่การฉีดพาหะ, ระยะเบี่ยงเบนและบริเวณที่มีผลในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก รวมทั้งอธิบายหลักการทำงานในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กและวิธีการนำอุปกรณ์ไปใช้งานด้วย

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการพัฒนาและปรับปรุงแมกนีโททรานซิสเตอร์ขึ้นมาใหม่ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและลดการใช้พลังงานลดจากของเดิม ซึ่งได้พัฒนามาจากแมกนีโททรานซิสเตอร์แบบขาเดิม โดยแมกนีโททรานซิสเตอร์ตัวใหม่นี้ให้ชื่อว่า “แมกนีโททรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ” ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ต่อไป

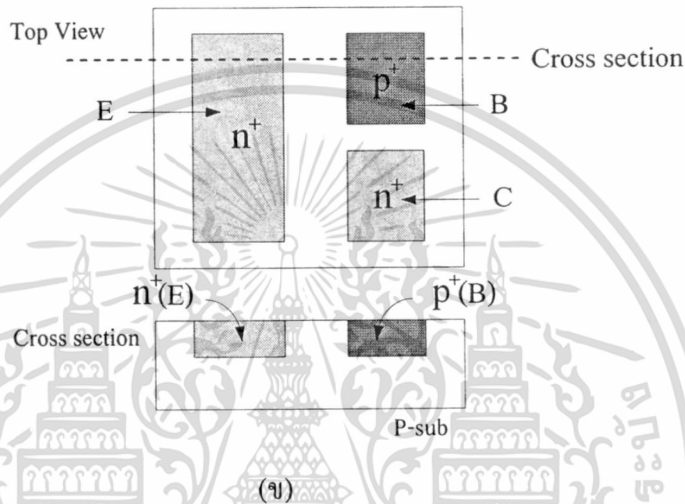
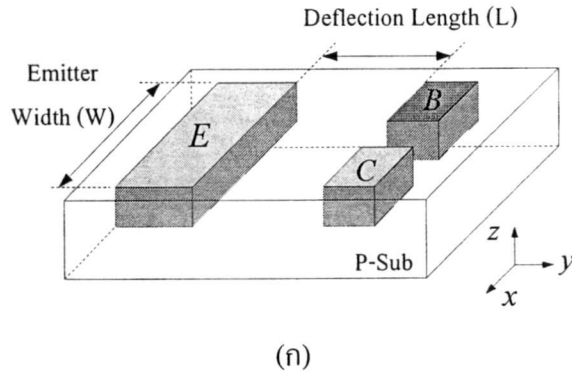
### 3.1 โครงสร้างและการใช้งานอุปกรณ์

#### 3.1.1 โครงสร้างของแมกนีโททรานซิสเตอร์แบบสามขา

แมกนีโททรานซิสเตอร์แบบสามขา (Three Terminal Magnetotransistor: TTMT) เป็นแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลในแนวนอน (Lateral Magnetotransistor) ซึ่งใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยอาศัยกลไกจากหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ที่ทำให้การเกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่เคลื่อนอยู่ภายใต้สถานะของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ โดยผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น โครงสร้างของตัวอุปกรณ์, ความหนาแน่นของพาหะที่เคลื่อนที่ และค่า Hall mobility ของพาหะ เป็นต้น

สำหรับโครงสร้างของแมกนีโททรานซิสเตอร์แบบสามขาเป็นแบบ NPN ซึ่งประกอบด้วยอิมิตเตอร์ ( $n^+$ ), เบส ( $p^+$ ) และคอลเลกเตอร์ ( $n^+$ ) บนฐานรองของซิลิคอนชนิดพี (p-substrate) โดยมีพื้นที่ของการฉีดพาหะ (Emitter Width) มีค่าเท่ากับ  $W$  และมีระยะการเบี่ยงเบนพาหะ (Deflection Length) มีค่าเท่ากับ  $L$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) และ 3.1(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



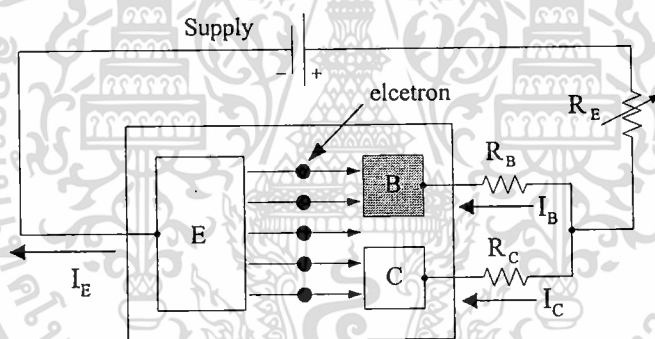
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา (ก). แสดงโครงสร้างแบบ 3 มิติ (ข). แสดงโครงสร้างแบบมองจากด้านบน (Top. view) และภาคตัดขวาง (Cross section)

จากรูปที่ 3.1(ก) แสดงโครงสร้างของและส่วนประกอบต่างๆ ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา และรูปที่ 3.1(ข) เป็นโครงสร้างแบบมุมมองบน (Top. view) กับภาคตัดขวาง (Cross section) จากภาพภาคตัดขวางตำแหน่งของคอลเลคเตอร์จะอยู่ที่บซ็อนกันกับตำแหน่งของเบส ซึ่งจะขอแสดงให้เห็นเฉพาะส่วนของเบสเท่านั้น

### 3.1.2 วิธีการใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

จากโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขานั้น ในการนำอุปกรณ์ไปใช้งานจะให้ไบอัสระหว่างขามิตเตอร์กับขาเบสและขาคอลเลคเตอร์ดังรูปที่ 3.2 โดยอิมิตเตอร์จะทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสพาหะซึ่งก็คืออิเล็กตรอน ผ่านไปยังฐานรองชนิดพีแล้วไหลต่อไปยังขั้วเบสกับคอลเลคเตอร์ เกิดเป็นกระแสเบส ( $I_B$ ) กับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ตามลำดับ ซึ่งจะไหลในทิศทาง

จากหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์คือ การเบี่ยงเบนของกระแสเนื่องจากแรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะเมื่อมีการตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสที่ถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ในเบส ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับคอลเลคเตอร์เกิดขึ้น ดังนั้นการจะรู้ว่าอุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้หรือไม่นั้น สามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนค่าของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กตัดผ่าน โดยสามารถวัดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ได้โดยตรงเลย หรืออีกวิธีคือการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ หรือที่เรียกว่าแรงดันเอาต์พุต (Output voltage:  $V_{BC}$ ) ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้ โดยความสามารถในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะวัดในรูปของ “ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity:  $S$ )” ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_{BC}$ ) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก



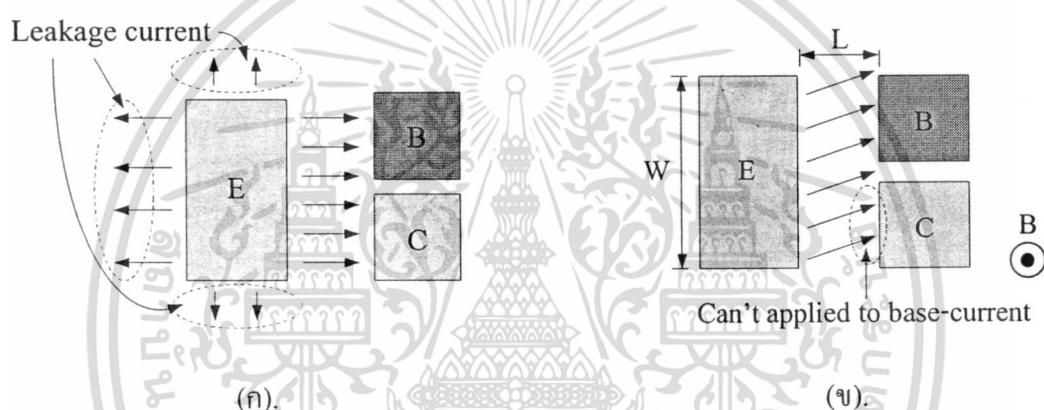
รูปที่ 3.2 การใช้งานแมกนีโททรานซิสเตอร์โดยให้ไบอัสระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสและคอลเลคเตอร์

จากรูปที่ 3.2 เป็นวิธีการให้ไบอัสแมกนีโททรานซิสเตอร์แบบสามขา โดยอิมิตเตอร์จะต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ ส่วนขาเบสและขาคอลเลคเตอร์ต่อเข้ากับความต้านทาน  $R_B$  และ  $R_C$  ตามลำดับ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับ Offset หรือว่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเบสกับคอลเลคเตอร์ให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ( $\Delta V_{BC} \approx 0$ ) ในสภาวะเริ่มต้นที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก และความต้านทาน  $R_E$  ทำหน้าที่ในการปรับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านอิมิตเตอร์ โดยจากรูปพาหะที่มีผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยส่วนมากแล้วคืออิเล็กตรอน ซึ่งจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านฐานรองชนิดพีไปยังเบสกับคอลเลคเตอร์ เกิดเป็น

กระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

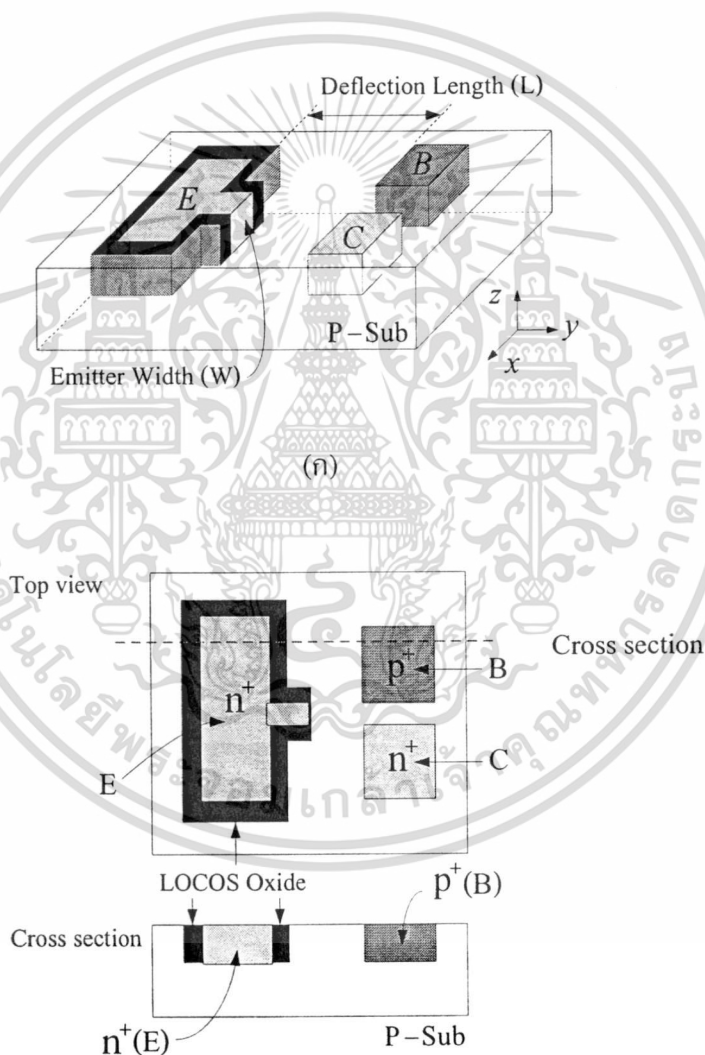
แต่ด้วยข้อเสียของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา คือ 1. กระแสพาหะที่ไหลจากอิมิตเตอร์ผ่านไปยังเบสกับคอลเลคเตอร์ สามารถเกิดการรั่วไหลออกทางด้านข้างของอิมิตเตอร์ได้ โดยจะเกิดการรวมตัวใหม่กับโฮล (Hole) ที่อยู่ในเบสและเกิดเป็นกระแสเบสทั้งหมด ซึ่งพาหะส่วนนี้จะไม่มีส่วนในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ ดังนั้นถือเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ก) และ 2. ความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะที่มากเกินไป ส่งผลให้พาหะที่เกิดการเบี่ยงเบนส่วนหนึ่งไปสามารถเคลื่อนที่ไปยังอีกขั้วหนึ่งได้ ทำให้กระแสเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าที่ควร ดังนั้นค่าความไวในการตอบสนองจะมีค่าน้อยตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ข)



รูปที่ 3.3 (ก). การเกิดกระแสรั่วของด้านข้างของขั้วอิมิตเตอร์ และ (ข). อิมิตเตอร์ที่มีพื้นที่การฉีดพาหะที่กว้างเกินไป ทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดได้ไม่เต็มที่

### 3.1.3 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (Low Power Magnetotransistor)

จากที่ได้กล่าวมาเกี่ยวกับข้อเสียและข้อจำกัดของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวใหม่นี้ขึ้นมา โดยเป็นความพยายามที่จะกำจัดข้อเสียเหล่านั้นออกไปเพื่อที่จะทำให้แมกนีโตทรานซิสเตอร์มีความไวในการตอบสนองที่ดีขึ้นและลดการใช้กระแสไบอัสของอิมิตเตอร์ลงจากเดิม ซึ่งแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวใหม่นี้ให้ชื่อว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (Low Power Magnetotransistor)” โดยสามารถแสดงให้เห็นโครงสร้างได้ดังรูปต่อไปนี้



(ข)

รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (ก). แสดงโครงสร้างแบบ 3 มิติ (ข). แสดงโครงสร้างแบบ มองจากด้านบน (Top. view) และภาคตัดขวาง (Cross section)

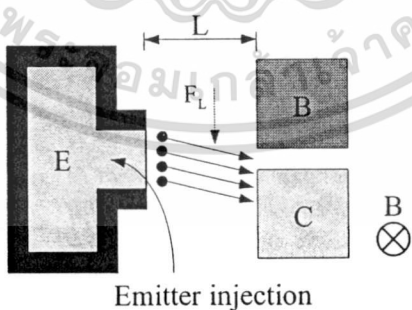
มิติ (ข). แสดงโครงสร้างแบบ มองจากด้านบน (Top. view) และภาคตัดขวาง (Cross section)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพัฒนาและปรับปรุงเมกนีโททรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นคือการปรับเปลี่ยนโครงสร้างขึ้นมาใหม่ โดยยังคงใช้โครงสร้างเป็นแบบ NPN เนื่องจากพาหะที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กคือ อิเล็กตรอนซึ่งมีค่า mobility ที่มากกว่าโฮล ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ในเนื้อสารได้ดีกว่า ดังนั้นแรงลอเรนซ์ที่กระทำและมุมของการเบี่ยงเบนภายใต้สนามแม่เหล็กค่าเดียวกันจะมีค่ามากกว่าพาหะที่เป็นโฮล ส่งผลให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นได้ ส่วนการลดการเกิดกระแสรั่วทางด้านข้างของอิมิตเตอร์นั้นทำได้โดยการสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ขึ้นมาล้อมรอบขั้วอิมิตเตอร์ให้เหลืออยู่เฉพาะบริเวณที่จะฉีดพาหะเท่านั้น ซึ่งข้อดีคือ จะช่วยลดการเกิดกระแสรั่วทางด้านข้างและบังคับให้กระแสพาหะไหลอยู่เฉพาะในบริเวณที่มีผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่านั้น

ดังนั้น โครงสร้างของเมกนีโททรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ จะประกอบขึ้นด้วย อิมิตเตอร์ ( $n^+$ ), เบส ( $p^+$ ) และคอลเลกเตอร์ ( $n^+$ ) บนฐานรองของซิลิคอนชนิดพี (p-substrate) และมีการสร้างชั้นออกไซด์หนาขึ้นมามีล้อมรอบอิมิตเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4(ก) และ 3.4(ข)

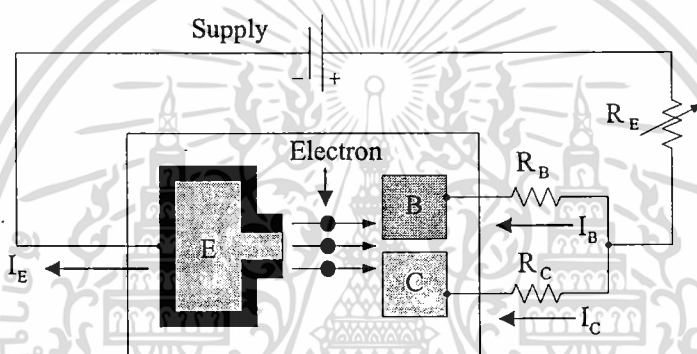
จากการพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างของเมกนีโททรานซิสเตอร์ขึ้นมาใหม่นี้ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคือการลดพื้นที่การฉีดพาหะและมีการสร้างชั้นออกไซด์หนาล้อมรอบอิมิตเตอร์ ส่งผลให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นและลดการไบอัสกระแสลง เนื่องจากสามารถลดการเกิดกระแสรั่วทางด้านข้างของอิมิตเตอร์และบังคับให้พาหะเคลื่อนที่อยู่เฉพาะบริเวณที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การสร้างชั้นออกไซด์หนาล้อมรอบอิมิตเตอร์ของเมกนีโททรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ เพื่อลดการเกิดกระแสรั่วทางด้านข้าง

### 3.1.4 วิธีการใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ

ในการนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำไปใช้งาน จะมีลักษณะแบบเดียวกันกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา คือ อิมิตเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟชั่วคราว เนื่องจากพาหะที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่คืออิเล็กตรอน ขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์จะต่อเข้ากับความต้านทาน  $R_B$  และ  $R_C$  ตามลำดับ ซึ่งความต้านทานทั้งสองทำหน้าที่ในการปรับค่าแรงดัน Offset ระหว่างขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ ส่วนปลายด้านหนึ่งของความต้านทานทั้งสองจะนำไปต่อเข้ากับความต้านทาน  $R_E$  ซึ่งจะต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟและ  $R_E$  จะทำหน้าที่ในการปรับกระแสไบอัสให้แก่อุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการให้ไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ

## 3.2 หลักการทำงาน

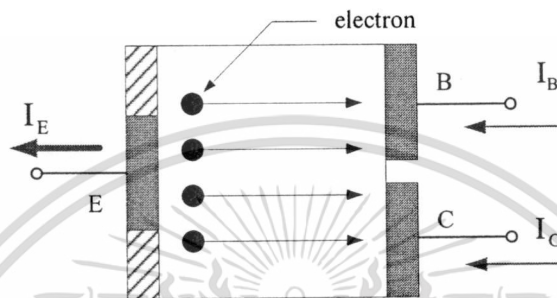
หลักการหรือกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีอยู่ด้วยกันสองกลไกหลัก คือ 1. กลไกการเบี่ยงเบนพาหะ (Carrier Deflection) และ 2. กลไกการรวมตัวใหม่ (Recombination)

### 3.2.1 กลไกการเบี่ยงเบนกระแสพาหะ (Carrier Deflection)

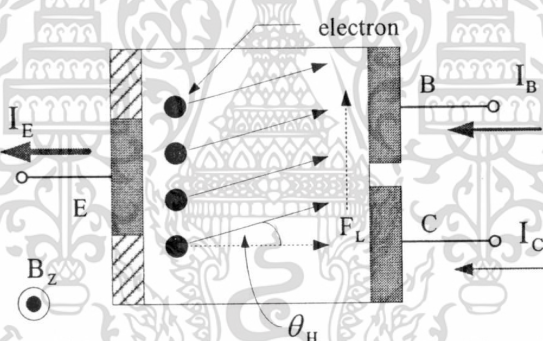
เมื่อทำการให้ไบอัสแก่แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ ดังในรูปที่ 3.6 อิมิตเตอร์จะทำหน้าที่ในการจ่ายพาหะซึ่งก็คืออิเล็กตรอน ผ่านไปยังเบสกับคอลเลคเตอร์ เกิดเป็นกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ตามลำดับ ซึ่งในสภาวะปกติที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ( $B = 0$ ) กระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่งคือ  $I_B$  กับ  $I_C$  ดังในรูปที่ 3.7(ก) และเมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวตัดฉากกับระนาบผิวของอุปกรณ์ จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อ

พาหะตามหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม  $\theta_H$

(มุมของฮอลล์) ดังในรูปที่ 3.7(ข) เนื่องจากพาหะคืออิเล็กตรอน ดังนั้นแรงลอเรนซ์จะมีทิศทางพุ่งขึ้นบน ทำให้กระแสพาหะเบี่ยงเบนไปทางด้านซ้ายเบส เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบส( $\Delta I_B$ ) กับกระแสคอลเลคเตอร์( $\Delta I_C$ ) โดยที่กระแสเบสจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่าลดลง ซึ่งกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะสัมพันธ์กับขนาดของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านและชนิดของพาหะ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



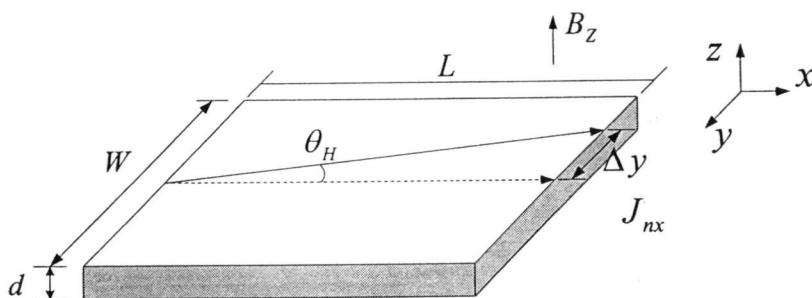
(ก) ปราศจากสนามแม่เหล็ก



(ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

รูปที่ 3.7 การเบี่ยงเบนของพาหะ(อิเล็กตรอน) เนื่องจากแรงลอเรนซ์

(ก) ปราศจากสนามแม่เหล็ก และ (ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน



รูปที่ 3.8 แสดงพื้นที่การเบี่ยงเบนพาหะ (อิเล็กตรอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในวิชาฟิสิกส์เท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.8 แสดงพื้นที่การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Response area) ของกระแสพาหะอิเล็กตรอนขนาด  $J_{nx}$  โดยมีพื้นที่การฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์เท่ากับ  $W$  และมีระยะเบี่ยงเบนเท่ากับ  $L$  เมื่อมีสนามแม่เหล็กขนาด  $B_z$  ตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับระนาบผิว ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิมเป็นมุมเท่ากับ  $\theta_H$

โดยกระแสอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ) เป็นผลรวมของกระแสเบส ( $I_B$ ) กับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.1 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสพาหะ (Carrier density) ได้ดังสมการที่ 3.2

$$I_E = I_B + I_C \quad (3.1)$$

$$I_E = J_{nx} \cdot W \cdot d \quad (3.2)$$

เมื่อ  $J_{nx}$  คือความหนาแน่นของกระแสพาหะ,  $W$  คือความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์ และ  $d$  คือความลึกของรอยต่อ (Junction depth)

ในภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก กระแสพาหะเคลื่อนที่ตามแนวเส้นประ แต่เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ ( $B_z$ ) ในทิศทางตั้งฉาก ส่งผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ ไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม  $\theta_H$  โดยมุมของการเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญคือค่า mobility ( $\mu_n$ ) และค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ 3.3 โดยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนั้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{BC}$ ) โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของโครงสร้างได้ดังสมการที่ 3.4

$$\tan\theta_H = \mu_n \cdot B_z \quad (3.3)$$

$$\Delta I_{BC} = J_{nx} \cdot d \cdot \Delta W \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\Delta W$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta W = \Delta y = \mu_n \cdot L \cdot B_z \quad (3.5)$

ดังนั้นแทนสมการที่ 3.5 ลงในสมการที่ 3.4 จะได้ว่า

$$\Delta I_{BC} = J_{nx} \cdot \mu_n \cdot d \cdot L \cdot B_z \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าการเบี่ยงเบนของพาหะจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน ทั้งความหนาแน่นของกระแส, ค่า mobility ของพาหะ, ความลึกของรอยต่อ, ระยะการเบี่ยง และความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งการเบี่ยงเบนของพาหะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์นี้ จะส่งผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ด้วย

โดยสมการแสดงค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) เขียนได้สองรูปแบบ คือ 1.ค่าความไวสัมพัทธ์ (Relative sensitivity,  $S_R$ ) เป็นค่าความไวที่คิดจากการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ต่อกระแสอิมิตเตอร์และการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 3.7 และ 2.ค่าความไวสัมบูรณ์ (Absolute sensitivity,  $S_A$ ) เป็นค่าความไวในการตอบสนองที่คิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างค่าขาเบสกับคอลเลคเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 3.8

$$S_R = \frac{\Delta I_{BC}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \quad (3.7)$$

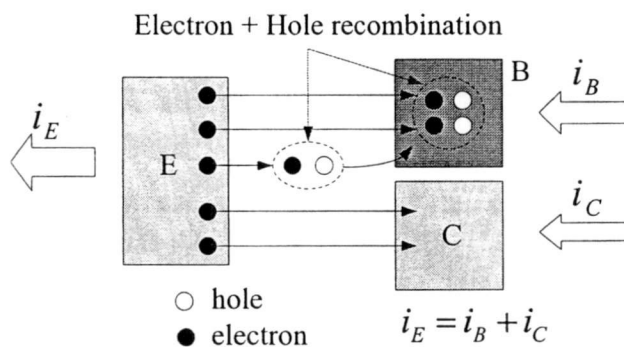
$$S_A = \frac{\Delta V_{BC}}{\Delta B_Z} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\Delta V_{BC}$  คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างค่าขาเบสกับคอลเลคเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.9

$$\Delta V_{BC} = \Delta I_B \cdot R_B - \Delta I_C \cdot R_C \quad (3.9)$$

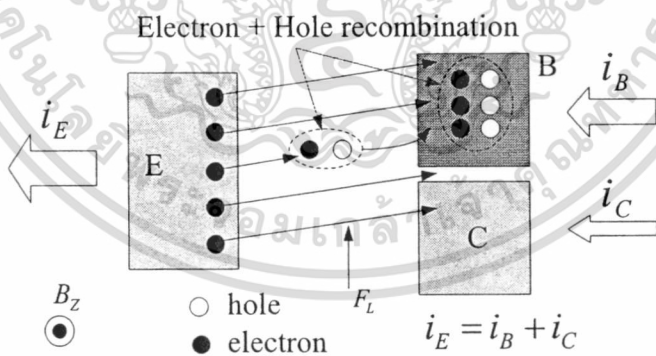
### 3.2.2 กลไกการรวมตัวใหม่ (Recombination)

กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์อีกอย่างคือ กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Carrier Recombination) เป็นกลไกการรวมตัวของพาหะระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยจะเกิดขึ้นในส่วนของฐานรอง (Substrate) กับในเบส คือเมื่ออิมิตเตอร์ฉีดอิเล็กตรอนออกไปนั้น อิเล็กตรอนบางส่วนจะรวมตัวเข้ากับ โฮลในฐานรองเกิดเป็นกระแสเบสบางส่วน สำหรับอิเล็กตรอนส่วนที่เหลือสามารถเคลื่อนที่ไปถึงขั้วคอลเลคเตอร์เกิดเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) และอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปถึงขั้วเบสเกิดการรวมตัวใหม่ในเบสได้เป็นกระแสเบส ( $I_B$ ) โดยสามารถแสดงกลไกต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะ

ซึ่งเมื่อไม่มีการให้สนามแม่เหล็กกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะดำเนินไปตามปกติ กระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์คงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับระนาบผิว ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะไปจากแนวเดิม ดังรูปที่ 3.10 แรงลอเรนซ์จะมีทิศทางพุ่งขึ้นด้านบน ทำให้เกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสเบสมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่กระแสคอลเลคเตอร์จะมีลดลง แต่สุดท้ายผลรวมของกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสอิมิตเตอร์ดั้งเดิมคือ  $I_E = I_B + I_C$  (สมการที่ 3.1)



รูปที่ 3.10 การเกิดกลไกการเบี่ยงเบนและกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

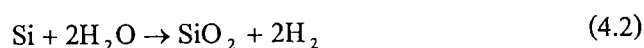
## บทที่ 4

### กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์และเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์และเทคโนโลยีการผลิตขั้นพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยประกอบด้วย กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ (Oxidation process), การฉายแสง (Photolithography), การแพร่สารเจือ (Diffusion), การยิงฝังประจุ (Ion implantation), การสร้างชั้นโลหะ (Metallization) และ การออกแบบและการสร้างมาสก์ (Design and Masks) ซึ่งกระบวนการผลิตที่กล่าวมานี้จะประกอบไปด้วยกระบวนการผลิตต่างๆ แยกย่อยลงไปอีกทีหนึ่ง ในการผลิตอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำขึ้นมาชิ้นหนึ่งนั้น อาจจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตแบบเดิมซ้ำกันไปมาหลายๆ รอบก่อนที่จะสร้างอุปกรณ์สำเร็จได้ในส่วนของกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ก็เช่นเดียวกัน จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตจากหลายส่วนและมีการวนลูบในบางกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับรายละเอียดของกระบวนการสร้างอุปกรณ์จะได้กล่าวถึงในข้อหัวของกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ต่อไป [17]

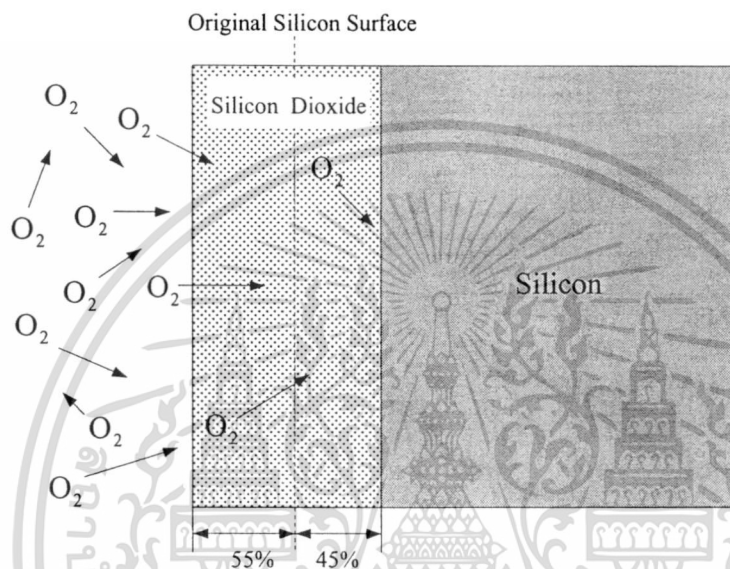
#### 4.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process)

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



เริ่มต้นออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนที่ผิวเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งจะปกคลุมอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) อย่างหนาแน่น โดยชั้นออกไซด์ที่ผิวจะทำหน้าที่ในการปกป้องกันไม่ให้โมเลกุลของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนส่วนที่อยู่ลึกลงไปได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจมีออกซิเจนบางส่วนที่สามารถแพร่ข้ามชั้นออกไซด์ที่ผิวเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิคอนได้ ดังรูปที่ 4.1 ชั้นออกไซด์จะมีความหนาเพิ่มขึ้นและทำหน้าที่ป้องกันหรือลดการแพร่ของออกซิเจนให้ลดลง โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ขยายออกจากผิวหน้าเดิมของแผ่นเวเฟอร์ซึ่งมีความหนาประมาณ 55% และส่วนที่เกิดลึกลงไปในเนื้อซิลิคอน ซึ่งมีความหนาประมาณ 45% จากผิวเดิมของแผ่นเวเฟอร์



รูปที่ 4.1 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน

กลไกของการเกิดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน เกิดเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนกับซิลิคอนดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยกระบวนการในการสร้างชั้นออกไซด์นี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

#### 4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.2 การออกซิเดชันแบบเปียก (Wet Oxidation)

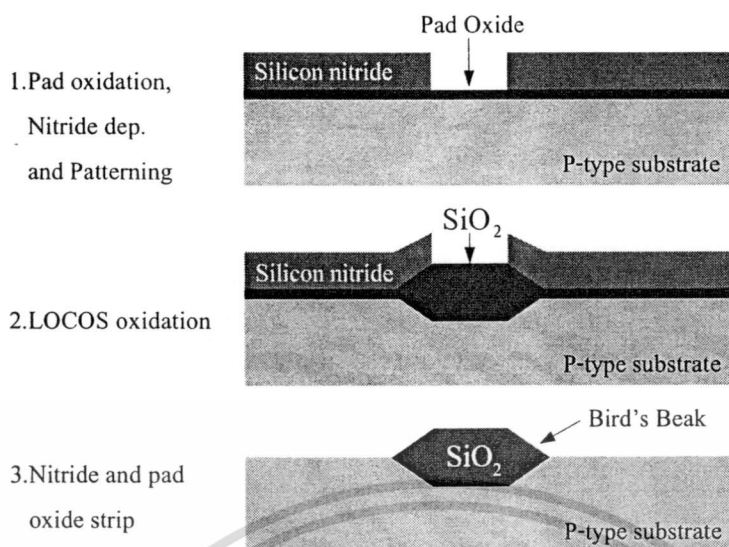
กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก เป็นการทำปฏิกิริยากันทางเคมีระหว่างออกซิเจนกับซิลิคอน เพื่อให้เกิดเป็นออกไซด์เช่นเดียวกันกับกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง แต่แตกต่างกันตรงที่การออกซิเดชันแบบเปียก ออกซิเจนที่เกิดขึ้นมาจาก โมเลกุลของน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 คือที่อุณหภูมิสูงๆ โมเลกุลของน้ำสามารถแตกตัวเกิดเป็นก๊าซไฮโดรคลอไรด์ (HO) ซึ่งสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอน ไดออกไซด์ได้เร็วกว่า โมเลกุลของก๊าซออกซิเจน ดังนั้นกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกจึงสามารถที่จะสร้างชั้นออกไซด์ได้รวดเร็วกว่ากระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง การออกซิเดชันแบบเปียกถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่างๆ เช่น การสร้างมาส์คออกไซด์, การสร้างชั้น LOCOS ออกไซด์ เป็นต้น ตารางที่ 4.1 แสดงการเกิดชั้นออกไซด์ขนาดความหนา 1000 อังสตรอม ที่เวลาแตกต่างกันของกระบวนการออกซิเดชันทั้งสองชนิด

ตารางที่ 4.1 กระบวนการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน

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

### 4.1.3 การสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxidation)

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



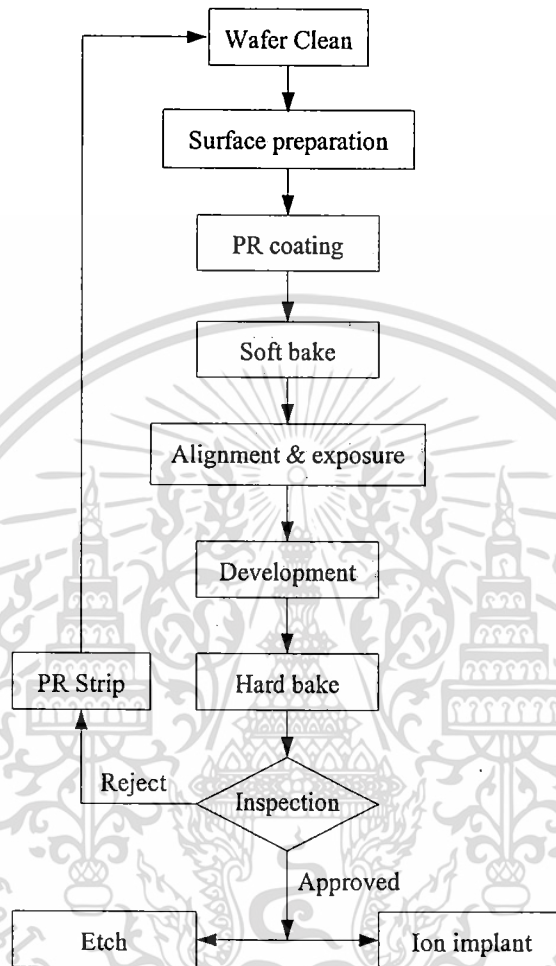
รูปที่ 4.2 การสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่จากกระบวนการออกซิเดชัน

#### 4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการของการถ่ายแบบ (Patterning) จากมาสก์ (mask) หรือ เรติเคิล (reticle) จากการออกแบบ ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเมื่อฉายแสงลงบนผิวของแผ่นเวเฟอร์ จะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเริ่มแรกถูกใช้ในอุตสาหกรรมทางการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมาถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตทรานซิสเตอร์และแผ่นวงจรรวม (Integrated circuit) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิต IC โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างลวดลายต่างๆ ลงบนแผ่นเวเฟอร์ ก่อนทำการกัด (etching), การยิงฝังประจุ (ion implantation) หรือการแพร่สารเจือ (Diffusion) เพื่อทำเป็นขั้วต่างๆ ต่อไป

โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ ก็คือเริ่มต้นจากการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer clean) เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ออกจากผิวหน้า ต่อมาเป็นการเตรียมผิวหน้า (Preparation) เพื่อกำจัดความชื้นออกไป หลังจากนั้นจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist coating) และทำการอบ (soft bake) เพื่อให้ น้ำยาไวแสงติดกับแผ่นเวเฟอร์ ได้ดียิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นกระบวนการฉายแสง (Development) ซึ่งเป็นการถ่ายแบบจากมาสก์ ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนแผ่นเวเฟอร์ และขั้นตอนสุดท้ายจะทำการอบอีกครั้งหนึ่ง หลังจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นจะส่งต่อไปยังขั้นตอนของการกัด หรือกระบวนการยิงฝังประจุต่อไป ดังรูปที่ 4.3 เป็นไคอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

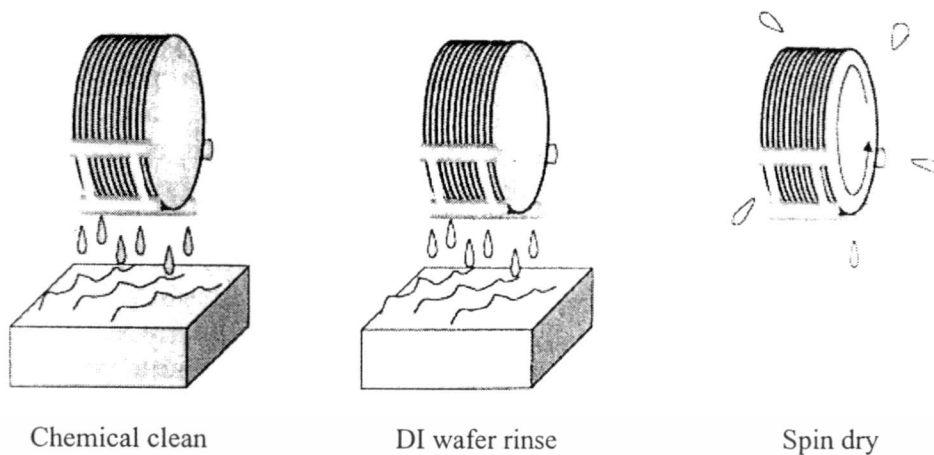


รูปที่ 4.3 ไคอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

#### 4.2.1 ทำความสะอาดผิวหน้า (Wafer clean)

ก่อนที่จะเริ่มต้นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการผลิตอื่นๆ จำเป็นที่จะต้องมีการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์เสียก่อน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ เช่น คราบไขมันที่ติดมาหรือคราบฝุ่นละอองต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ออกไป ซึ่งหลังจากที่ทำความสะอาดด้วยสารเคมีแล้ว ต่อจากนั้นจะนำไปล้างด้วยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงที่เรียกว่าน้ำ ดีไอ (DI, deionized) เพื่อทำการล้างสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดผิวหน้าออกไป และขั้นตอนสุดท้ายนำไปสปินให้แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.4

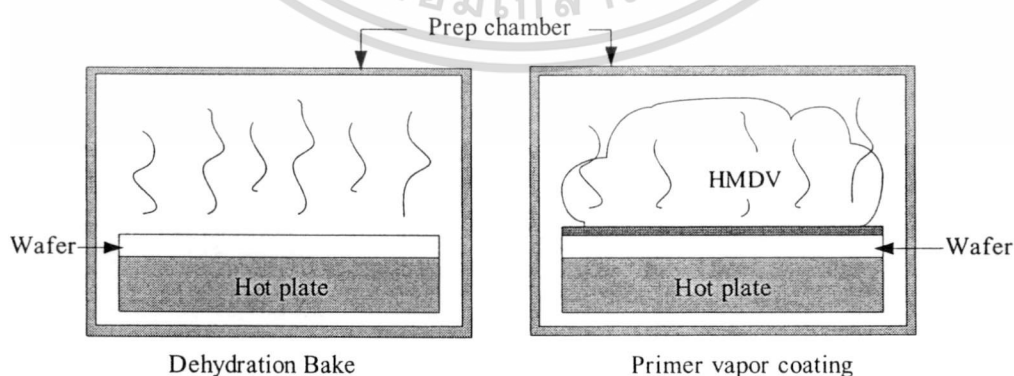
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์

4.2.2 การเตรียมผิวหน้า (Surface preparation)

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิกอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึกก่อนที่จะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงบนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน โดยผิววัสดุที่ใช้กันมากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้น หรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์ออกไป เพราะผิวของชั้นออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไอน้ำหรือความชื้นจากอากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิ ราว 200-250 °C นาน 30 นาที ภายหลังการอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้นานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซับความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้นเมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการเคลือบ



รูปที่ 4.5 กระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

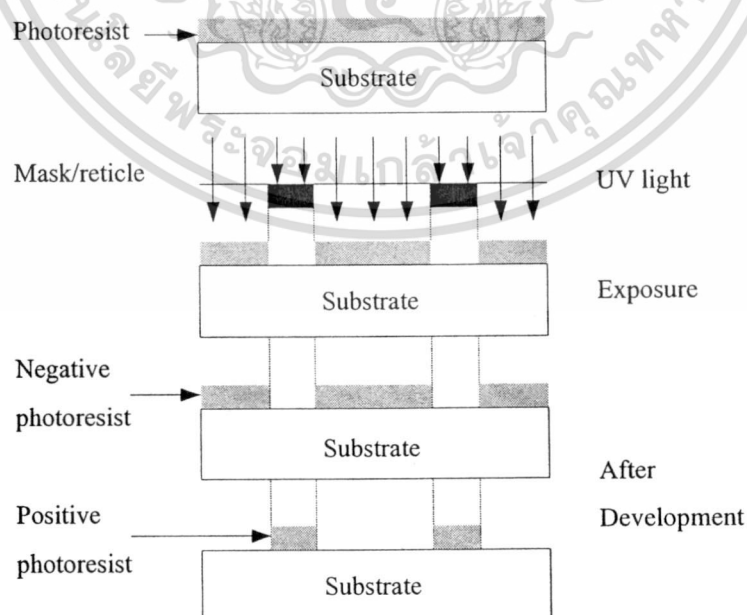
น้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ ก่อนทำการเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexamethyl-disilazane (HMDS,  $(\text{CH}_3)_3\text{SiNHSi}(\text{CH}_3)_3$ ) ฉีดพ่น หรืออบไอรระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากชั้นผิวของออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่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

#### 4.2.3 การเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงเป็นขั้นตอนการเคลือบชั้นฟิล์มบางของน้ำยาไวแสงที่ผิวด้านบนของแผ่นเวเฟอร์ โดยน้ำยาไวแสงจะมีด้วยกันสองแบบคือ แบบ Positive และแบบ Negative ซึ่งมีวิธีการใช้ที่แตกต่างกัน ในขณะที่กระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงก็จะมีด้วยกันหลายวิธี แล้วแต่ความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน ซึ่งอาจสรุปได้ดังต่อไปนี้

##### 4.2.3.1 น้ำยาไวแสง (Photoresist)

น้ำยาไวแสงเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติทางแสงคือ สามารถเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีได้เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างลวดลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือใช้ในอุตสาหกรรม IC สำหรับถ่ายแบบจากมาสก์ที่ออกแบบไว้ไปยังแผ่นเวเฟอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 4.6** แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด โยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยนำยาไวแสงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสง คือ 1.Negative photoresist นำยาไวแสงชนิดนี้ หลังจากกระบวนการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายตรงกับข้ามกับต้นแบบ นั่นคือส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกกัดออก เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่ถูกแสงเท่านั้น และ 2.Positive photoresist เป็นนำยาไวแสงที่หลังจากการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายแบบเดียวกับกับมาส์คหรือว่าต้นแบบ นั่นคือส่วนที่ได้รับแสงจะถูกกัดออก ในขณะที่ส่วนที่ไม่ได้รับแสงจะคงเหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกันของนำยาไวแสงทั้งสองชนิด โดยอุตสาหกรรมทางด้านเซมิคอนดักเตอร์ในปัจจุบันจะนิยมใช้นำยาไวแสงชนิด Positive เนื่องจากมีความละเอียดสูงกว่าชนิด Negative

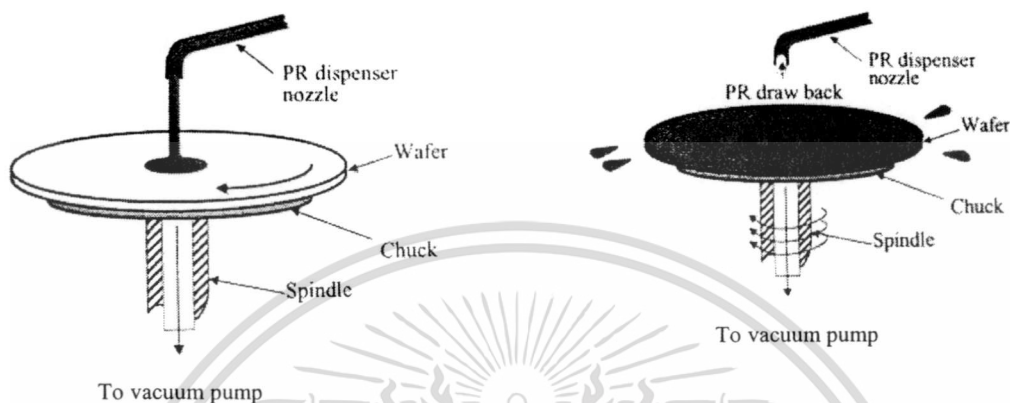
#### 4.2.3.2 วิธีการเคลือบ (Coating)

การเคลือบนำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกหรือแผ่นเวเฟอร์ ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมหรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้

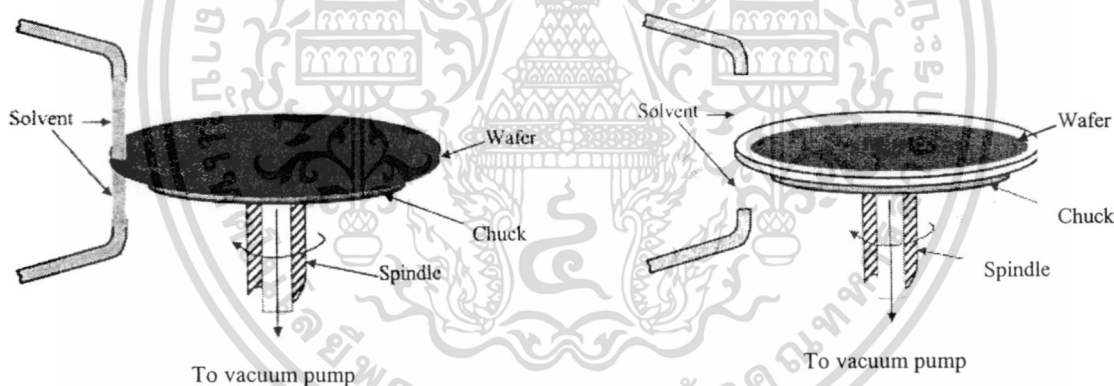
- แบบสปินเนอร์ (Spinner coating)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบนำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกแบบวงกลม ซึ่งการเคลือบนำยาไวแสงด้วยวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือสปินเดิล (Spindle) โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูกวางลงบนแท่นหมุนและทำให้ยึดติดได้ด้วยระบบสูญญากาศ จากนั้นนำยาไวแสงจะถูกหยดลงบริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (spin) ด้วยความเร็วรอบราว 3000-6000 rpm/min ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที นำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยความหนาของฟิล์มบางไวแสงที่ได้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1000- 2000 อังสตรอม ถ้าหากความเร็วรอบต่ำเกินไป จะได้ชั้นของฟิล์มไวแสงที่หนามาก ในขณะที่ถ้าความเร็วรอบสูงๆ ความหนาของชั้นฟิล์มจะไม่เท่ากัน โดยบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะหนามากกว่าส่วนอื่นๆ หลังจากที่ได้เคลือบนำยาไวแสงที่ผิวของแผ่นผลึกเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการลอกฟิล์มที่บริเวณขอบแผ่นออก เพื่อให้ไว้ใช้สำหรับการจับหรือเคลื่อนย้ายแผ่นผลึก ดังในรูปที่ 4.8 โดยขั้นตอนกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ต้องมีการระมัดระวังฝุ่นละอองเป็น

พิเศษ ดังนั้นต้องทำภายในห้องสะอาดที่มีการควบคุมปริมาณของฝุ่นละออง หรือ Clean room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้ จะถูกควบคุมให้มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้ระบบกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter)



รูปที่ 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์



รูปที่ 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์

#### ▪ แบบสเปรย์ (Spray coating)

วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสงแบบสเปรย์ น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึก และยึดเกาะกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท ซึ่งการควบคุมความหนาของฟิล์มที่ทำได้นั้นยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ด้านล่างของแผ่นผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating)

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

#### 4.2.4 การอบ (Prebake or Soft bake)

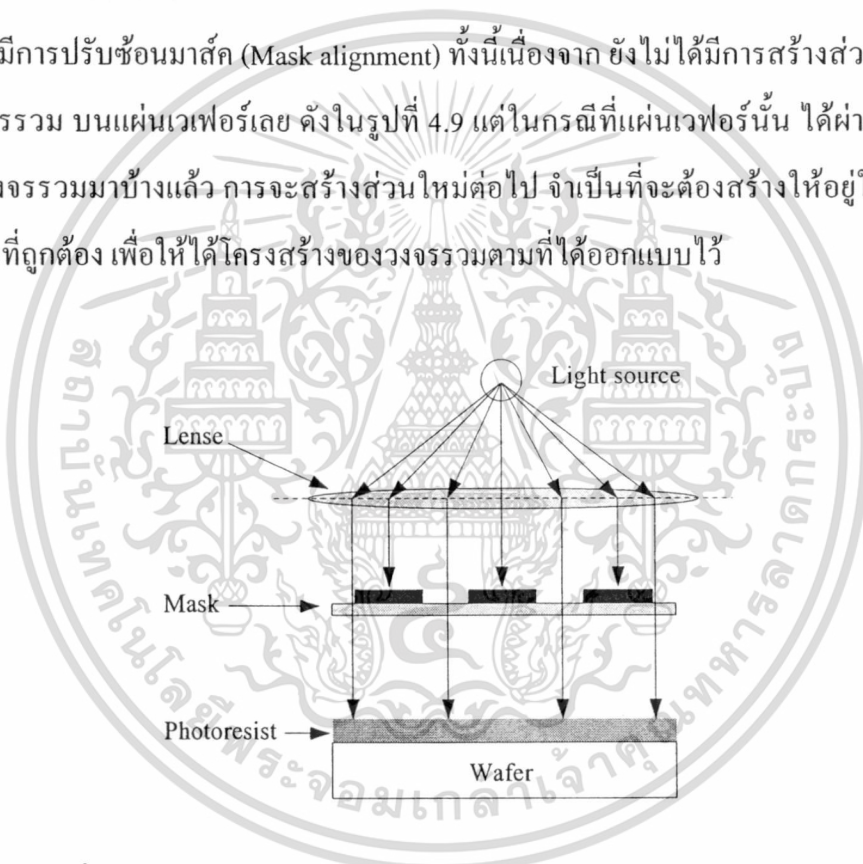
ภายหลังการเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบเพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นนี้ เรียกว่า Prebake หรือ Soft bake ซึ่งใช้อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 90-100 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ และถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเล็กน้อยคือที่ประมาณ 80-90 °C สำหรับการอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรือใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดมีปฏิกิริยาเคมี - ความร้อน หรืออาจทำให้ไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีที่สามารถกระทำได้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (Convection Oven) ซึ่งในตู้อบจะมีพัดลมช่วยพัดไอร้อนจากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นผลึกทำให้แผ่นผลึกร้อน การอบสามารถทำได้จำนวนหลายแผ่นพร้อมๆ กัน โดยแผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่องกาสซีทพิเศษ ซึ่งวิธีการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้แผ่นผลึกจะได้รับความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน ที่อาจเป็นสาเหตุของการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งถือเป็นข้อเสีย และไม่เหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง สำหรับในสายการผลิตวงจรรวมในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกทีละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการนี้ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อนเช่นนี้ เรียกว่า “Bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (Hot Plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางบนแผ่นร้อน หรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

#### 4.2.5 การปรับมาส์คและการฉายแสง (Alignment and Exposure)

ขั้นตอนการปรับมาส์คและการฉายแสงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งกระบวนการนี้จะทำหน้าที่ในการถ่ายแบบจากมาส์คหรือเรติเคิล ไปยังผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้

##### 4.2.5.1 การปรับมาส์ค

วิธีการฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์ค โดยปกติจะถูกวางสัมผัส(Contact) ลงไปบนแผ่นเวเฟอร์ที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็กระจกโฟโตมาส์คชิ้นแรก หรือมาส์คที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซ็อนมาส์ค (Mask alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นเวเฟอร์เลย ดังในรูปที่ 4.9 แต่ในกรณีที่แผ่นเวเฟอร์นั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้

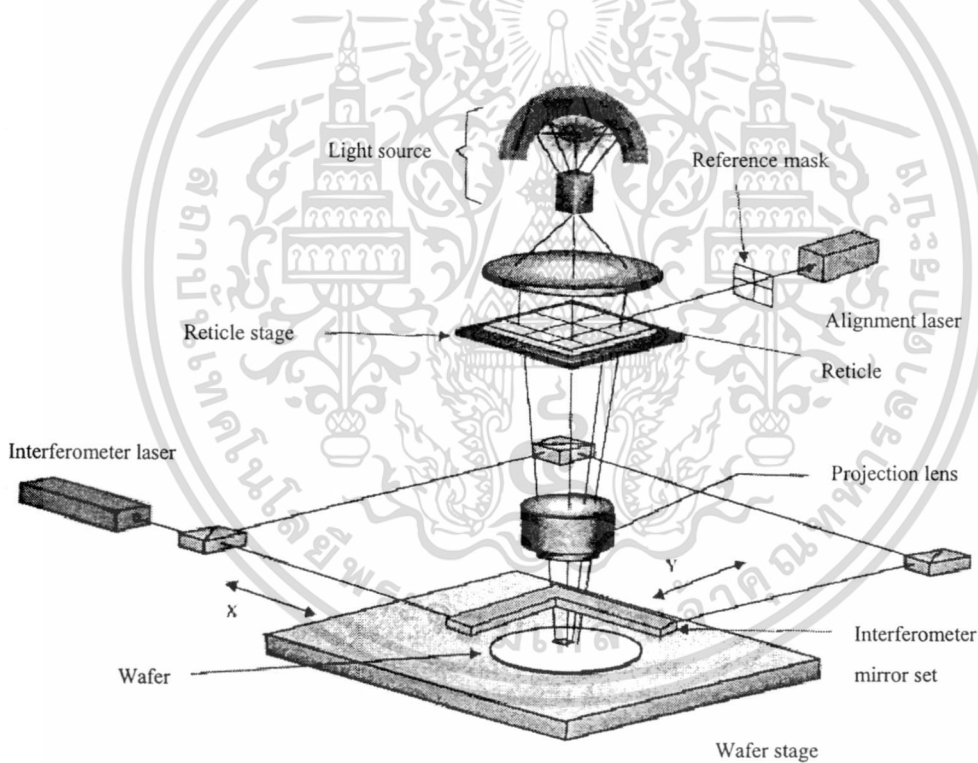


รูปที่ 4.9 แสดงกระบวนการถ่ายแบบจากมาส์คไปยังผิวของแผ่นเวเฟอร์

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาส์คตั้งแต่มาส์ค 2 แผ่นขึ้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับตำแหน่งมาส์ค เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาส์ค ซ้อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นเวเฟอร์อย่างถูกต้องเสียก่อน เพื่อให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ตรงตำแหน่งที่ต้องการ ทำให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ็อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซ็อน

มาส์ค” ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือแผ่นเวเฟอร์จะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (X-Y-Z table) ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (X) แนวตั้งฉาก (Y) และแนวสูง (Z) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว X, Y, Z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนตำแหน่งของกระจกโฟโตนิกส์จะถูกยึดให้อยู่หนึ่งเหนือแผ่นเวเฟอร์เล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำให้สามารถสังเกตเห็นภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นเวเฟอร์และบนโฟโตนิกส์ พร้อมกับทำการปรับเลื่อนฐานที่ยึดแผ่นเวเฟอร์ไว้ทั้งแกน X, Y และมุม  $\theta$  จนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นเวเฟอร์และบนโฟโตนิกส์ซ้อนกันตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง จากนั้นทำการปรับให้ตำแหน่งของแผ่นเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน Z จนแนบสนิทกับกระจกโฟโตนิกส์ ในกรณีที่ภาพลวดลายมีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ้อนภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไปภาพลวดลายของวงจรรวมจะมีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 4.10 แสดงกระบวนการปรับมาสก์และการฉายแสงด้วยระบบสเต็ปเปอร์ (Stepper)

เนื่องจากการยากในการที่จะสังเกตว่าภาพลวดลายในมาสก์กับแผ่นโฟโต้ตรงกันหรือยัง ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อให้การปรับซ้อนทำได้ง่ายขึ้น จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซ้อนมาสก์โดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับซ้อน” ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (square in box), กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากบาท เช่น ภาพลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นเห็นเอกสารนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับซ็อน” เป็นรูปจัตุรัส และภาพลวดลายบนกระจกมาส์ค เป็นรูป กล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น การปรับซ็อนทำได้โดยการปรับเลือนแผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ ได้ภาพ จัตุรัสเข้าไปซ็อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยม ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวม บนแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโธมาส์ค จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกต้องทุกประการ ถ้าหากการปรับ ซ็อนตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้องและเกิดการเสียหายได้ ดังนั้นขั้นตอน ของการปรับซ็อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก

#### 4.2.5.2 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ็อนภาพระหว่างกระจกโฟโธมาส์ค และแผ่นเวเฟอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโธมาส์ค เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่ชั้นของ น้ำยาไวแสง โดยปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโธลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น  $\lambda$  ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็น เป็นสีม่วง และสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโธลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสี เหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถ้ำรูปจะต้องใช้แสงในท้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กัน โดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (Mercury lamp) ซึ่งหลอดนี้จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความ ยาวคลื่นราว 365, 405 และ 436 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยทั่วไป โครงสร้างที่มีลวดลาย

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (Exposure Light Source) ชนิดต่างๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดประมาณ 0.50  $\mu\text{m}$  และ 0.35  $\mu\text{m}$  จะใช้หลอดไอปรอทชนิด G – line และ I –line ที่ให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 436 nm และ 365 nm ตามลำดับ สำหรับขนาดโครงสร้างอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 4.2

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

#### 4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

ขั้นตอนนี้เป็นการใช้น้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) ละลาย หรือล้างน้ำยาไวแสง ที่ผ่านการฉายแสงมาแล้ว ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกละลายออก แต่ถ้ากรณีน้ำยาไวแสงชนิดบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป การล้างน้ำยาไวแสงนี้ถ้าเป็นกรณีน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะใช้วิธีการพื้นฐานคือ นำแผ่นเวเฟอร์ลงไปหมุนบนสปินเนอร์ (spinner) คล้ายกับการเคลือบน้ำยาไวแสง โดยขณะที่แผ่นเวเฟอร์กำลังหมุน น้ำยาล้างจะถูกฉีดพ่นลงไปบนแผ่น โดยน้ำยาไวแสงที่ถูกละลายก็จะถูกแรงเหวี่ยงกระจายออกไปรอบๆ จากนั้นล้างแผ่นเวเฟอร์ให้สะอาดด้วยสารละลายอื่นๆ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ในกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดบวก อาจทำได้ครั้งละหลายๆ แผ่นพร้อมกัน โดยจุ่มลงในน้ำยาล้าง หรืออาจใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำยาล้าง คล้ายกับวิธีการล้างน้ำยาไวแสงชนิดลบ

#### 4.3 การกัด (Etching)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

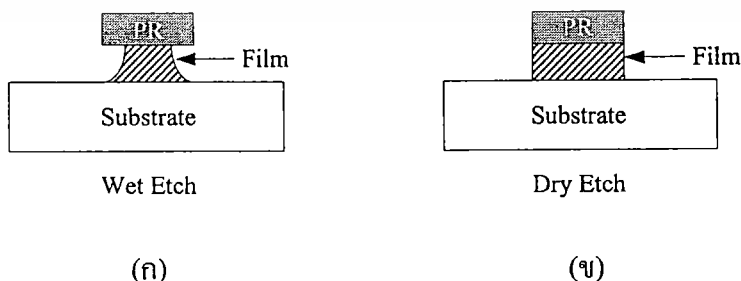
### 4.3.1 การกัดแบบเปียก (Wet Etch)

การกัดแบบเปียกเป็นวิธีการกัดสารที่เคลือบผิวออกจากแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารละลายทางเคมี โดยกระบวนการนี้นิยมใช้กับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่กว่า  $3\ \mu\text{m}$  ขึ้นไป ซึ่งอัตราการกัดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ในการกัดออกไซด์จะใช้กรดไฮโดรฟลูอริก (HF) ที่มีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) ผสมอยู่เพื่อควบคุมปฏิกิริยาเคมีให้เกิดสม่ำเสมอ โดยกรดไฮโดรฟลูอริกจะทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เป็น  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  กับน้ำ  $\text{H}_2\text{O}$  สมการปฏิกิริยาแสดงได้ดังสมการที่ 4.3 สำหรับข้อดีของกระบวนการกัดแบบเปียกคือ อัตราการกัดที่สูง, ราคาประหยัด แต่ข้อเสียคือไม่สามารถกัดโครงสร้างที่มีขนาดเล็กๆ ได้ และมีปัญหาเรื่องการกัดลึกเข้าไปได้ชั้นป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11(ก)



### 4.3.2 การกัดแบบแห้ง (Dry Etch)

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



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลจากการกัดด้วยกระบวนการสองแบบ (ก) การแบบเปียก (Wet etch)

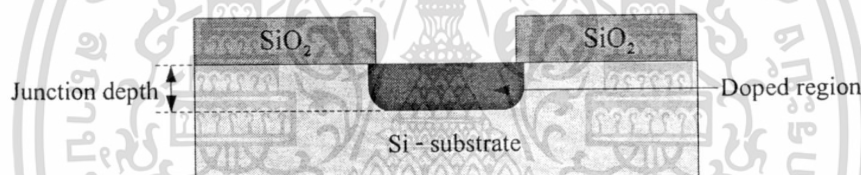
และ (ข) การกัดแบบแห้ง (Dry etch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

การแพร่ของสาร เป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่สารจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทุกที่ทุกขณะ เช่น การแพร่ของสารเคมีในอากาศ, การแพร่ของน้ำหรือน้ำมันเข้าไปในของแข็งอย่างไม่เป็นต้น

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



รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ

##### 4.4.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่สามารถนำมาใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี (p-type) ในงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอน ได้แก่ แกลเลียม (Gallium), อะลูมิเนียม (Aluminium), โบรอน (Boron) และอินเดียม (Indium) ซึ่งในทางปฏิบัติจริงๆ นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกธาตุที่ใช้เป็นสารเจืออย่างพิถีพิถัน ไม่ใช่สามารถใช้ได้ทุกกรณี ตัวอย่างเช่น จะไม่ใช่ธาตุแกลเลียมเป็นสารเจือชนิดพีเนื่องจากแกลเลียมสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี หรือก็คือ แกลเลียมมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นออกไซด์ได้สูงนั่นเอง ทำให้การใช้ชั้นออกไซด์ป้องกันผิวของซิลิคอนใช้ไม่ได้ผล นอกจากนี้แล้วการเลือกใช้ธาตุใดเป็นสารเจือยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ด้วย อย่างเช่น อะตอมของโบรอนจะทำให้เกิดโฮลได้ดีกว่าอะตอมของอินเดียม เนื่องจากระดับพลังงานผู้รับของโบรอนอยู่ที่ 0.01 eV ขณะที่ของอินเดียมอยู่ที่ระดับ 0.16 eV ส่วนอะลูมิเนียมมีข้อเสียคือ สามารถทำ

ปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี ทำให้กลายเป็นฉนวน ไฟฟ้าได้ง่าย จากเหตุผลต่างๆ ที่กล่าวมานี้ จึงทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โบรอนเป็นธาตุที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดพีมากที่สุด โดยโบรอนมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ อยู่ที่ประมาณ  $10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$  ที่อุณหภูมิ  $1150^\circ\text{C}$  ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้สะดวก

เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนอาจสามารถทำได้ 3 แบบคือ อะตอมของโบรอนสามารถสังเคราะห์มาได้จากสารประกอบ 3 ชนิดในสถานะของแข็งคือ โบรอนไตรออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) หรือในสถานะของเหลวคือ โบรอนไตรโบรไมด์ ( $\text{BBr}_3$ ) และในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ ( $\text{BCl}_3$ ) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมโบรอนออกมาจาก  $\text{B}_2\text{O}_3$  ที่ผิวของซิลิคอน โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้คือ



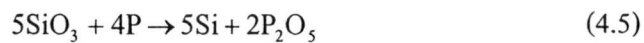
จากนั้นโบรอนจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน แต่ในงานทางด้านอุตสาหกรรม สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่แผ่น โบรอนไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่นโบรอนไนไตรด์กลายเป็นโบรอนไตรออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่นโบรอนไนไตรด์นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว  $1100^\circ\text{C}$  (ในสถานะของก๊าซไนโตรเจน)

#### 4.4.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดเอ็น (n-type) ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus), พลวง (Antimony) และสารหนู (Arsenic) การจะเลือกธาตุที่จะนำไปเป็นสารเจือทำได้โดยไม่จำกัด ซึ่งต่างจากกรณี สารเจือชนิด p กล่าวคือ ธาตุเหล่านี้ใช้งานได้ดี ในแต่ละลำดับชั้น ตัวอย่างเช่น พลวงและสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างชั้นฝัง (buried layer) n+ซึ่งเป็นการแพร่ครั้งแรกในงานสร้างวงจรรวม ส่วนการแพร่อื่นๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ธาตุฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิดเอ็น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟอสฟอรัสสูงกว่าพลวงและสารหนู ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อความประหยัด คือสามารถแพร่ได้เร็วในช่วงเวลาอันสั้น การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถกระทำให้ 3 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ฟอสฟอรัส อาจนำมาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใจใจประสงค์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

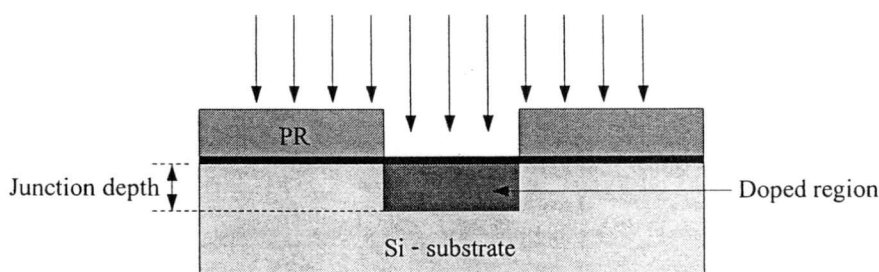
สารประกอบ 3 ชนิด เช่นในสถานะของแข็งได้แก่ ฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ ( $P_2O_5$ ) หรือในสถานะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสออกซิกคลอไรด์ ( $POCl_3$ ) หรือในสถานะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน ( $PH_3$ ) ซึ่งเป็นก๊าซพิษ และอาจจะเปิดได้ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ ( $P_2O_5$ ) และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก  $P_2O_5$  ที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



โดยธาตุฟอสฟอรัสจะแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้  $POCl_3$  เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัสโดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว  $1200^\circ C$  ในช่วงเวลาตามต้องการในสภาวะของก๊าซไนโตรเจน

#### 4.5 การยิงฝังประจุ (Ion implantation)

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการยิงฝังประจุ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.1 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดพี (P-type)

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

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

#### 4.5.2 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็น (N-type)

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

สำหรับกระบวนการในการสารเจือทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาคือ กระบวนการแพร่และการยิงฝังประจุ สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้ดังในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ระหว่างกระบวนการแพร่สารเจือกับการยิงฝังประจุ

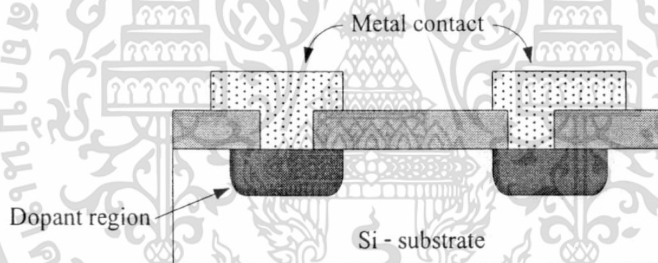
การแพร่ (Diffusion)	การยิงฝังประจุ (Ion Implantation)
- High temperature, hard mask	- Low temperature, photoresist mask
- Isotropic dopant profile	- Anisotropic dopant profile
- Cannot independently control the dopant concentration and junction depth	- Can independently control the dopant concentration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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization)

การสร้างชั้นโลหะหรือ การเมทัลไลเซชัน (Metallization) เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับขั้วไฟฟ้าภายนอกเข้า โดยโลหะที่ถูกนำมาใช้จะมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum), ไททาเนียม (Titanium) ทองแดง (Copper), หรือโลหะผสมระหว่าง อะลูมิเนียมกับทองแดง (Al-Cu) เป็นต้น และอาจจะเลือกใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) หรือสารประกอบของซิลิคอนกับธาตุอื่นอย่าง ไททาเนียมซิลิไซด์ ( $TiSi_2$ ) ที่มีความต้านไฟฟ้าน้อยกว่าโพลีซิลิคอน โดยการเลือกใช้โลหะสำหรับการทำเป็นขั้วโลหะนั้น แล้วแต่คุณสมบัติและความเหมาะสมต่องานที่นำไปใช้

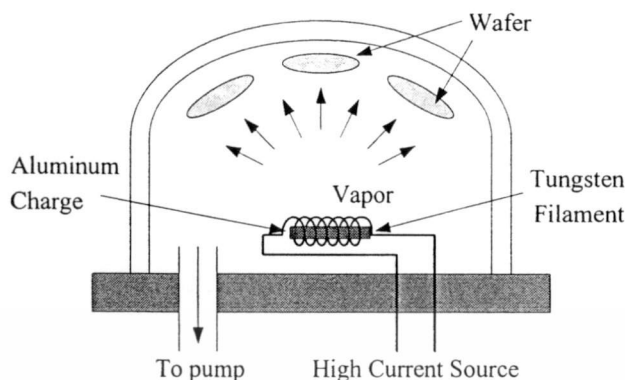
สำหรับโลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นโลหะที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมตัวอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation)

ของกระแสไฟฟ้าทำให้อัตราการเคลือบแผ่น (Deposition rate) สูงขึ้นตามไปด้วย แต่สิ่งสำคัญของระบบการผลิตนี้คือการยากในการควบคุมความหนาของฟิล์มซึ่งในกระบวนการสร้าง VLSI และ ULSI จะไม่ใช่กระบวนการนี้เนื่องจากกระบวนการระเหยในสุญญากาศนี้จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) มอสเฟตสูงขึ้นและทำให้วงจรรวมถูกลดความน่าเชื่อถือ โดยระบบนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก อยู่ที่ประมาณ 10 Amp ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ โดยโลหะที่ทำการสร้างบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติของโลหะที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ค่าความต้านทาน (Contact resistance) มีค่าต่ำหรือเป็นคอนแทกที่ดีและมีสภาพเป็นโอห์มมิกคอนแทก (Ohmic contact)
- ความน่าเชื่อถือ (Reliability) เช่น ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติจึงไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือโลหะมีอายุการใช้งานนาน
- ต้องสามารถทำการสกัด (Photo etching) ได้ และได้ลวดลายที่คมชัด และละเอียด
- ต้องยึดติดกับผิวของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งต่อเชื่อมกับลวดโลหะจากภายนอกได้ดี
- มีราคาถูก และสามารถสร้างได้โดยง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor fabrication process)

ในกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ สามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลักๆ คือ 1. ขั้นตอนการออกแบบมาสก์ (Mask) เพื่อใช้เป็นแบบสำหรับขั้นตอนของการถ่ายแบบลงบน ซีนิงงาน และ 2. ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ เป็นขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ด้วยกระบวนการผลิตต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยรายละเอียดของกระบวนการสร้างสามารถ อธิบายได้ดังนี้

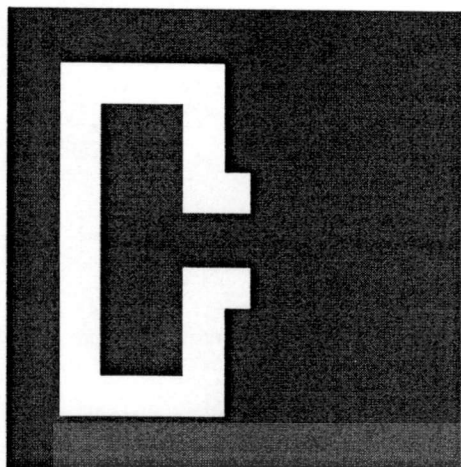
### 4.7.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design)

ในการออกแบบมาสก์ต้นแบบสำหรับใช้ในขั้นตอนการถ่ายต้นแบบสำหรับกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี ในกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ จะมีมาสก์ต้นแบบอยู่ ทั้งหมด 5 มาสก์ ดังต่อไปนี้คือ

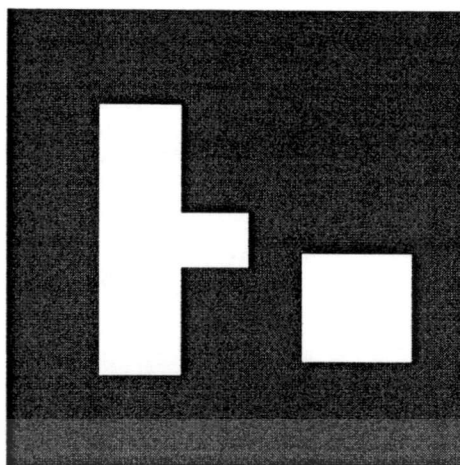
- มาสก์ 1: โลกอสมาสก์ (Mask # 1 LOCOS) แสดงดังรูปที่ 4.16(ก) เป็นมาสก์ต้นแบบที่ใช้ สำหรับการสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่ หรือ LOCOS oxide ขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชัน
- มาสก์ 2: อิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์มาสก์ (Mask # 2 Emitter and Collector) ดังรูปที่ 4.16(ข) เป็นมาสก์ต้นแบบสำหรับการสร้างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ ขึ้นจากกระบวนการยิงฝั งประจุด้วยฟอสฟอรัส
- มาสก์ 3: เบสมาสก์ (Mask # 3 Base) ดังรูปที่ 4.16(ค) เป็นมาสก์ต้นแบบสำหรับการสร้าง เบส จากกระบวนการยิงฝั งประจุด้วยโบรอน
- มาสก์ 4: มาสก์เปิดช่องเชื่อมต่อ (Mask #4 Window Contact) เป็นมาสก์สำหรับใช้ในการ เปิดช่องเพื่อทำการเชื่อมต่อกับชั้นโลหะ แสดงดังในรูปที่ 4.16(ง)
- มาสก์ 5: โลหะมาสก์ (Mask # 5 Metal) โดยมาสก์ต้นแบบนี้จะใช้สำหรับการสร้างชั้น โลหะ เช่น อะลูมิเนียม (Al), ทองแดง (Cu) หรือ นิกเกิล (Ni) เป็นต้น เพื่อใช้ทำเป็นขาของ อุปกรณ์ สำหรับเป็นจุดเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าภายนอก ดังรูปที่ 4.16(จ)

โดยสามารถแสดงส่วนประกอบของโครงสร้างต่างๆ ทั้งหมดของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ แบบพลังงานต่ำได้ดังรูปที่ 4.16(ฉ)

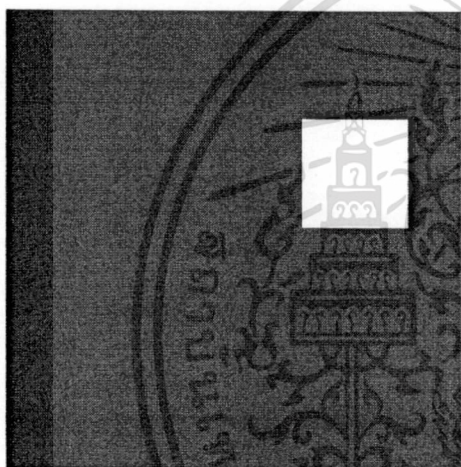
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



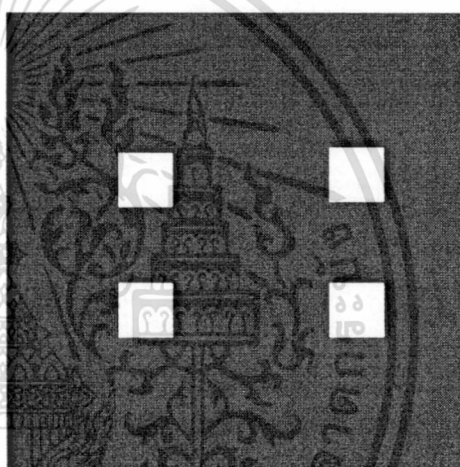
(ก) มาส์ค 1 (Mask#1 LOCOS)



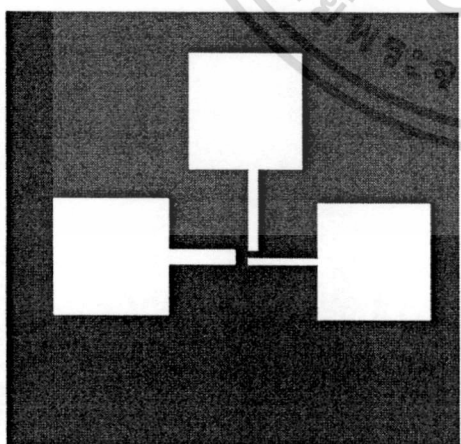
(ข) มาส์ค 2 (Mask#2 E, C)



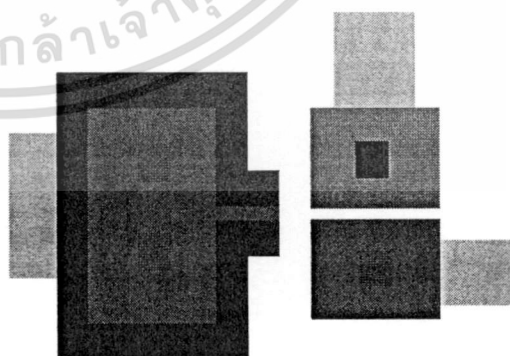
(ค) มาส์ค 3 (Mask#3 Base)



(ง) มาส์ค 4 (Mask#4 Window Contact)



(จ) มาส์ค 5 (Mask#5 Metal)



(ฉ) มาส์ค 5 (Mask#5 Metal)

**รูปที่ 4.16** ลายมาส์คต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพลังงานต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

ขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ด้วยกันคือ 1. ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์ (LOCOS oxide) 2. ขั้นตอนการสร้างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์ 3. ขั้นตอนการสร้างเบส และ 4. ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะสำหรับใช้ในการเชื่อมอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก โดยขั้นตอนต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

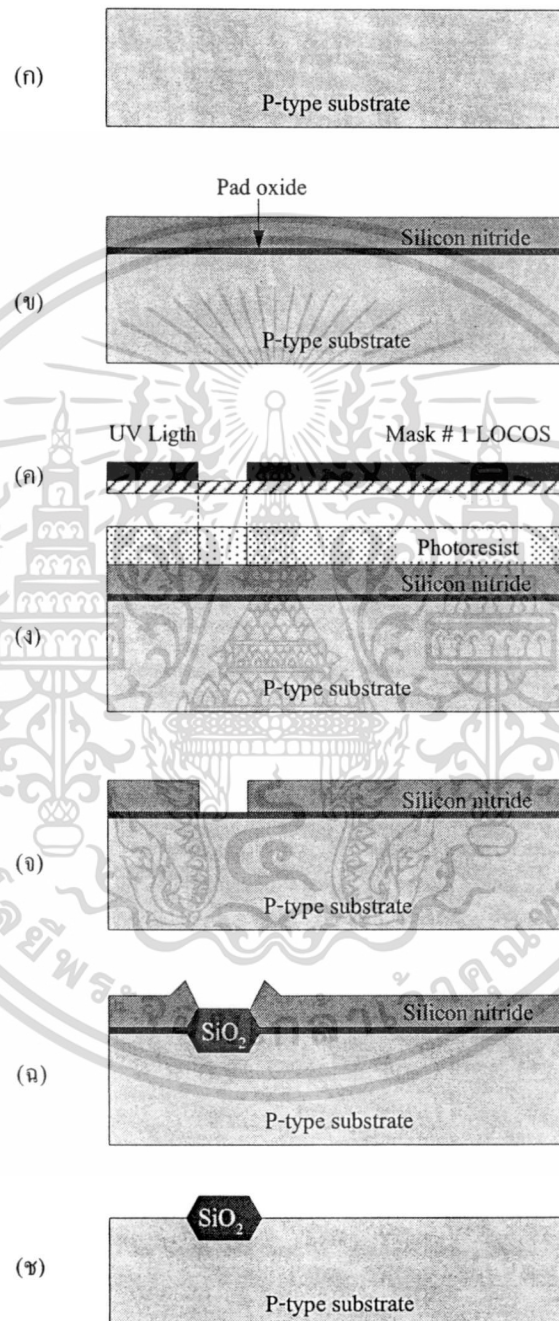
##### 4.7.2.1 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่ (LOCOS Oxide)

ขั้นตอนกระบวนการผลิตแรกสำหรับการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ คือขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่ (Local oxidation of silicon: LOCOS) ขึ้นล้อมรอบขั้วอิมิตเตอร์เพื่อทำหน้าที่เป็นผนังป้องกันการรั่วไหลของกระแสพาหะออกทางด้านข้างของอิมิตเตอร์ และบังคับให้พาหะไหลได้เฉพาะบริเวณที่เป็นช่องเปิดนั้น สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆ ได้ดังนี้

1. เริ่มต้นจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ 100 ความต้านทานแผ่น 20 - 30 โอห์ม/ซม. ทำความสะอาดผิวหน้าเพื่อเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนและออกไซด์ต่างๆ ออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ดังรูปที่ 4.17(ก)
2. จากนั้นเป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 15 nm ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation) และสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์จากกระบวนการ CVD ( Chemical Vapor Deposition) ที่ความหนา 150 nm ดังรูปที่ 4.17(ข)
3. ใช้กระบวนการสร้างลวดลาย (Photolithography) ของมาสก์ที่ 1 เพื่อสำหรับการสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS oxide) ดังรูปที่ 4.17(ง) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ 1. เคลือบน้ำยาไวแสง 2. ทำการฉายแสงด้วยแสง UV (UV Exposure) โดยผ่านทางกระจกต้นแบบ (Mask#1 LOCOS) ดังรูปที่ 4.17(ค) และ 3. ล้างน้ำยาไวแสง (Develop) ได้ลวดลายสำหรับการสร้างชั้นออกไซด์หนาต่อไป
4. กระบวนการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ (Nitride etch) ด้วยกระบวนการ Dry Etching และล้างน้ำยาไวแสงแสดงดังรูปที่ 4.17(จ)
5. กระบวนการปลูกชั้นออกไซด์หนา LOCOS ออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก (wet oxidation) ได้เป็นชั้นออกไซด์ที่มีความหนา 650 nm เพื่อใช้เป็นผนังป้องกันการเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 กระจ่างใส  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กระบวนการกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์และซิลิคอนไดออกไซด์บางๆที่ปกคลุมผิวของแผ่นซิลิคอนออกไป ด้วยการกัดโดยสารละลาย HF 5 % ซึ่งได้เป็นชั้น LOCOS ออกไซด์เหลืออยู่ ดังรูปที่ 4.17(ซ)

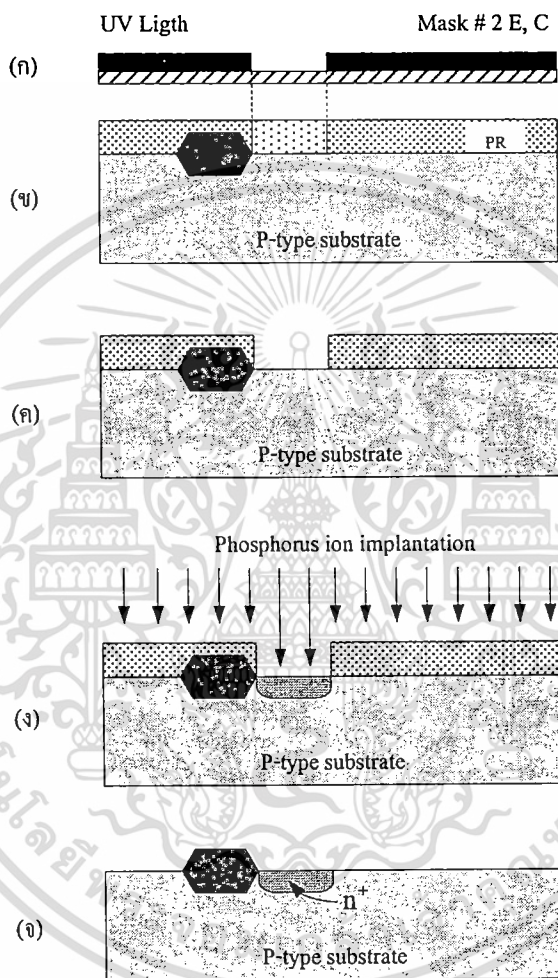


รูปที่ 4.17 (ก) – (ซ) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น LOCOS ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์ (Emitter and Collector information)

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างขั้วอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์ จากกระบวนการยิงฝิงประจุด้วยฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้เป็นสารชนิดเอ็นแบบเข้มข้น โดยขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.18 (ก) – (จ) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนก่อนกระบวนการสร้างลวดลายสำหรับการสร้างขั้วอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทำการเปิดช่องสำหรับการยิงฝิงประจุเพื่อให้ได้เป็นอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์ โดยใช้กระจกโฟโตมาสก์สอง (Mask # 2 E, C) ดังแสดงในรูปที่

4.18(ก) และ 4.18(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

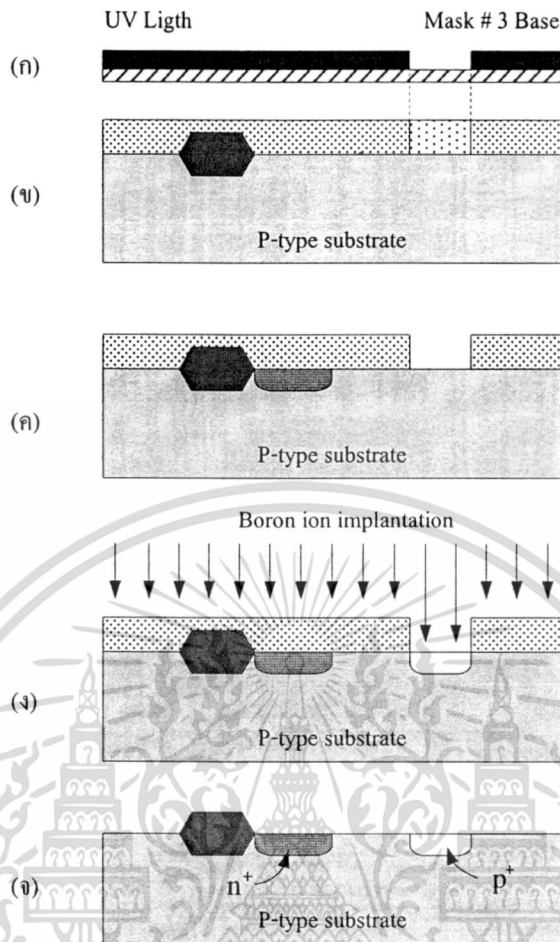
3. กระบวนการ Develop เกิดเป็นช่องเปิดสำหรับการยิงฝังประจุ ดังรูปที่ 4.18(ค)
4. กระบวนการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ  $1e16$  อะตอม/ลบ. ซม. ได้เป็นขั้วอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์ที่แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบเข้มข้น( $n^+$ ) ที่ความลึกของรอยต่อประมาณ 1 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.18(ง)
5. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสงและกระบวนการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 15 นาที ได้เป็นอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์ดังรูปที่ 4.19(จ)

#### 4.7.2.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้างเบส (Base information)

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างเบส จากกระบวนการยิงฝังประจุด้วย โบรอนเพื่อให้ได้เป็นสารชนิดพีแบบเข้มข้น โดยขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการ โฟโวลติโทกราฟีเพื่อเปิดช่องสำหรับการยิงฝังประจุโบรอน โดยกระจกต้นแบบมาสก์สาม (Mask # 3 Base) เพื่อสร้างลวดลายเบสให้ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 4.19(ก) และ 4.19(ข)
2. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสงได้เป็นช่องเปิดสำหรับการยิงฝังประจุโบรอน ดังรูปที่ 4.19(ค)
3. กระบวนการยิงฝังประจุ (Implantation) ด้วยโบรอนความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ  $3e15$  อะตอม/ลบ. ซม. ซึ่งได้ขั้วเบสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีแบบเข้มข้น( $p^+$ ) ที่ความลึกของรอยต่ออยู่ที่ประมาณ  $1\text{ }\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 4.19(ง)
4. การลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลืออยู่ทิ้งไปด้วยสารละลาย Piranha และกระบวนการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 15 นาที ได้เป็นเบสซึ่งเป็นสารชนิดพี ดังรูปที่ 4.19(จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 (ก) – (จ) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วเบส

#### 4.7.2.4 ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ (Contact information)

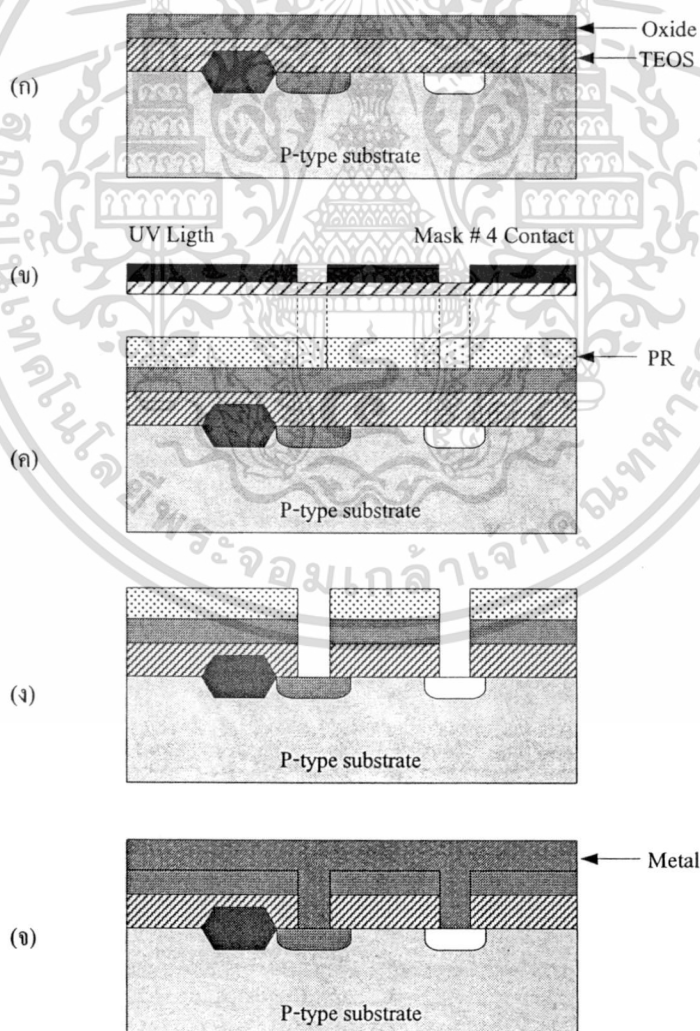
ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์คือ การสร้างขั้วโลหะ สำหรับใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการสร้างชั้นฟิล์ม TEOS ด้วยกระบวนการ LPCVD ได้ความหนา 500 nm จากนั้นสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการ PECVD ได้ชั้นออกไซด์ที่มีความหนา 500 nm ดังรูปที่ 4.20(ก)
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อเปิดช่อง สำหรับใช้ในการสร้างขั้วโลหะ โดยใช้มาสก์ตี (Mask # 4 Contact) ซึ่งเป็นลวดลายสำหรับการสร้างขั้วโลหะ ดังรูปที่ 4.20(ข) และ 4.20(ค)

3. กระบวนการ Develop ต่อมาล้างน้ำยาไวแสงส่วนที่ทำปฏิกิริยากับแสงออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แจ้งเรื่องลิขสิทธิ์การเรียงในเอกสารนี้เพื่อแจ้งให้ทราบถึงผู้จัดทำเอกสารฉบับนี้เป็นการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

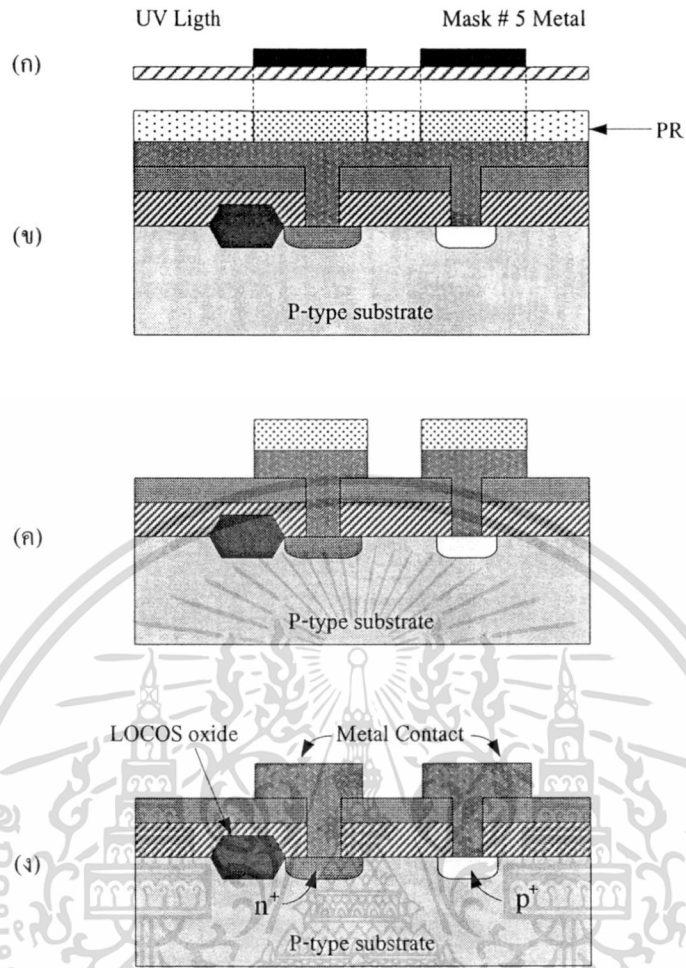
4. กระบวนการกัดชั้นฟิล์ม TEOS และ PEOXIDE ด้วยกระบวนการ Dry Etching ได้ช่องเปิดดังแสดงในรูปที่ 4.20(ง)
5. ลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออกไป
6. กระบวนการสร้างชั้นโลหะ Metal ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ได้ความหนาชั้นโลหะ 1000 nm ดังรูปที่ 4.20(จ)
7. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์ห้า (Mask # 5 Metal) ดังรูปที่ 4.21(ก) และ 4.21(ข)
8. กระบวนการ Develop ล้างน้ำยาไวแสงส่วนที่ทำปฏิกิริยากับแสงออกไป
9. กระบวนการกัดชั้นโลหะ (Metal Etching) ส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ดังรูปที่ 4.21(ค)
10. การลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือ โดยอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.21(ง)



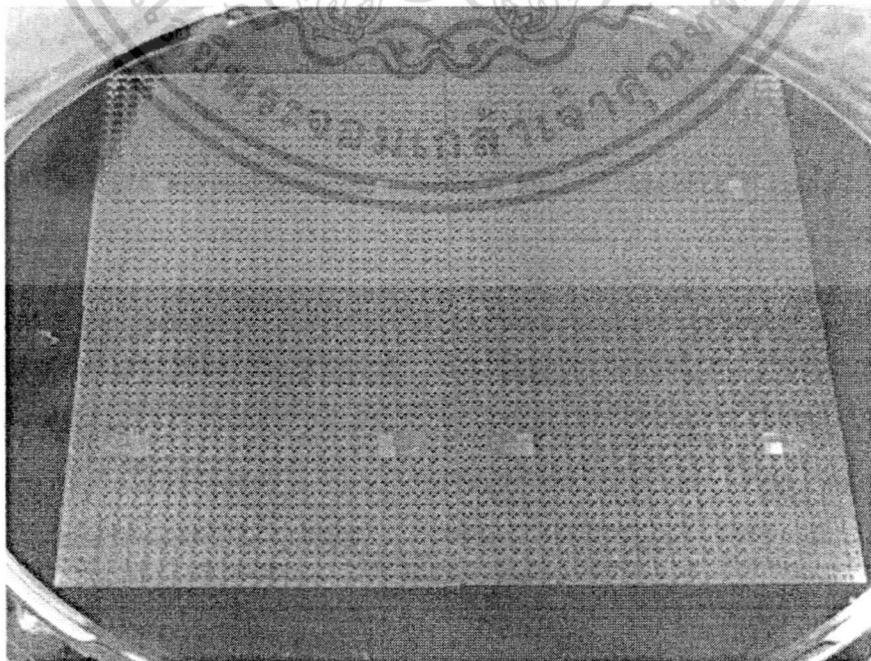
รูปที่ 4.20 ก-จ แสดงขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่ฝ่าฝืนจะถูกลงโทษตามกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



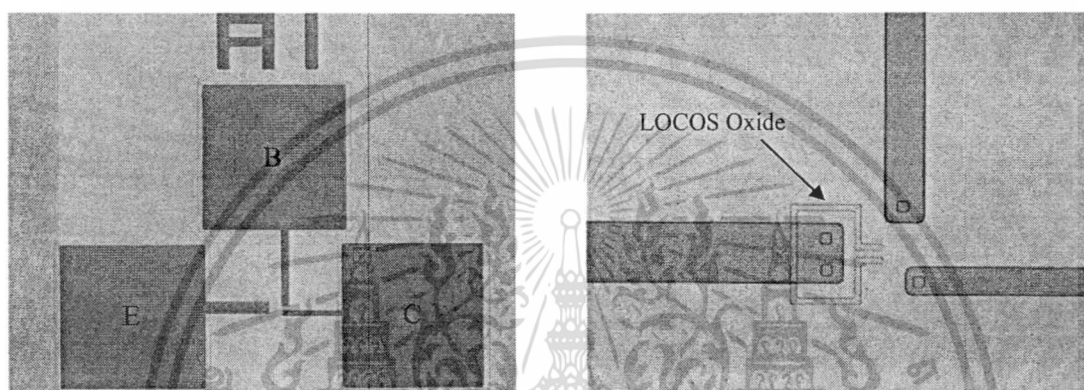
รูปที่ 4.21 ก - ง แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 4.22** แสดงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่นที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว

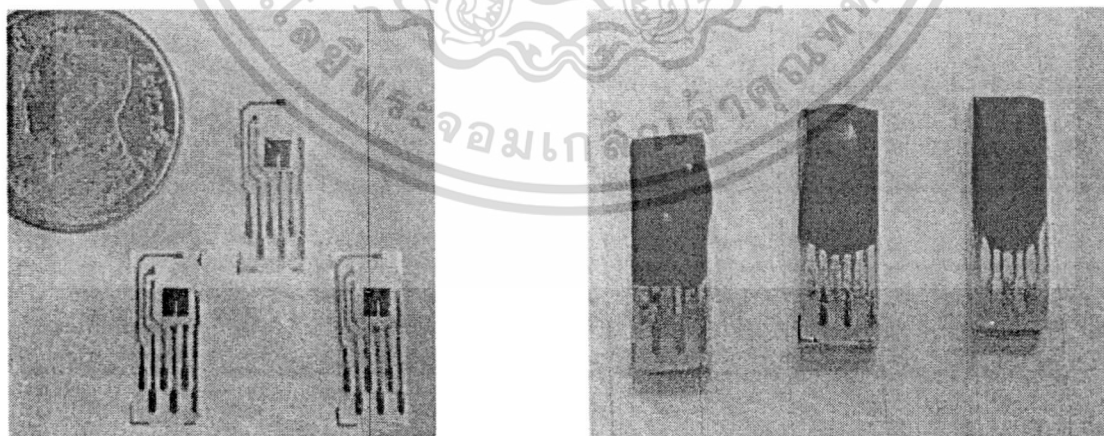
รูปที่ 4.22 แสดงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วภายในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่น ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ 3600 ตัว ขณะที่ในรูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ กำลังขยาย 40 และ 400 เท่า เพื่อแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ และรูปที่ 4.24 แสดง การเชื่อมลวดโลหะสำหรับต่อใช้งาน และการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) โดยการเคลือบอุปกรณ์ด้วย เรซินเพื่อความสวยงามและป้องกันผลกระทบต่างๆจากสิ่งแวดล้อม ก่อนการนำไปใช้งาน



(ก).ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 40 เท่า

(ข).ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 400 เท่า

**รูปที่ 4.23** แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก).ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ (ข). ที่กำลังขยาย 400 เท่า



(ก). การเชื่อมโลหะใช้งาน

(ข). การเคลือบอุปกรณ์ด้วยเรซิน

**รูปที่ 4.24** (ก).การเชื่อมต่อโลหะสำหรับต่อใช้งานกับอุปกรณ์ภายนอก และ (ข).การบรรจุภัณฑ์โดยเคลือบอุปกรณ์ด้วยเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

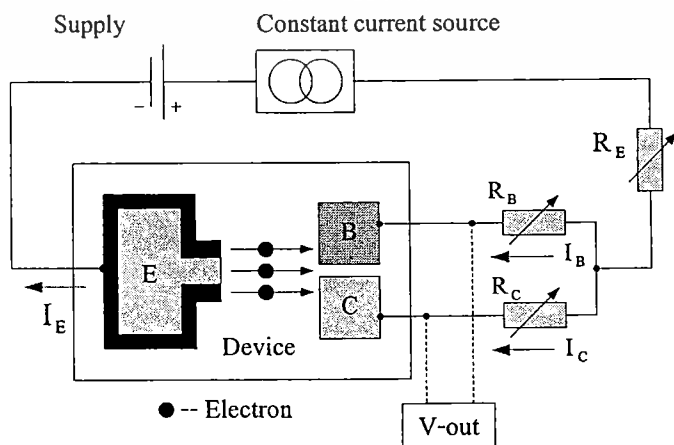
### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดผลและผลการทดลอง การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของ อุปกรณ์และคุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆ รวมถึงจะเปรียบเทียบให้เห็นผลการตอบสนองต่อ สนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดที่มีชั้นผนังออกไซด์กับชนิดที่ไม่มีผนังออกไซด์ เพื่อ แสดงให้เห็นการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองแบบ

#### 5.1 วงจรวัดผลการทดลอง (Sensor interface circuit)

ในการวัดผลการทดลองหรือการวัดการตอบสนองของอุปกรณ์ต่อสิ่งแวดล้อมที่ทำการวัด นั้น จำเป็นต้องมีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกมาต่อร่วมกับอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถวัดผลการ เปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน, กระแสไฟฟ้า หรือ ความต้านทาน เป็นต้น

ในการทดลองนี้วิธีการของการวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะมีการนำอุปกรณ์ ภายนอกมาต่อร่วมด้วยดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นการต่ออุปกรณ์เซ็นเซอร์เข้ากับวงจรวัดผล สำหรับแมกนี โตทรานซิสเตอร์ โครงสร้างแบบ NPN โดยประกอบด้วย อุปกรณ์เซ็นเซอร์, แหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งทำ หน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงให้แก่อุปกรณ์ทั้งหมด, วงจรปรับกระแสคงที่ ทำหน้าที่ในการรักษาระดับกระแสที่ ไหลให้คงที่ตลอดการวัดผล, ความต้านทาน  $R_E$  ทำหน้าที่ในการปรับปริมาณกระแสไบอัส หรือ กระแสอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ), ความต้านทาน  $R_B$  และ  $R_C$  ทำหน้าที่ในการปรับกระแสเบส ( $I_B$ ) และกระแส คอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ตามลำดับ เพื่อปรับค่า Offset ระหว่างขาเบสกับคอลเลคเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองนี้ อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในเบส (Minority carrier) คือพาหะหลักที่มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก โดยจะถูกฉีด (Injection) จากอิมิตเตอร์ผ่านไปยังเบสกับคอลเลกเตอร์ เกิดเป็นกระแสเบส ( $I_B$ ) และกระแสคอลเลกเตอร์ ( $I_C$ ) ตามลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์นี้ได้จากสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$I_E = I_B + I_C$$

การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ จะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันเอาต์พุตหรือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเบสกับขาคอลเลกเตอร์ ( $V_{BC}$  หรือ  $V_{BC}$ ) โดยในสภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก ( $B = 0$ ) กระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์จะมีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุต ( $V_{BC}$ ) ที่วัดได้มีค่าคงที่ แต่เมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ ( $B \neq 0$ ) จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้กระแสเบสกับอิมิตเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ( $\Delta I_B \neq 0$  และ  $\Delta I_C \neq 0$ ) ซึ่งเมื่อวัดแรงดันเอาต์พุตระหว่างขาเบสกับคอลเลกเตอร์ จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ได้ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 3.9 ดังนี้

$$\Delta V_{BC} = \Delta I_B \cdot R_B - \Delta I_C \cdot R_C$$

จากสมการข้างต้นเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) ของอุปกรณ์ได้จากสมการที่ 3.8 ดังนี้

$$S_A = \frac{\Delta V_{BC}}{\Delta B_z}$$

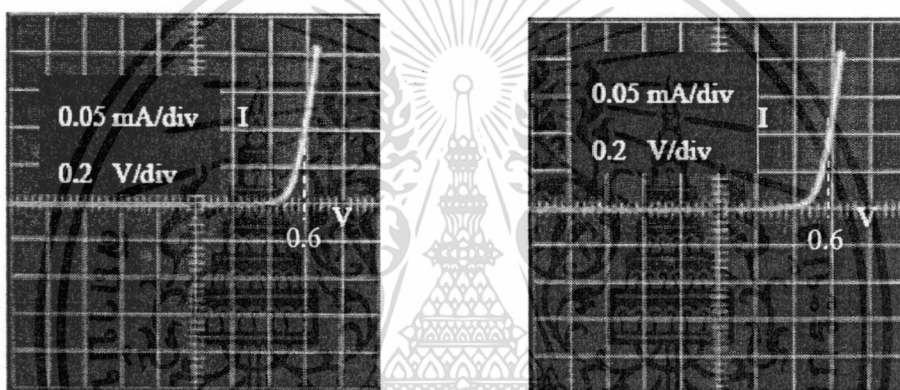
โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ทั้งหมด จะพิจารณาจากค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งคำนวณได้จากแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จ่ายให้อุปกรณ์ ก่อนจะนำมาวิเคราะห์ผลในด้านต่างๆ ของอุปกรณ์ ซึ่งจะได้อีกกล่าวในส่วนของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลต่อไป

## 5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล (Measurement and Discussion)

### 5.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้า

#### ■ คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)

การวัดคุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็น ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นการวัดคุณสมบัติพื้นฐาน เพื่อแสดงให้เห็นความเป็นรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ ดังในรูปที่ 5.2(ก) และ 5.2(ข) เป็นกราฟของ กระแสกับแรงดันของรอยต่อพี-เอ็นระหว่างเบสกับคอลเลกเตอร์ และเบสกับอิมิตเตอร์ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์เป็นซิลิคอน จะเห็นว่าจากทั้งสองกราฟต้องใช้แรงดันไบอัส เท่ากับ 0.6 โวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นความสมบูรณ์ของรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์

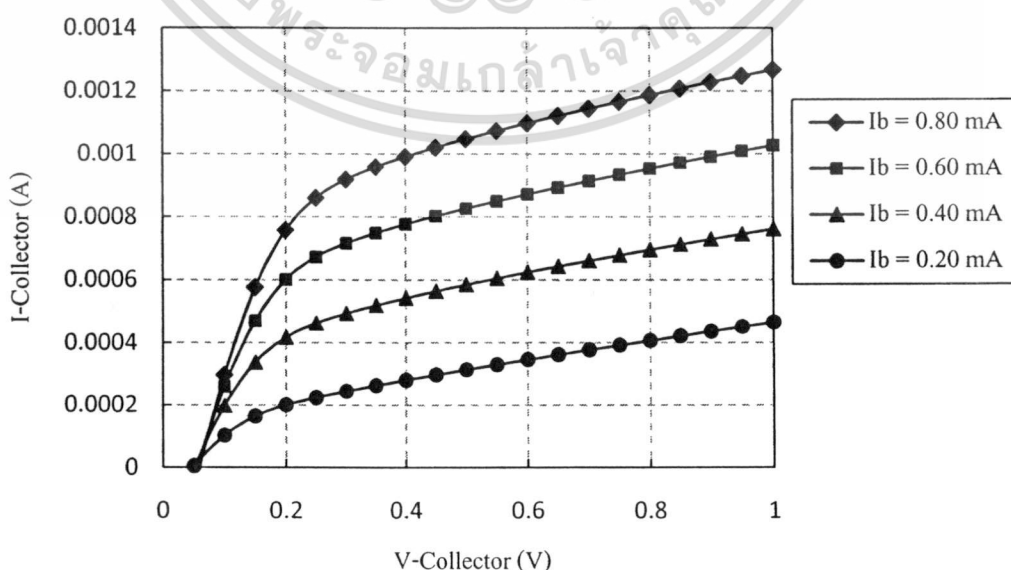


(ก). รอยต่อ B-C

(ข). รอยต่อ B-E

รูปที่ 5.2 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

(ก). รอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์ และ (ค). รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันคอลเลกเตอร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve)

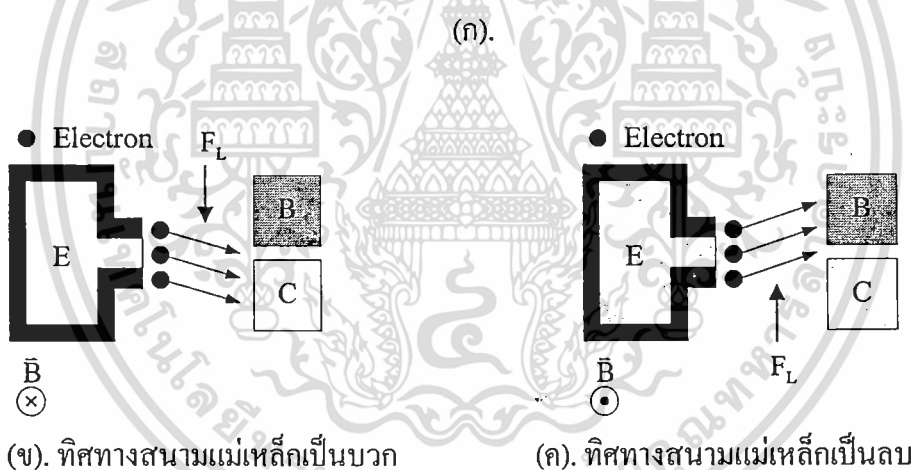
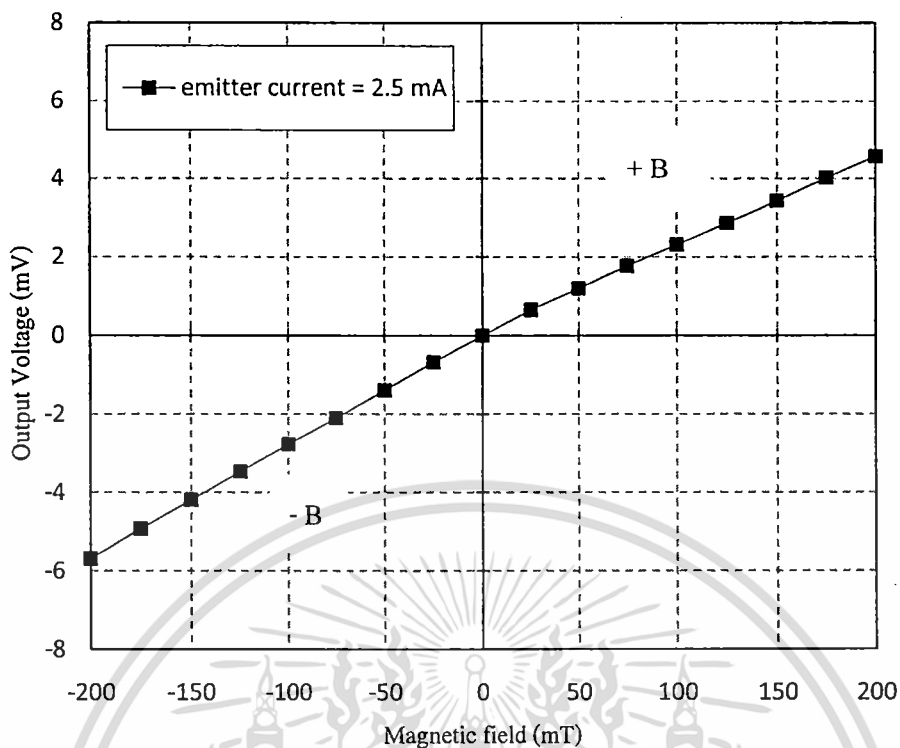
รูปที่ 5.3 เป็นกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยวัดที่กระแสเบส 0.20, 0.40, 0.60 และ 0.80 mA จากกราฟจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสกับแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายกับการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ วงจรอิมิตเตอร์ร่วม แต่เนื่องจากขนาดของเบสที่กว้างกว่าทรานซิสเตอร์แบบปกติ ทำให้กระแสเบส ในย่านแอคทีฟของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ไม่คงที่เหมือนกับกรณีของทรานซิสเตอร์

### 5.2.2 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง (Vertical magnetic field response)

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ อาศัยกลไก จากหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะ (อิเล็กตรอน) ซึ่งเคลื่อนที่ ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะ ไปจากแนวเดิม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับคอลเลคเตอร์ โดยสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น นี้ได้จากค่าแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมระหว่างขาทั้งสอง

รูปที่ 5.4(ก) เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_{bc}$ ) ต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน ในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ระหว่าง -200 ถึง 200 mT โดยใช้กระแสเบส  $I_E = 2.5$  mA ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตัด ผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยในลักษณะเชิง เส้น โดยผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ 1. ช่วงที่ทิศทาง ของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นบวก (+B) และ 2. ช่วงที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นลบ (-B) ซึ่ง การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันเอาต์พุตจากทั้งสองช่วงนั้นจะเป็นไปตามสมการที่ 3.9 คือ เช่นช่วงที่ 1 เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กในทิศทางบวกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะ มีค่าเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นการเบี่ยงเบนของพาหะจะเกิดได้มากยิ่งขึ้น กระแสอิเล็กตรอนจะไหลเข้าไป ยังขั้วคอลเลคเตอร์เพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 5.4(ข) ทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเบสกับคอลเลคเตอร์ มีค่าเพิ่มขึ้น (บวกมากขึ้น) สำหรับกรณีของช่วงที่ 2 จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นเดียวกัน แต่ แตกต่างกันที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ ดังนั้นการเบี่ยงเบนของพาหะจะมีทิศทางชี้ขึ้นบนซึ่ง ตรงกันข้ามกับกรณีแรก ทำให้กระแสอิเล็กตรอนไหลเข้าไปยังขั้วเบสเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 5.4(ค) ทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเบสกับคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น (ลบมากขึ้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



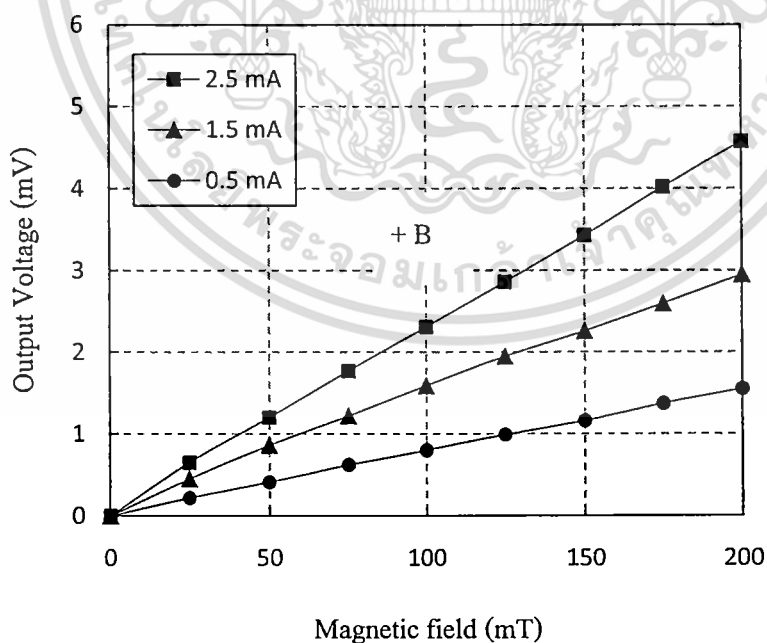
รูปที่ 5.4 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก). กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันฮอลล์ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง -200 ถึง 200 mT (ข). เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก (+B) และ (ค). เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ (-B)

สำหรับค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8 หรือก็คือค่าความชัน(Slope) ของเส้นกราฟ โดยจากกราฟในรูปที่ 5.4(ก) ช่วงที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 22.65 mV/T ในขณะที่เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 27.35 mV/T เราจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าค่าความไวในการตอบสนองของทิศทางบวกกับลบมีค่าไม่เท่ากัน โดยช่วงที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบจะมีความไวในการตอบสนองที่สูงกว่า สาเหตุนี้จะได้อธิบายในหัวข้อ 5.2.4 ต่อไป

### 5.2.3 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกัน

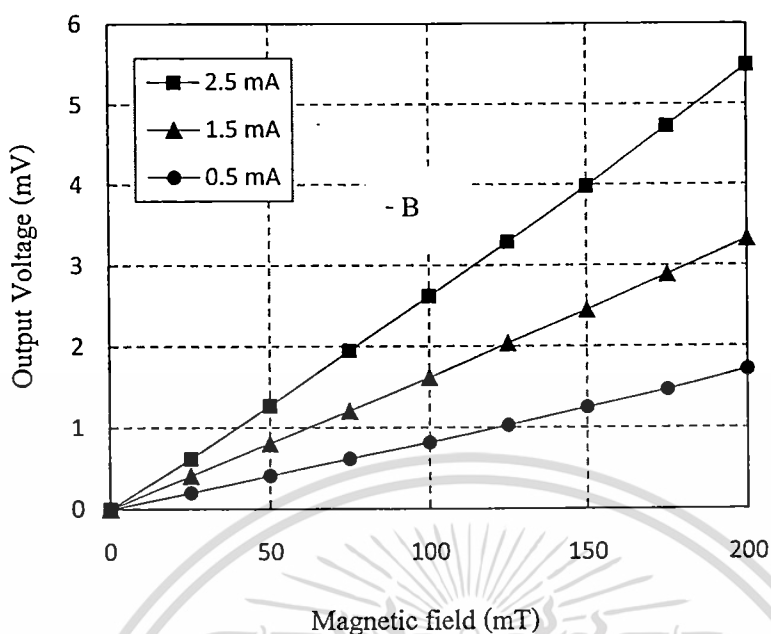
กราฟรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 เป็นกราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวกกับลบตามลำดับ โดยอุปกรณ์ที่ใช้มีระยะเบี่ยงเบนพาหะ (L) เท่ากับ  $20 \mu\text{m}$  และความกว้างของอิมิตเตอร์ (W) เท่ากับ  $4 \mu\text{m}$  จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง  $-200$  ถึง  $200 \text{ mT}$  โดยกราฟในรูปที่ 5.5 เมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก จะได้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 7.68, 14.52 และ  $22.65 \text{ mV/T}$  ที่กระแสอิมิตเตอร์ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA ตามลำดับ ขณะที่กราฟในรูปที่ 5.6 เมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ จะได้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 8.82, 16.73 และ  $27.35 \text{ mV/T}$  ที่กระแสอิมิตเตอร์ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสอิมิตเตอร์หรือกระแสไบอัส จะทำให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มีค่า



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่กระแส

อิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่กระแส อิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ

เพิ่มขึ้น ทั้งทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกและลบ เนื่องมาจากการเพิ่มกระแสไบอัสให้แก่ อุปกรณ์นั้น จะมีผลให้ความหนาแน่นของกระแสพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อกระแสพาหะมีเพิ่ม มากขึ้นจะทำให้กระแสกับกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย สัดส่วนของการเบี่ยงเบนของ กระแสพาหะจะเพิ่มขึ้นตามลำดับส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สนามแม่เหล็กที่ตัด ผ่านอุปกรณ์ยังคงเท่าเดิม ดังนั้นจะได้ว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะมีค่า เพิ่มขึ้น เมื่อให้กระแสอิมิตเตอร์เพิ่มขึ้น โดยสามารถสรุปค่าความไวในการตอบสนองต่อสนาม-แม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA ได้ดังตารางที่ 5.1[10]- [14]

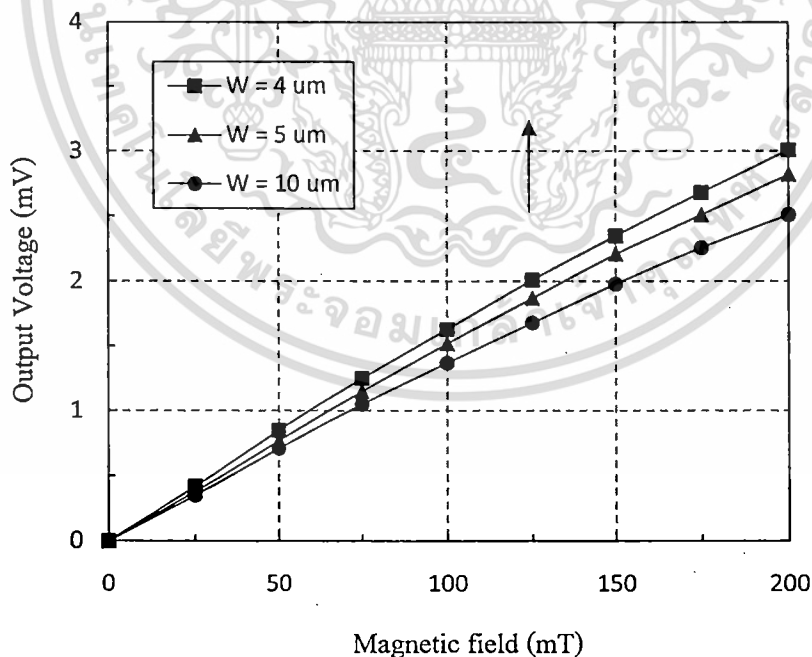
ตารางที่ 5.1 ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกัน

Emitter current (mA)	Sensitivity (mV/T)	
	+B	-B
0.5	7.68	8.82
1.5	14.52	16.73
2.5	22.65	27.35

#### 5.2.4 ระเบียบเบนพาหะและความกว้างของอิมิตเตอร์ต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์

ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน โดยในหัวข้อนี้เป็นการแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงระเบียบเบนพาหะ (Deflection Length:  $L$ ) และความกว้างของอิมิตเตอร์ (Emitter Width:  $W$ ) ต่อการเปลี่ยนค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

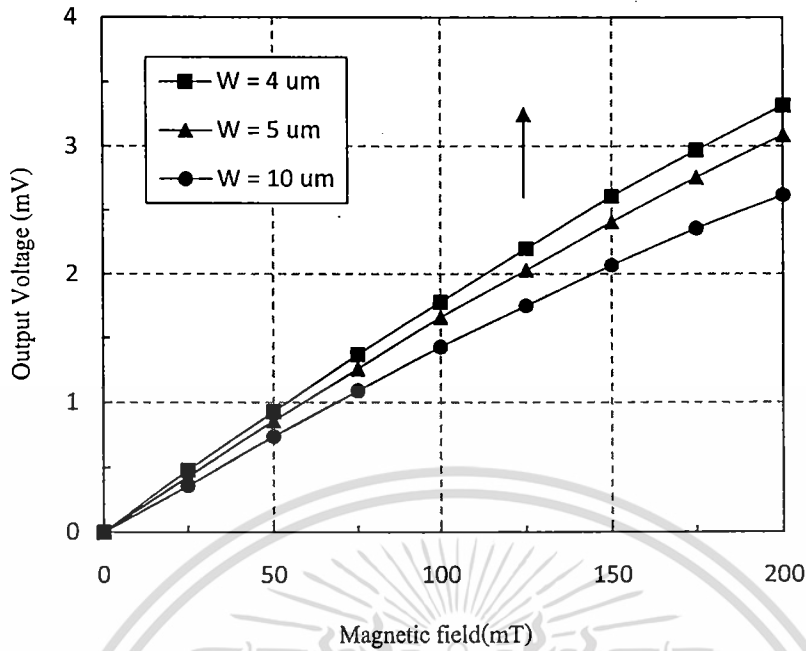
กราฟรูปที่ 5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง 0 – 200 mT เมื่อให้ไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์เท่ากับ 2.0 mA และอุปกรณ์มีระเบียบเบนพาหะเท่ากับ 10  $\mu\text{m}$  โดยแสดงให้เห็นผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 4, 5 และ 10  $\mu\text{m}$  ซึ่งมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 15.04, 14.16 และ 12.58 mV/T ตามลำดับ จากกราฟพบว่าค่าความไวในการตอบสนองจะลดลงเมื่อความกว้างของอิมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จากการทดลองค่าความไวในการตอบสนองมีค่าสูงสุดเท่ากับ 15.04 mV/T ที่ความกว้างของอิมิตเตอร์เท่ากับ 4  $\mu\text{m}$



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกัน

เมื่ออุปกรณ์มีระเบียบเบนพาหะเท่ากับ 10  $\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกัน เมื่ออุปกรณ์มีระยะเบี่ยงเบนพาหะเท่ากับ 20  $\mu\text{m}$

ตารางที่ 5.2 แสดงความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่พารามิเตอร์ค่าต่างๆ

Injection Length W ( $\mu\text{m}$ )	Sensitivity (mV/T)	
	L = 10 $\mu\text{m}$	L = 20 $\mu\text{m}$
4	15.04	16.73
5	14.16	15.52
10	12.58	13.15

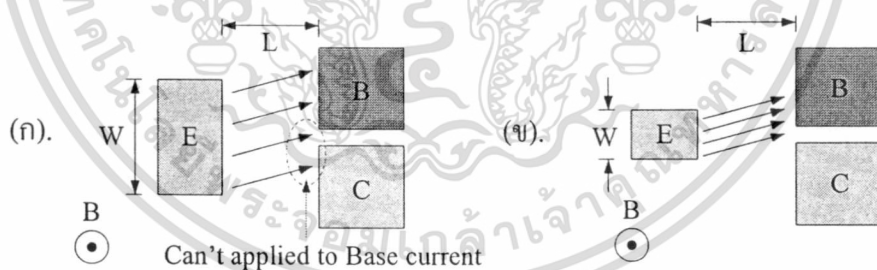
กราฟรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะเท่ากับ 20  $\mu\text{m}$  และความกว้างของอิมิตเตอร์มีค่าแตกต่างกันคือ 4, 5 และ 10  $\mu\text{m}$  โดยให้ไบแอสที่กระแสอิมิตเตอร์เท่ากับ 2.0 mA ซึ่งจากผลการทดลองที่ความกว้างของอิมิตเตอร์มีค่าเท่ากับ 4, 5 และ 10  $\mu\text{m}$  จะได้ค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 16.73, 15.52 และ 13.15 mV/T ตามลำดับ จากกราฟพบว่าค่าความไวในการตอบสนองจะลดลงเมื่อความกว้างของอิมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความไวในการตอบสนองมีค่าสูงสุดเท่ากับ 16.73 mV/T เมื่อความกว้างของอิมิตเตอร์เท่ากับ 4  $\mu\text{m}$  เช่นเดียวกันกับผลการทดลองดังกราฟที่ 5.7 โดยสามารถสรุปผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะเท่ากับ 10 และ 20  $\mu\text{m}$  ต่อความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูไปทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

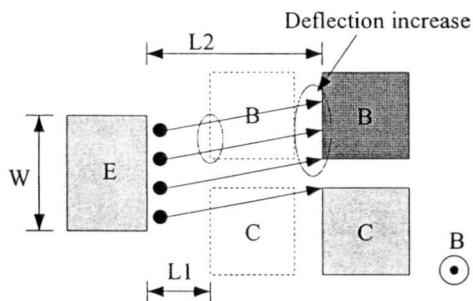
จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 5.7, 5.8 และตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์จะขึ้นอยู่กับทั้งระยะเบี่ยงเบนพาหะ และความกว้างของอิมิตเตอร์ โดยเมื่อพิจารณาที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะค่าเท่ากันนั้น ค่าความไวในการตอบสนองจะลดลงเมื่อความกว้างของอิมิตเตอร์ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่เมื่อพิจารณาที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าเท่ากัน ความไวในการตอบสนองจะเพิ่มขึ้นตามระยะเบี่ยงเบนพาหะที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก

จากรูปที่ 5.9 โดยในกรณีที่ความกว้างของอิมิตเตอร์มีค่ากว้าง ดังรูปที่ 5.9(ก) พาหะที่เบี่ยงเบนจะอิมิตเตอร์ส่วนหนึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนจากกระแสคอลเลคเตอร์ไปเป็นกระแสเบสได้ ทำให้ผลการตอบสนองเกิดได้ไม่เต็มที่ ในทางกลับกันเมื่อความกว้างของอิมิตเตอร์แคบลงดังรูปที่ 5.9(ข) พาหะที่เบี่ยงเบนจะสามารถเปลี่ยนจากกระแสคอลเลคเตอร์ไปเป็นกระแสเบสได้มากกว่า ทำให้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่ามากกว่ากรณีที่ความกว้างของอิมิตเตอร์มีค่ากว้าง [13]

พิจารณากรณีที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าเท่ากัน แต่มีระยะเบี่ยงเบนพาหะแตกต่างกันดังในรูปที่ 5.10 คือที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะ L1 การเบี่ยงเบนพาหะที่เกิดขึ้น ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์สามารถเปลี่ยนไปเป็นกระแสเบสได้ส่วนหนึ่ง แต่เมื่อระยะเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้น (L2) ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์สามารถเปลี่ยนเป็นกระแสเบสได้มากขึ้น ส่งผลให้ความไวในการตอบสนองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะมีข้อจำกัดอยู่ที่ระยะการแพร่ของพาหะในเบสด้วย แต่ไม่ขอกล่าวถึงในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลของความกว้างของอิมิตเตอร์ต่อการเบี่ยงเบนของพาหะที่ระยะเบี่ยงเบนที่เท่ากัน (ก).ความกว้างของอิมิตเตอร์แบบกว้าง และ (ข).ความกว้างของอิมิตเตอร์แบบแคบ



รูปที่ 5.10 ผลของระยะเบี่ยงเบนต่อการเบี่ยงเบนของพาหะที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าเท่ากัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประยุกต์ใช้ในการค้า

### 5.2.5 ความไม่สมมาตรของโครงสร้าง

จากผลการทดลอง ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในหัวข้อที่ผ่านมา จะสังเกตเห็นว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ ในกรณีของสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก (+B) กับทิศทางเป็นลบ (-B) จะไม่เท่ากัน โดยกรณีสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบจะมีความไวในการตอบสนองที่มากกว่า เนื่องจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างซึ่งสามารถพิจารณาได้จากกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

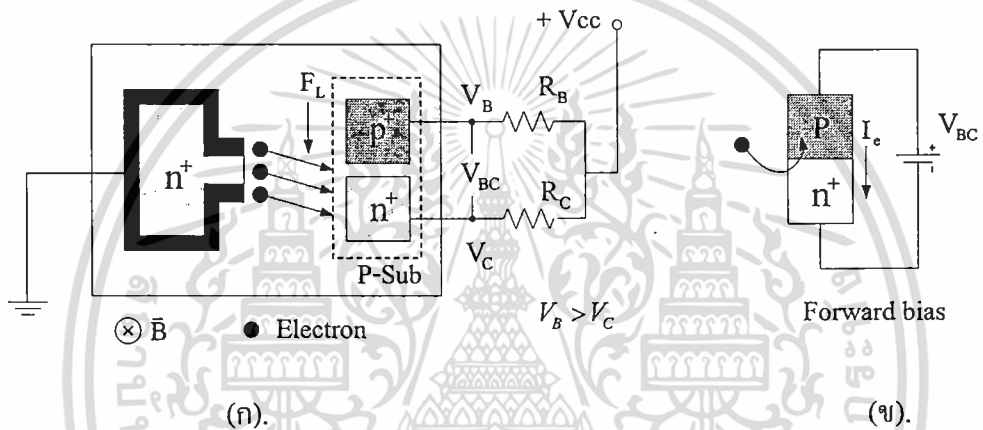
ในสถานะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กนั้น จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะทำให้ได้  $V_{BC} = 0$  แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กเป็นบวกตัดผ่าน ดังในรูปที่ 5.11(ก) จะเกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งมีทิศทางชี้ลงทำให้พาหะเบี่ยงเบนไปทางขั้วคอลเลคเตอร์ ส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นและกระแสเบสจะลดลง กระแสคอลเลคเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมาทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_C$  มีมากขึ้น (ตามสมการ  $V = IR$ ) ดังนั้นแรงดัน  $V_C$  จะลดลง ในทางกลับกันกระแสเบสที่ลดลงจะทำให้แรงดัน  $V_B$  มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งกรณีนี้ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าเป็นบวก ( $V_B > V_C$  และ  $V_{BC} > 0$ ) จากสาเหตุที่เกิดขึ้นนี้ เมื่อพิจารณาที่รอยต่อ พี-เอ็น ระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ จะพบว่า มีลักษณะเป็นการไบอัสตรง (Forward bias) ดังรูปที่ 5.11(ข) ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากคอลเลคเตอร์กลับไปยังเบสได้ ส่งผลให้พาหะที่เกิดการเบี่ยงเบนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ได้ทั้งหมด โดยพาหะส่วนหนึ่งจะไหลกลับเข้าไปยังเบส ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ลดลงขณะที่กระแสเบสจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจะไม่มากเท่าที่ควร ทำให้ความไวในการตอบสนองมีค่าน้อย แต่เนื่องจากว่าแรงดัน  $V_{BC}$  ที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไบอัสตรงของไดโอดชนิดซิลิคอนปกติ ( $V_{bi} = 0.65-0.7$  V) ดังนั้นพาหะที่ไหลย้อนกลับไปยังเบสจะมีค่าน้อย แต่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 5.13

ส่วนในกรณีที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ ดังรูปที่ 5.12(ก) ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะตรงกันข้ามกับกรณีแรก คือ ทิศทางของแรงลอเรนซ์จะมีทิศชี้ขึ้น ดังนั้นพาหะจะเบี่ยงเบนไปทางขั้วเบส ทำให้กระแสเบสมากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ ส่งผลให้แรงดัน  $V_B$  มีค่าลดลง ในขณะที่แรงดัน  $V_C$  มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีแรก ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จะมีค่าเป็นลบ ( $V_{BC} < 0$ ) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่รอยต่อ พี-เอ็น ระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ ดังรูปที่ 5.12(ข) จะมีลักษณะเป็นการไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) กรณีนี้จะไม่เกิดการไหลของอิเล็กตรอนข้าม

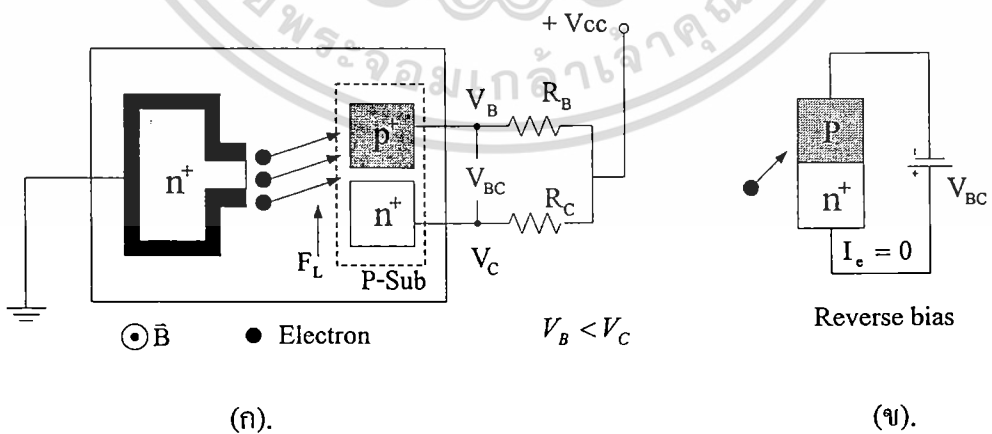
รอยต่อดังเช่นในกรณีแรก ทำให้พาหะจากการเบี่ยงเบนสามารถไหลเข้าไปยังขั้วเบสได้เต็มที่ ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในกรณีทิศทางของแม่เหล็กเป็นลบมีค่ามากกว่าทิศทางแม่เหล็กที่เป็นบวก

และอีกเหตุผลหนึ่งคือ เนื่องจากว่าขั้วเบส ( $p^+$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับกับฐานรอง ( $p$ -Substrate) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงใดๆที่เกิดขึ้นเช่น อุณหภูมิ, ความดัน, แสง หรือมุมของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน สามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลในเบสได้ทั้งสิ้น ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบส ทำให้มีผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ด้วยเช่นกัน

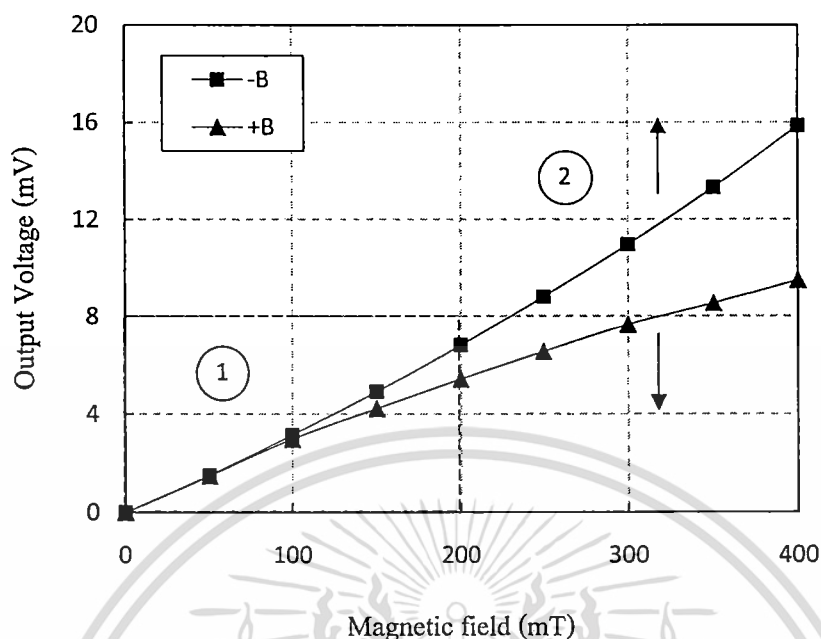


รูปที่ 5.11 (ก).การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านมีทิศทางเป็นบวก(+B) และ (ข).การไบอัสตรงของรอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์



รูปที่ 5.12 (ก).การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านมีทิศทางเป็นลบ(-B) และ (ข).การไบอัสย้อนกลับของรอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



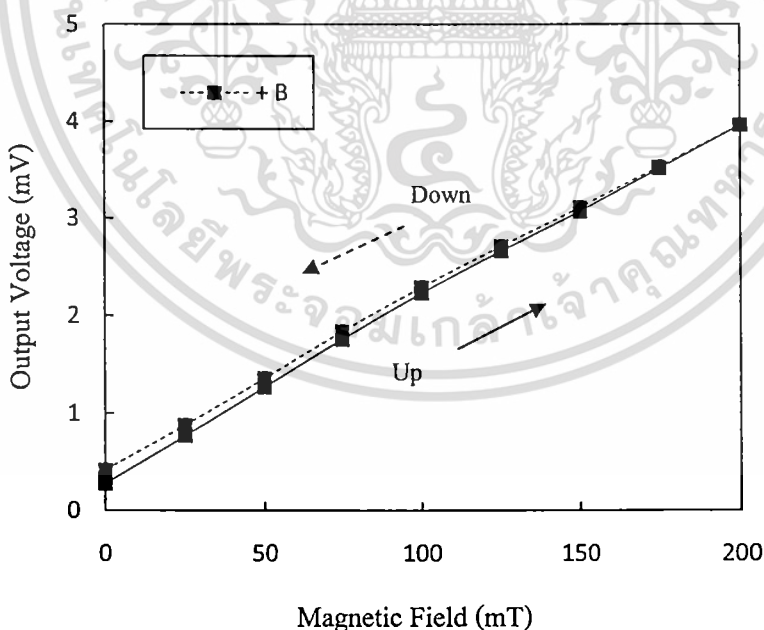
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกกับทิศทางเป็นลบ

กราฟรูปที่ 5.13 เป็นกราฟเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกกับทิศทางเป็นลบ โดยทำการทดลองที่กระแสไบอัส 2.5 mA และเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง 0 ถึง 400 mT จากผลการทดลองแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตในกรณีสนามแม่เหล็กมีทิศเป็นบวกกับเป็นลบมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งในช่วงที่ 1 วัดที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง 0 ถึง 200 mT ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะไม่มากนัก แต่เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กความเข้มมากขึ้นจะทำให้เกิดความแตกต่างนี้ได้มากยิ่งขึ้นเนื่องมาจากแรงดัน  $V_{BC}$  ที่ตกคร่อมขาเบสกับคอลเลกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงดันไบอัสตรงที่รอยต่อ B-C เพิ่มขึ้นด้วย เกิดการไหลของอิเล็กตรอนย้อนกลับจากคอลเลกเตอร์ไปยังเบสได้มากตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าความไวในการตอบสนองที่วัดได้มีค่าไม่เท่ากัน โดยเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวกจะวัดค่าความไวในการตอบสนองได้เท่ากับ 22.65 mV/T ขณะที่เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศเป็นลบวัดค่าความไวในการตอบสนองได้เท่ากับ 27.35 mV/T

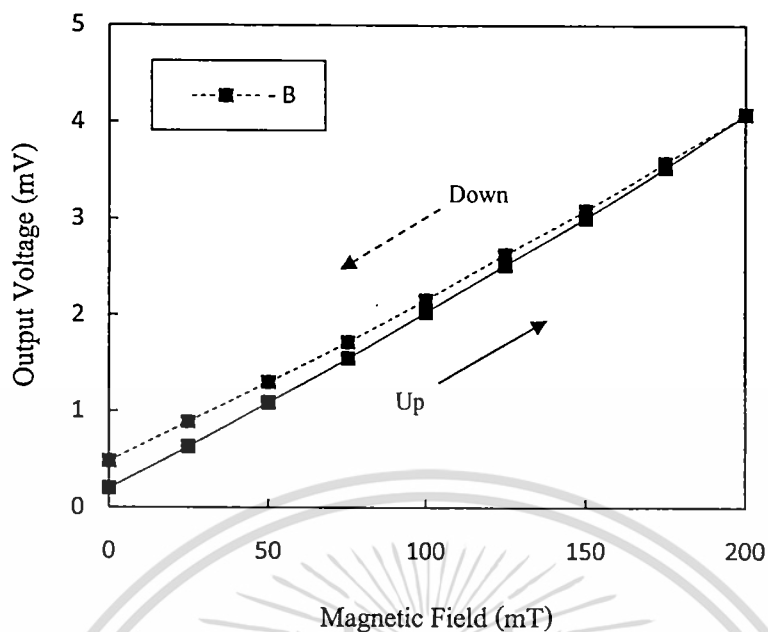
### 5.2.6 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

ฮิสเทอรีซิส เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์เฉพาะจุดของสัญญาณอินพุต เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการเพิ่มสัญญาณอินพุตกับการลดสัญญาณอินพุต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยในการทดลองนี้จะแสดงให้เห็นฮิสเทอรีซิสขณะที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกกับลบ

จากรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 แสดงกราฟฮิสเทอรีซิสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ขณะที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกและเป็นลบตามลำดับ เมื่อให้กระแสไบอัสเท่ากับ 2.0 mA จากกราฟเปรียบเทียบให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กขาขึ้น(เส้นทึบ) และขาลง(เส้นประ) ซึ่งจะพบว่าเส้นกราฟที่ได้จะไม่ทับกัน เนื่องจากจากความผิดพลาดของตัวอุปกรณ์เอง โดยจากกราฟรูปที่ 5.14 จะได้ค่าความผิดพลาดของค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.54% (FSO) ที่ตำแหน่งสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ ขณะที่กราฟในรูปที่ 5.15 ค่าความผิดพลาดของค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 6.86% (FSO) ที่ตำแหน่งสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 5.14 กราฟฮิสเทอรีซิสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวก



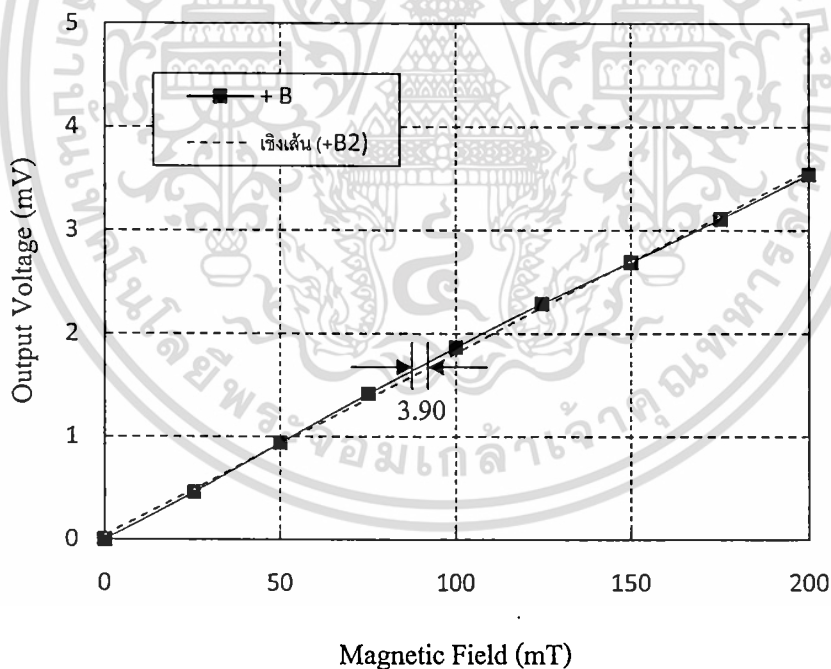
รูปที่ 5.15 กราฟฮิสเตอร์รีซิสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ

จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 จะพบว่าความแตกต่างของค่าแรงดันเอาต์พุตขณะเพิ่มกับลดความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดที่สนามแม่เหล็กที่จุดเริ่มต้น โดยที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบจะมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมากกว่า เนื่องมาจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างคั้งที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 5.2.5

### 5.2.7 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้นของกราฟความเป็นจริงแล้วหมายถึง ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) หรือคือค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองจริงกับผลจากการประมาณค่าที่เป็นไปได้ โดยวิธีในการวัดความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟสามารถวัดได้หลายวิธี ซึ่งในการทดลองนี้จะวัดจากค่าความแตกต่างสูงสุดของค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างกราฟจากการประมาณค่ากับกราฟจากการทดลองจริง โดยจากเสนอเฉพาะกรณีที่ให้สนามแม่เหล็กเป็นบวกเท่านั้นดังรูปที่ 5.16

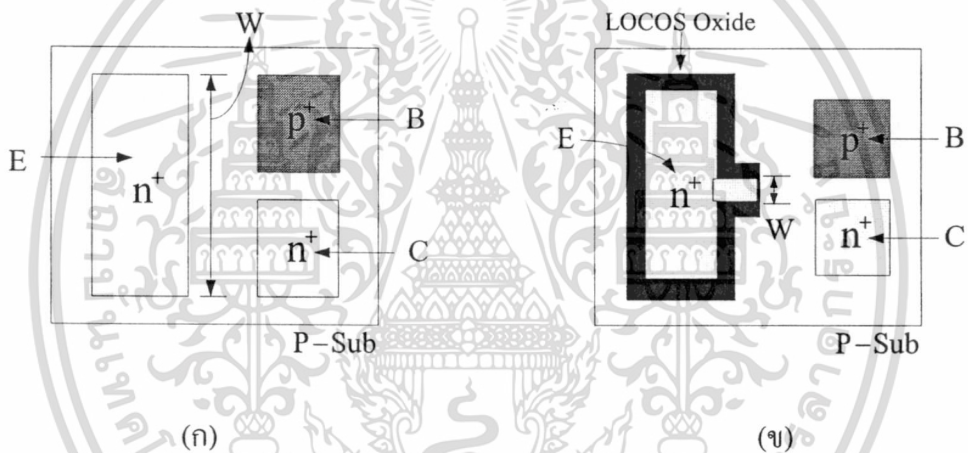
จากกราฟรูปที่ 5.16 เป็นกราฟแสดงผลการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เมื่อให้กระแสไบอัสเท่ากับ 2.0 mA และจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศทางบวก ซึ่งจากผลการทดลองจะได้ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุดเท่ากับ 1.95% mT แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในระดับที่สูงมาก สำหรับกรณีของกระแสไบอัสค่าอื่นๆ และสนามแม่เหล็กทิศทางเป็นลบ ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะที่คล้ายกัน



รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบกราฟจากการทดลองจริงกับกราฟจากการประมาณค่า เพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสไบอัสเท่ากับ 2.0 mA เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวก

### 5.3 เปรียบเทียบผลการตอบสนองและการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา กับแบบพลังงานต่ำ

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ทำการพัฒนาและปรับปรุงมาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาเดิมดังรูปที่ 5.17(ก) โดยการปรับปรุงโครงสร้างขึ้นมาใหม่คือ การลดพื้นที่การฉีดพาหะลงจากเดิมและการเพิ่มชั้นออกไซด์ (LOCOS) ขึ้นมาล้อมรอบอิมิตเตอร์เพื่อเป็นผนังป้องกันการเกิดกระแสรั่วออกทางด้านข้างของอิมิตเตอร์ และให้พาหะสามารถไหลได้เฉพาะบริเวณช่องเปิดที่กำหนด โดยเรียกว่า แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ โครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 5.17(ข)



รูปที่ 5.17 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สองชนิดคือ (ก)แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาเดิม และ (ข)แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ

จากรูปที่ 5.17 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สองชนิดคือ รูปที่ 5.17(ก) เป็นโครงสร้างแบบสามขาเดิม โดยมีโครงสร้างแบบ NPN ซึ่งไม่มีชั้นออกไซด์ล้อมรอบอิมิตเตอร์ จะพบว่าพื้นที่การฉีดพาหะ(W) มีขนาดที่กว้าง ขณะที่รูปที่ 5.17(ข) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบพลังงานต่ำ จะมีการสร้างชั้น LOCOS ขึ้นล้อมรอบอิมิตเตอร์ โดยจะเหลือช่องเปิดไว้เฉพาะด้านที่อยู่ฝั่งเดียวกับเบสและคอลเลคเตอร์ เพื่อต้องการให้พาหะเคลื่อนที่อยู่เฉพาะบริเวณที่มีผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่านั้น เพื่อให้อุปกรณ์เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดจะ ได้กล่าวถึง

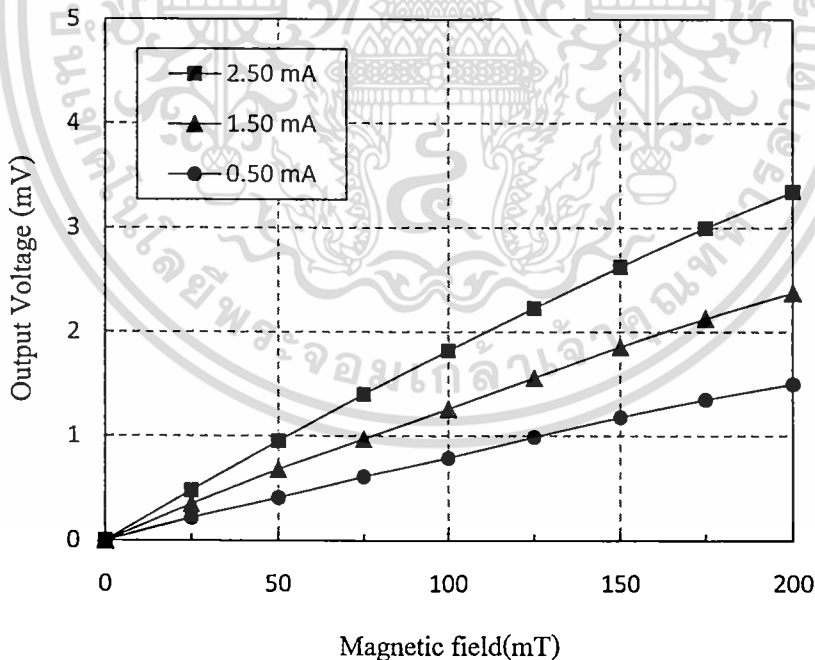
#### ในหัวข้อ 5.3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.1 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

จากรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 เป็นกราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา โดยแสดงผลการตอบสนองในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง 0 - 200 mT โดยที่ใช้อุปกรณ์มีระยะเบี่ยงเบนพาดเท่ากับ  $20\ \mu\text{m}$  และมีความกว้างของอิมิตเตอร์เท่ากับ  $680\ \mu\text{m}$  โดยให้กระแสไบอัสเท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA

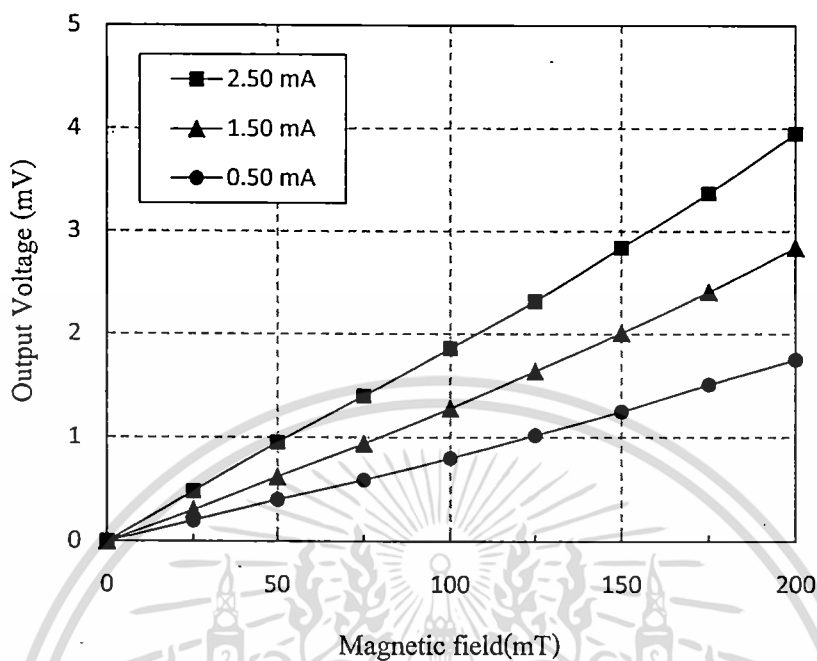
จากรูปในรูปที่ 5.18 เป็นผลการตอบสนองของอุปกรณ์เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากทิศทางบวก (+B) จากผลการทดลอง ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ได้มีค่าเท่ากับ 7.54, 11.87 และ 16.75 mV/T เมื่อให้กระแสไบอัส เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA ตามลำดับ ขณะที่กราฟในรูปที่ 5.19 เป็นผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ในทิศทางลบ (-B) โดยค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ได้มีค่าเท่ากับ 8.71, 14.18 และ 19.45 mV/T ที่กระแสไบอัสเท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา ที่กระแสमितเตอร์ค่าแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ

จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 5.18 และ 5.19 จะพบว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ได้นั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้กระแสไบอัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มกระแสไบอัสจะทำให้ปริมาณของพาหะที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ทำให้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และจะพบว่าค่าความไวในการตอบสนองเมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ(-B) จะมีค่ามากกว่ากรณีของสนามแม่เหล็กเป็นบวก (+B) สาเหตุที่เกิดสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลด้วยกันดังในหัวข้อเรื่อง “ความไม่สมมาตรของโครงสร้าง” [12]-[13]

### 5.3.2 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำกับแบบสามขา

จากผลการทดลอง ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งแบบพลังงานต่ำ(ที่ใช้ในงานวิจัยนี้) และแบบสามขาที่มีโครงสร้างคล้ายกัน แต่แตกต่างกันที่แบบพลังงานต่ำมีการสร้างชั้นออกไซด์เป็นผนังล้อมรอบอิมิตเตอร์ในขณะที่แบบสามขาไม่มี โดยสามารถสรุปค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สองชนิดคือ แบบสามขา (TTMT) และแบบพลังงานต่ำ (LPMT)

Emitter current (mA)	Sensitivity (mV/T), +B		Sensitivity (mV/T), -B	
	TTMT	LPMT	TTMT	LPMT
0.5	7.54	7.68	8.71	8.82
1.5	11.87	14.52	14.18	16.73
2.5	16.75	22.65	19.45	27.35

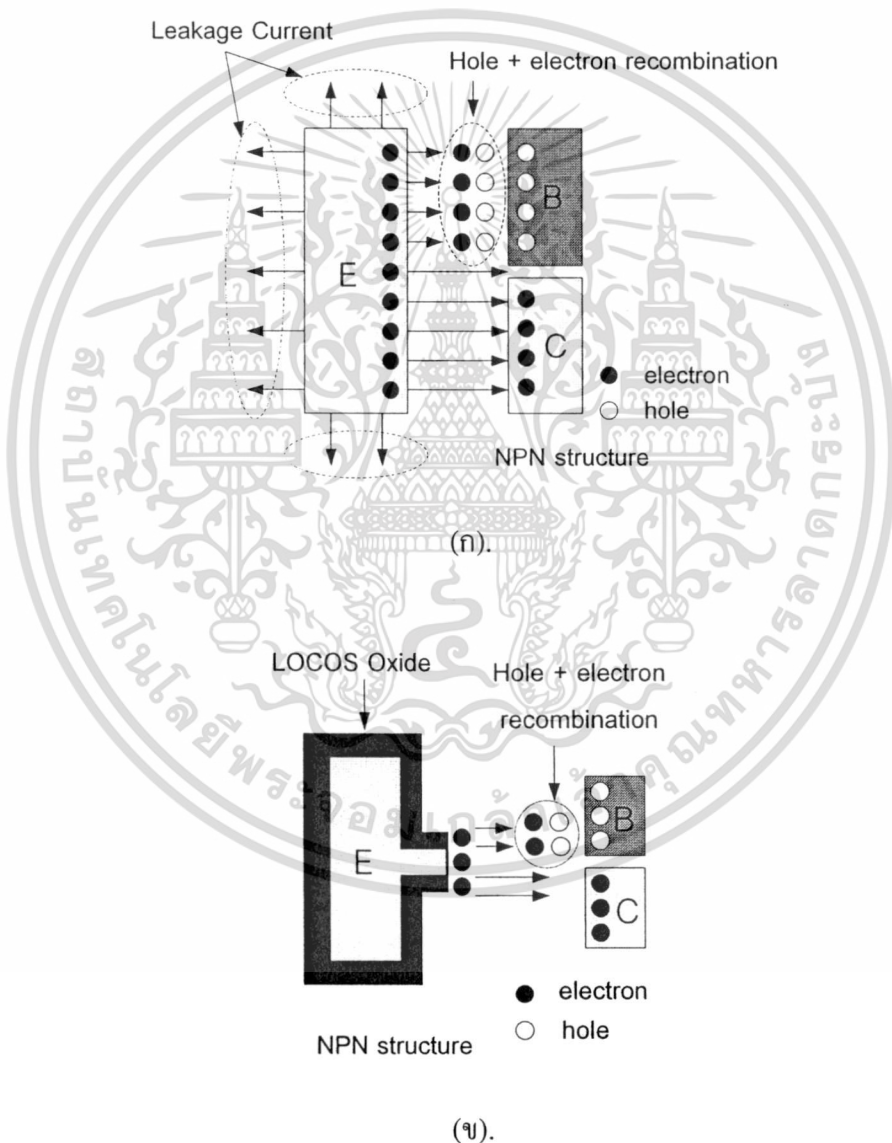
เมื่อ TTMT: แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา (Three Terminal Magnetotransistor)

LPMT: แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (Low Power Magnetotransistor)

จากตารางที่ 5.3 เป็นตารางเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา (TTMT) กับแบบพลังงานต่ำ (LPMT) โดยแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าความไวในการตอบสนองที่กระแสไบอัสสามค่าคือ 0.5, 1.5 และ 2.5 mA ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองแบบ จากตารางที่ 5.3 จะได้ว่า เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมาคือการวัดผลในทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ จะได้ว่าค่าความไวในการตอบสนองมากกว่ากรณีของสนามแม่เหล็กเป็นบวกเมื่อกระแสไบอัสเท่ากัน และหากเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองที่กระแสไบอัสที่เท่ากันและทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ให้เป็นทิศทางเดียวกัน จะได้ว่าค่าความไวในการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำจะมากกว่าแบบสามขาทั้งหมด

เนื่องจากพิจารณารูปที่ 5.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองแบบ โดยรูปที่ 5.20(ก) แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะที่ถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลกเตอร์กับเบสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา ซึ่งจะพบว่าพาหะ (อิเล็กตรอน) ส่วนมากแล้วจะเคลื่อนที่ไปยังเบสกับคอลเลกเตอร์เกิดเป็นกระแสเบสกับกระแส

คอลเลคเตอร์ตามลำดับ แต่จะพบว่าพาหะส่วนหนึ่งสามารถไหลหรือรั่วไหลออกทางด้านข้างของอิมิตเตอร์ได้ ก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่กับโฮลที่อยู่ในเบสแล้วเกิดเป็นกระแสต่อไป ในขณะที่รูปที่ 5.20(ข) จะแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะจากอิมิตเตอร์ไปยังเบสกับคอลเลคเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ ที่มีการสร้างผนังออกไซด์ขึ้นมาล้อมรอบอิมิตเตอร์ ซึ่งจะช่วยในการลดการรั่วไหลของพาหะออกทางด้านข้าง และบังคับให้พาหะถูกฉีดได้เฉพาะบริเวณที่เป็นช่องเปิดที่อยู่ด้านเดียวกับเบสและคอลเลคเตอร์



รูปที่ 5.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะจากอิมิตเตอร์ไปยังเบสกับคอลเลคเตอร์ของ  
 (ก).แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา และ (ข).แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.20(ก) การที่พาหะสามารถรั่วไหลออกทางด้านข้างของอิมิตเตอร์ จะทำให้พาหะที่มีผลต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็กมีปริมาณไม่มาก และอิมิตเตอร์มีพื้นที่การฉีดพาหะที่กว้าง จะส่งผลให้การเบี่ยงเบนของพาหะบริเวณที่อยู่ด้านขอบของอิมิตเตอร์ไม่สามารถเบี่ยงเบนไปถึงอีกขั้วหนึ่งได้ จากทั้งสองเหตุผลที่เกิดขึ้น ย่อมส่งผลให้ค่าความไวในการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีค่าลดน้อยลงได้

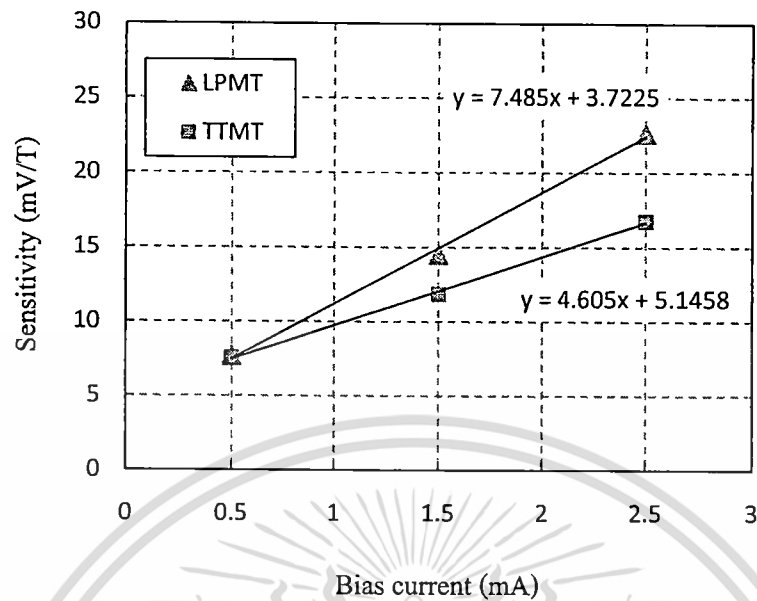
ดังนั้นการพัฒนาและปรับปรุง โครงสร้างขึ้นมาใหม่ดังในรูปที่ 5.20(ข) โดยการสร้างชั้นออกไซด์หน้าล้อมรอบอิมิตเตอร์ เพื่อป้องกันการเกิดกระแสรั่วทางด้านข้างและสามารถบังคับให้พาหะเคลื่อนที่อยู่เฉพาะบริเวณที่จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่านั้น มีส่วนช่วยทำให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งหากพิจารณาที่กระแสไบอัสค่าเท่ากัน เราสามารถแสดงให้เห็นค่าความไวในการตอบสนองที่เพิ่มขึ้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาได้ดังตารางที่ 5.4 [12]-[13]

ตารางที่ 5.4 แสดงสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของค่าความไวในการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบบสามขา

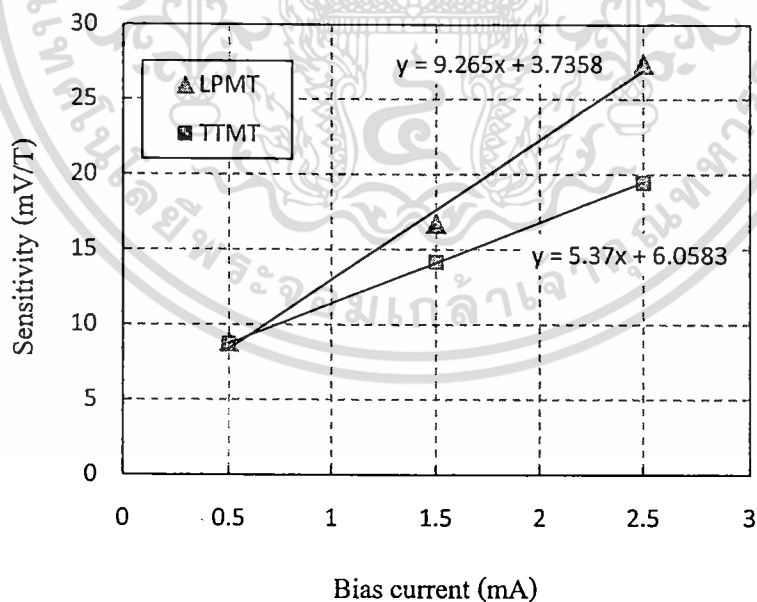
Emitter current (mA)	Sen. Increase (%)	
	+B	-B
0.5	1.86	1.26
1.5	22.33	17.98
2.5	35.22	40.62

### 5.3.3 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำกับแบบสามขา

จากตารางที่ 5.3 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำกับแบบสามขา ซึ่งจากผลการทดลองนั้นจะพบว่าค่าความไวในการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำจะเพิ่มขึ้นจากแบบสามขาเดิมตามสัดส่วนของกระแสที่ให้ไบอัส โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดต่อการเปลี่ยนค่ากระแสไบอัส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 สำหรับกรณีทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกและลบตามลำดับ



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนกระแสไบอัสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (LPMT) กับแบบสามขา (TTMT) เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กมีทิศเป็นบวก (+B)



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนกระแสไบอัสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ (LPMT) กับแบบสามขา (TTMT) เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กมีทิศเป็นบวก (-B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนกระแสไบอัสเมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกและลบตามลำดับ จากกราฟจะพบว่าความสัมพันธ์ของค่าความไวในการตอบสนองกับค่ากระแสไบอัสมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นหากรู้ค่าความไวในการตอบสนองก็สามารถนำไปคำนวณหาค่ากระแสที่ใช้ไบอัสได้ และในกรณีกลับกันหากรู้ค่ากระแสไบอัสก็สามารถนำไปคำนวณหาค่าความไวในการตอบสนองได้ เช่นเดียวกัน แต่ผลจากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลองอาจไม่ตรงกันก็ได้ เนื่องมาจากในการทดลองจริงจะมีปัจจัยภายนอกหลายอย่างมาเกี่ยวข้องด้วย อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะนำผลที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์หาผลต่างๆ เพื่อศึกษาแนวโน้มที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน

โดยในการทดลองนี้จะนำสมการที่ได้จากกราฟในรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 มาคำนวณหาค่ากระแสไบอัสที่ใช้เมื่ออุปกรณ์มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 10.0, 15.0 และ 20.0 mV/T เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดต่อไป โดยผลจากการคำนวณสามารถแสดงได้ตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิด

Sensitivity (mV/T)	Emitter current (mA), +B		Emitter current (mA), -B		Power decrease (%)	
	TTMT	LPMT	TTMT	LPMT	+B	-B
10	1.05	0.84	0.73	0.68	20.01	6.85
15	2.14	1.51	1.67	1.22	29.44	26.95
20	3.23	2.17	2.59	1.76	32.82	32.04

การหาค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ของอุปกรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1 และในการหาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.3

$$P = IV \quad (5.1)$$

เมื่อ P คือพลังงานที่ใช้, I คือค่ากระแสไฟฟ้า และ V คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้

$$\Delta P(\%) = \frac{|P_{TTMT} - P_{LPMT}|}{P_{TTMT}} \times 100 = \frac{|IV_{TTMT} - IV_{LPMT}|}{IV_{TTMT}} \times 100 \quad (5.2)$$

เนื่องจากการทดลองใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้งหมดดังนั้นจะได้ว่า

$$\Delta P(\%) = \frac{|I_{TTMT} - I_{LPMT}|}{I_{TTMT}} \times 100 \quad (5.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ กับแบบสามขา แสดงได้ดังตารางที่ 5.5 ซึ่งจากการคำนวณจะเห็นว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำสามารถลดการใช้พลังงานลงจากแบบสามขาเดิม ทั้งในกรณีที่ทิศทางของสนามแม่เหล็ก เป็นบวกได้เท่ากับ 20.01, 29.44 และ 32.82 % เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าความไวในการตอบสนองค่า เดียวกันเท่ากับ 10.0, 15.0 และ 20.0 mV/T ตามลำดับ และในกรณีที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็น ลบได้เท่ากับ 6.85, 26.95 และ 32.04 % ที่ค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 10.0, 15.0 และ 20.0 mV/T ตามลำดับ โดยการลดการใช้พลังงานจะเป็นสัดส่วนกับค่าความไวในการตอบสนองต่อ สนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ด้วย [12]-[13]

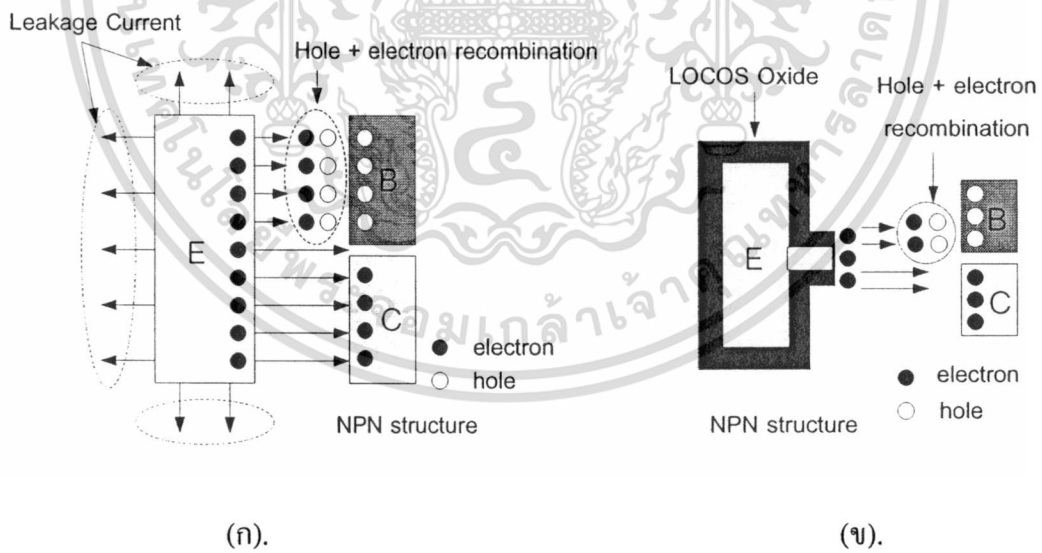
ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นแสดงให้เห็นว่า แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ พลังงานต่ำสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา เนื่องมาจากการปรับปรุงและพัฒนาโครงสร้างขึ้นมาใหม่ โดยการสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ขึ้นมาล้อมรอบอิมิตเตอร์ เพื่อลดการเกิดกระแสรั่วไหลที่ไม่มีผลต่อการตอบสนองของ อุปกรณ์และบังคับให้พาหะเคลื่อนที่อยู่เฉพาะบริเวณที่มีผลต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็ก เท่านั้น ถือเป็นวิธีช่วยลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงได้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัย การทำงานและการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพลังงานต่ำ โดยเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้สูงขึ้นและลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงจากเดิม รวมทั้งสรุปผลการทดลองและผลการตอบสนองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ต่อการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปเป็นได้ดังนี้

1. ความแตกต่างระหว่างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้นมาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขานั้นคือ การสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS oxide) ขึ้นมาล้อมรอบขั้วอิมิตเตอร์ เพื่อทำหน้าที่ลดการเกิดกระแสรั่วไหลทางด้านข้างและลดพื้นที่การฉีดพาหะของอุปกรณ์ลง ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา(ก) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำ(ข)

สำหรับข้อดีของการสร้างชั้นออกไซด์หนาขึ้นมาคือ สามารถช่วยลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ดีขึ้นได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาแล้วพบว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โททรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำกับแมกนีโททรานซิสเตอร์แบบสามขาในรูปของผลการตอบสนองพบว่าสามารถเพิ่มค่าความไวในการตอบสนองได้ถึง 35.22% (กรณี +B) และ 40.62% (กรณี -B) เมื่อให้กระแสไบอัสเท่ากับ 2.5 mA และสามารถลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลงได้ถึง 32.82% (กรณี +B) และ 32.04 (กรณี -B) ที่ค่าความไวในการตอบสนองค่าเดียวกันเท่ากับ 20 mV/T โดยการลดการใช้พลังงานจะเป็นสัดส่วนกับค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์

2. ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโททรานซิสเตอร์แบบพลังงานต่ำจะเพิ่มขึ้นได้ เมื่อให้กระแสไบอัสหรือกระแสอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มกระแสไบอัสจะเป็นการเพิ่มปริมาณการฉีดกระแสพาหะ ทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่ม ทำให้ความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งเป็นคุณสมบัติแบบเดียวกันกับแมกนีโททรานซิสเตอร์แบบสามขา

3. เมื่อเปรียบเทียบที่กระแสไบอัสค่าคงที่ค่าหนึ่ง ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโททรานซิสเตอร์ ในทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ (-B) จะมีค่ามากกว่ากรณีของสนามแม่เหล็กเป็นบวก (+B) เนื่องมาจากความไม่สมมาตรของโครงสร้าง ซึ่งมีผลต่อกลไกของการรวมตัวใหม่ของพาหะในเบส และทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะไปยังขั้วเบสกับคอลเลกเตอร์แตกต่างกัน

4. เมื่อพิจารณาที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะ (L) ค่าเดียวกัน ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะมีค่าลดลง ขณะที่ค่าความกว้างของอิมิตเตอร์ (W) มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าเท่ากัน ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามระยะเบี่ยงเบนพาหะที่เพิ่มขึ้น

5. อุปกรณ์มีความเป็นเชิงเส้นสูง โดยมีค่าความผิดพลาดหรือความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์เท่ากับ 1.95% mT ที่กระแสไบอัสเท่ากับ 2.0 mA เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทางเป็นบวก

ในการดำเนินการวิจัยนี้ถือว่าบรรลุจุดประสงค์ตามที่ตั้งไว้ทุกประการ ปัญหาและอุปสรรคมีบ้างแต่สามารถแก้ไขได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยจะนำผลที่ได้จากการวิจัยไปผลิตเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป และขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยในการสนับสนุนงานวิจัยนี้อีกครั้งหนึ่งมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, “**2-D Integrate Magnetic Field Sensor in CMOS Technology**”, Circuit Syst, 1989, pp.701-704
- [2] Julian W. Gardner, “**Microsensors Principles and Application**”, John Wiled&Sons, Chichester, 1994, Ch.8, pp.199-220
- [3] S. Middelhoek, S.A. Audet, “**Silicon Sensors**”, Academic press, 1989, pp.202-205
- [4] S.M. Sze, “**Semiconductor Sensors**”, John Wiled&Sons, Chichester, 1994, pp.218-225
- [5] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues, “**Merged Lateral Bipolar Magnetotransistor**”, Sensors and Actuator A, 1995, pp.177-181
- [6] R.S. Popovic, “**The Vertical Hall Effect Deviec**”, IEEE Electron Devices Lett, vol. EDL-5, 1984, pp.357-358
- [7] Henry P. Baltes, “**Integrated Semiconductor Magnetic Sensor**”, Sensors and Actuator, vol.35, 1990, pp.21-23
- [8] S. Middelhoek and S.A. “**Audet,Silicon Sensors**”, Academic Press, London, 1989, Ch. 5, pp. 201-244
- [9] M. Avram ,O. Neagoe, C. Codreanu, C. Voitincu, M. Simion, “**An Optimised Bipolar Lateral Magnetotransistor**”, IEEE Sensors Jounal, (1998) 83-86.
- [10] Toempong Phetchakul, Chana Leepattarapongpan Weera Pengchan, “**Magnetotransistor Sensing by the Difference of Base and Collector Current**”, International Symposuim on Integrated Circuits, Singapore, September 8-10, 2004.
- [11] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun and A. Poyai, “**Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination – Deflection Ef fect**”, IEEE Sensor -Journal, Vol.10, no.2, pp. 294-299, 2010.
- [12] P. Sottip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun and A. Poyai, “**The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology**”, ECTI-CON Association, pp.219, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] ปัญญากร โสตทิพย์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ และคณะ, “ผลของระยะเบี่ยงเบนและความกว้างการฉีดพาหะต่อความไวของแมกนีโททรานซิสเตอร์”, NECTEC-ACE2010 Special Edition, September 2010, pp.212-217
- [14] อาคม ศรีหาเพท, ปัญญากร โสตทิพย์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และคณะ, “การศึกษาสัมประสิทธิ์และการชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโททรานซิสเตอร์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33), 2553, หน้า. 1125-1128
- [15] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช, “Semiconductor Device” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [16] ผศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ”, แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [17] Hong Xiao, “Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology”, Person Education International, 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



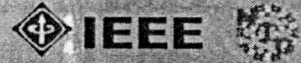
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเผยแพร่ผลงานในวารสารและการประชุมวิชาการในประเทศและต่างประเทศ

- 1) The 6<sup>th</sup> Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2011), Kaohsiung, Taiwan, February 20-23, 2011.
- 2) The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2010, Chiang Mai, Thailand, 19-21 May 2010.
- 3) NECTEC Technical Journal, Vol. X, No. 22, July-October, 2010.
- 4) The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-33), Chiang Mai, Thailand, December 1-3, 2010.
- 5) การประชุมวิชาการ “แม่ฟ้าหลวงวิชาการ 53”, เชียงราย, 19-20 พฤศจิกายน, 2553.



## Conference Section (cont'd)



# IEEE-NEMS 2011

THE 6TH ANNUAL IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON  
NANO/MICRO ENGINEERED AND MOLECULAR SYSTEMS

Call For Papers

Kaohsiung, Taiwan  
February 20-23, 2011

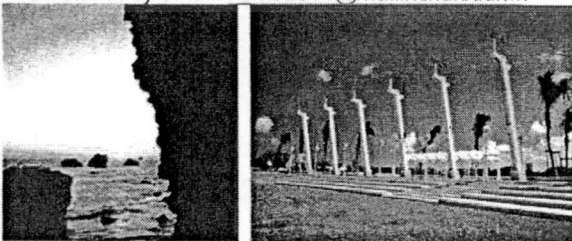
The 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2011) will be held in Kaohsiung, Taiwan, during February 20-23, 2011. IEEE-NEMS is a premier IEEE annual conference held in Asia which focuses on MEMS and Nanotechnology. The IEEE-NEMS 2011 will be composed of premier plenary talks given by renowned researchers in the field, oral presentations on important current topics and poster sessions for interactive discussions.

### Conference Scope

1. Nanophotonics
2. Nanomaterials
3. Carbon Nanotube based Devices and Systems
4. Nanoscale Robotics, Assembly, and Automation
5. Molecular Sensors, Actuators, and Systems
6. Integration of MEMS/NEMS with Molecular Sensors/Actuators
7. Microfluidics and Nanofluidics
8. Micro and Nano Heat Transfer
9. Nanobiology, Nano-bio-informatics, Nanomedicine
10. Micro and Nano Fabrication
11. Micro/Nano Sensors and Actuators
12. Micro/Nanoelectromechanical Systems (M/NEMS)

### Submission of Abstracts

Submitted abstracts should be in a two-page format including one text page and one page of figures and tables. All submissions will be reviewed by experts in the field based on originality, significance, quality and clarity. To submit an abstract, please visit the conference website <http://www.ieee-nems.org>. For further inquiry regarding IEEE-NEMS 2011, please contact the conference secretariat by email: [nems2011@mail.ncku.edu.tw](mailto:nems2011@mail.ncku.edu.tw).



### Important Dates

Abstract Submission: by **August 31, 2010**

Author Notification: by **September 30, 2010**

Full Paper Submission: by **October 31, 2010**

**Accepted Full Papers that fit all IEEE requirements will be included in the IEEE Xplore database and EI-indexed.**

### Honorary General Co-Chairs

Dr. Michael Ming-Chiao Lai, President of NCKU, Taiwan

Dr. Lih-Juann Chen, President of NTHU, Taiwan

Dr. Chih-Kung Lee, Vice President, ITRI, Taiwan

### Conference General Chair

Dr. Gwo-Bin Vincent Lee, NCKU, Taiwan

### Conference Organizing Chair

Dr. Fan-Gang Kevin Tseng, NTHU, Taiwan

### Program Chair

Dr. Weileun Fang, NTHU, Taiwan

### Regional Program Co-Chairs

Dr. Osamu Tabata, Kyoto University, Japan

Dr. Christofer Hierold, ETH, Switzerland

Dr. Abraham Lee, UCI, USA

### Co-organized by

Engineering Science Dept., NCKU, Taiwan

Engineering and System Science Dept., NTHU, Taiwan



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Deflection Length and Emitter Width on Sensitivity of Magnetotransistor

Toempong Phetchakul<sup>1</sup>, Panyakorn Sottip<sup>1</sup>, Chana Leepattarapongpan<sup>2</sup>, Naritchapan Penpondee<sup>2</sup>, Putapon Pengpad<sup>2</sup>, Arckom Srihapat<sup>2</sup>, Charndet Hruanun<sup>2</sup> and Amporn Poyai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.  
Email: kptoempo@kmitl.ac.th

<sup>2</sup>Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand.

**Abstract-** This paper presents a study of effect of deflection length and emitter width on sensitivity of magnetotransistor. The device has been fabrication on standard CMOS technology. It can detect magnetic field applied vertically to the chip. The structure consists of emitter (n-type), base (p-type) and collector (n-type) on silicon p-substrate. The device can sense magnetic field by Hall Effect theory and carrier deflection resulting to difference between base and collector current ( $\Delta I_{CB}$ ) related to magnetic field ( $B_z$ ) strength. From the experiment is comparing emitter width of 4, 5 and 10 micrometer at deflection length of 10 and 20 micrometer. The result shows that increase in injection emitter width cause to the sensitivity decreases and the deflection length of 20 micrometer is the best sensitivity. These results are very useful for developing the magnetotransistor for high sensitivity and performance.

## I. INTRODUCTION

Magnetic sensor is a device built for magnetic field detection. The phenomenon for the magnetic field detect such as; Hall Effect and Magnetoresistive. Currently many devices, the main principle based on the hall effect which have been used widely in many magnetic sensor applications since they possibly response to relatively low magnetic field. They also have high sensitivity, wide frequency and temperature ranges, compatible with integrated circuit and support variety applications [1]-[3].

The Magnetotransistor is one of a magnetic sensor device, which has the structure similar to the structure of bipolar transistor. It was consist of three terminals which are emitter (n-type), bases (p-type) and collectors (n-type) on silicon p-substrate, which has been used with NPN structure (Fig. 1). It is a useful sensor for magnetic field applied to vertical direction of the chip.

The unique feature of this magnetotransistor is LOCOS oxide (local oxidation of silicon) inserted around emitter area to reduce the leakage current by limit its carrier injection area. This method is provided to reduce biasing current of the device and also enhances its sensitivity [4].

The main mechanism for magnetic sensitivity of the device is the deflection and recombination of minority carriers in the neutral base region by Lorentz force. The degree of deflection is proportional to the Hall mobility of carrier. Therefore, electrons are more suitable for the detection of magnetic field because of their higher mobility. The carrier deflection influences to difference between base and collector current ( $\Delta I_{BC}$ ) which is directly proportional to magnetic field ( $B_z$ ) applied. The deflection length and emitter width of both is influence to sensitivity of device.

Short deflection length and wide emitter are limit carrier deflection effect, while long deflection length and narrow emitter may enhance the carrier deflection effect [5].

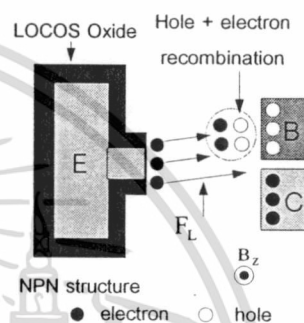


Fig. 1. Deflection and Recombination of minority carrier in base region.

## II. STRUCTURE AND FABRICATION

### A. Structure

Schematic of the magnetotransistor has been shown in Fig. 2. It has a similar structure to a NPN transistor with p-type substrate used as a base. The emitter and collector have been formed by implantation technique with n-type species to complete both p-n junctions. The LOCOS oxide has been implemented around emitter region as a semi-isolated structure which reduces area of leakage current injection. The dimensions of the emitter width ( $W$ ) are 4, 5 and 10 microns and the distance between the base and collector is 10 microns, which is optimized for most deflective bending. The deflection lengths ( $L$ ) are 10 and 20 microns.

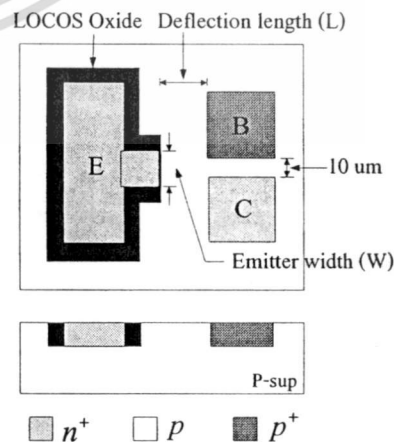


Fig. 2. Structure of the magnetotransistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### B. Fabrication

The device has been fabricated on the standard CMOS technology as shown in Fig.3. The process started with p-type substrate (Fig. 3a) and thermal oxidation process has been performed to make field oxide. A photoresist mask was deposited on the field oxide (Fig. 3b) then it was patterned by photolithography technique for opening a photoresist window to reveal the field oxide underneath it. Then LOCOS process was followed in Fig. 3c. Collector and emitter area were formed by  $N^+$  phosphorus ion implantation (Fig. 3d) then base contact was made by another implantation of  $P^+$  boron ion (see Fig. 3e). Finally aluminium deposition and patterning for contact formation were done by sputtering technique and photolithography technique respectively to finish the device (Fig. 3f).

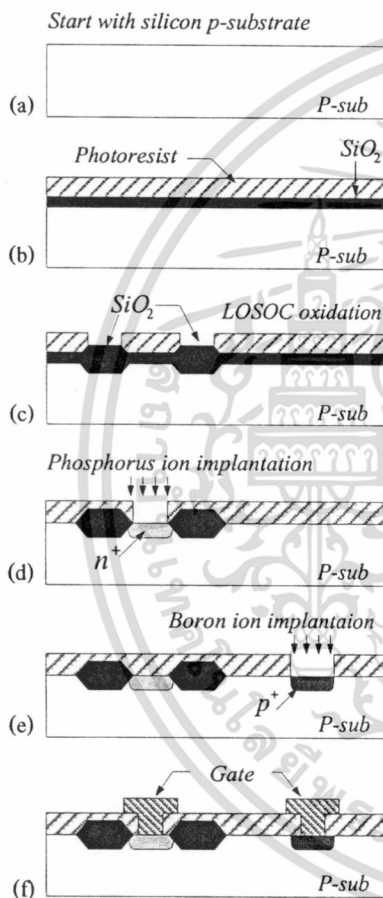


Figure 3. Fabrication process for Magnetotransistor arrays.

### III. OPERATING PRINCIPLE

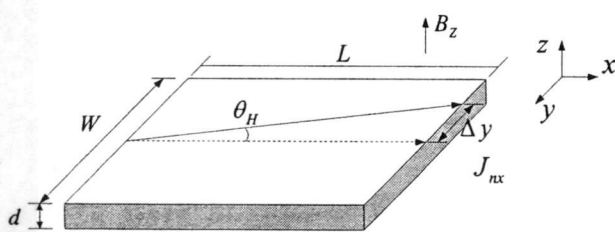


Figure 4. Deflection carrier area of electron.

The magnetic field response of the Magnetotransistor relies on the Lorentz force applied on both base and collector current  $I_B$  and  $I_C$  respectively. This can be analyzed in Fig. 4. It shows the displacement of electron current,  $J_{nx}$ , at an angle of  $\theta_H$ , because of the Lorentz force due to magnetic field,  $B$ , perpendicular to the direction of electrical current.

Emitter current is a combination of base and collector current, as shown in (1). And it can also be shown in term of electron carrier density, as shown in (2).

$$I_E = I_B + I_C \quad (1)$$

$$I_E = J_{nx} \cdot W \cdot d \quad (2)$$

Where,  $W$  is the emitter width and  $d$  is effective depth of the current.

Without magnetic field applied the carrier is injected directly as the straight dash line. Which has a magnetic field applied perpendicularly to the direction of base and collector current, the variation between the base and collector current appear as a result, and can be represented by (3) which shows the relationship with the deflection length,  $L$ , and the electron deflection angle,  $\theta_H$ .

$$\Delta I_{BC} = J_{nx} \cdot d \cdot L \cdot \tan \theta_H \quad (3)$$

The equation for relative the sensitivity and the absolute sensitivity response to the magnetic field applied are shown in (4) and (5), respectively.

$$S_R = \frac{\Delta I_{BC}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \quad (4)$$

$$S_A = \frac{\Delta V_{BC}}{\Delta B_Z} \quad (5)$$

Where,  $\Delta V_{BC}$  is the representation of differential current in term of output voltage.

### IV. MEASUREMENT AND DISCUSSION

#### A. Sensor interface circuit

Fig. 5 shows the sensor interface circuits that used to bias the device. For NPN transistor in active mode, which this structure minority carrier in neutral base is electron and it is the one that sense to magnetic field, one can adjust base and collector current through of  $R_B$  and  $R_C$  respectively. Current from both base and collector then will be combined at emitter. Therefore, electron is injection from emitter to both base and collector.

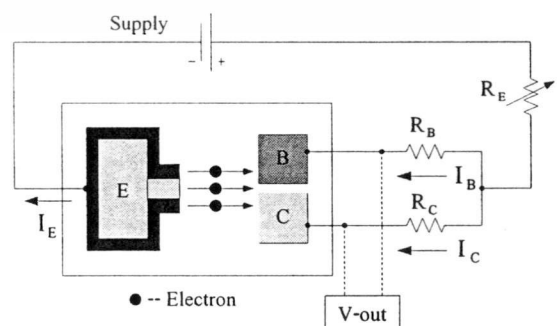


Figure 5. Interface circuit of magnetotransistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If without the magnetic induction ( $B_z=0$ ) applied to the device (perpendicular to the device surface),  $I_B$  and  $I_C$  will be in constant as well. But when magnetic induction has been applied to the device, Lorentz force will be induced and cause deflection of the both current. This changes the net current on each terminal and lead to voltage change between these two terminals can define as follow;

$$\Delta V_{BC} = \Delta I_B R_B - \Delta I_C R_C \quad (7)$$

Where,  $\Delta I_B$  and  $\Delta I_C$  is the variation of base and collector current,  $\Delta V_{BC}$  is output voltage.

### B. Vertical magnetic field response

The magnetic field response of the magnetotransistor relies on Lorentz force leading to variation of both base and collector current, when a magnetic field is applied perpendicular to the chip surface it will induce carrier deflection. Therefore, base and collector current variation is can be measured by the output voltage difference between base and collector.

Fig. 6 shows the output voltage variation between the base and collector ( $\Delta V_{BC}$ ) as a function of applied magnetic field to the magnetotransistor at deflection length of  $10 \mu\text{m}$  and emitter width of  $4 \mu\text{m}$ . These curves show the magnetic field response to different emitter current ( $I_E$ ) of 1, 2 and 3 mA, which has the sensitivity of 4.04, 7.52 and 10.75 mV/T respectively (shows in Table. 1). The curve shows that the variation of output voltage is linear as a function of the magnetic field. The sensitivity is proportion to the emitter current.

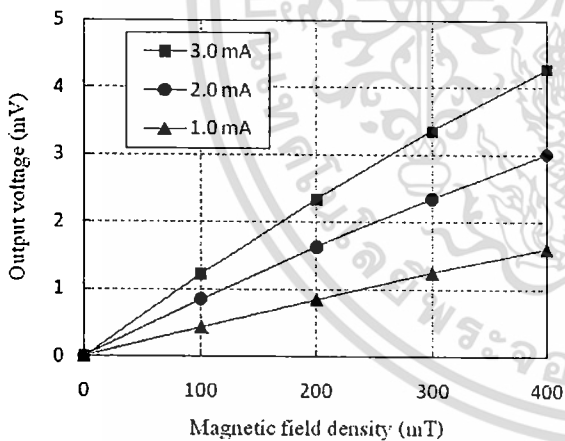


Figure 6. Vertical magnetic field response as a comparison of emitter current; 1, 2 and 3 mA.

TABLE I SENSITIVITY OF MAGNETOTRANSISTOR AS EMITTER CURRENT DIFFERENT.

Emitter current (mA)	Sensitivity (mV/T)
1	4.04
2	7.25
3	10.75

Table.1 shows the sensitivity of magnetotransistor to different emitter current of 1, 2 and 3 mA. The result shows that the sensitivity increase as emitter current increase.

Fig. 7 shows the output voltage difference between the base and collector of magnetotransistor as a function of magnetic field at a bias emitter current ( $I_E = 3 \text{ mA}$ ) and a deflection length ( $L = 10 \mu\text{m}$ ). These curve shows the sensitivity of device at different emitter width of 4, 5 and  $10 \mu\text{m}$ , the sensitivity shows in Table.2. It shows that the absolute sensitivity decrease as emitter width increase. The best sensitivity is about 10.75 mV/T from emitter width of  $4 \mu\text{m}$ .

Fig. 8 shows the output voltage as the same as Fig.7, but it has deflection length of  $20 \mu\text{m}$ . These curves show the sensitivity of device at emitter width of 4, 5 and  $10 \mu\text{m}$ , which has the sensitivity of 11.77, 11.55 and 9.28 mV/T respectively. The result shows that the sensitivity decrease as emitter width increase, as the same results in former experiment. The best sensitivity is about 11.77 mV/T from emitter width of  $4 \mu\text{m}$ .

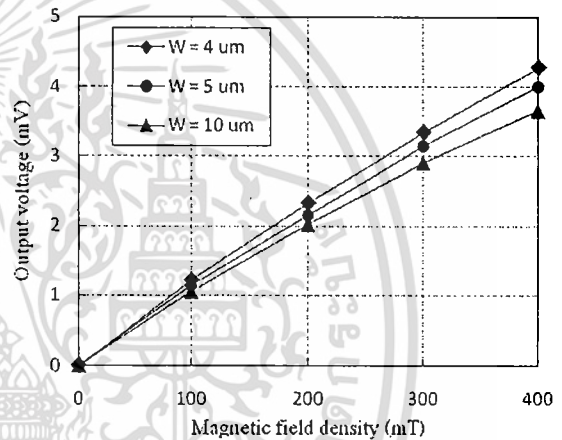


Figure 7. Vertical magnetic field response of different emitter width at  $L = 10 \mu\text{m}$ .

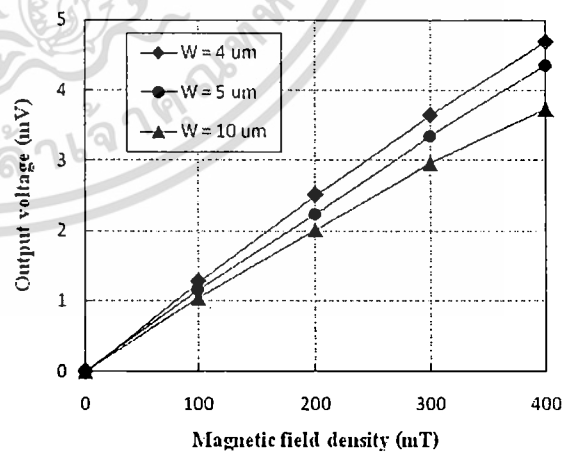


Figure 8. Vertical magnetic field response of different emitter width at  $L = 20 \mu\text{m}$ .

Table.2 shows the sensitivity of magnetotransistor, which compared the different emitter width of 4, 5 and  $10 \mu\text{m}$  to the deflection length of 10 and  $20 \mu\text{m}$ .

TABLE II SENSITIVITY OF MAGNETOTRANSISTOR TO THE ALTER PARAMETERS.

Injection Length W ( $\mu\text{m}$ )	Sensitivity (mV/T)	
	L = 10 $\mu\text{m}$	L = 20 $\mu\text{m}$
4	10.75	11.77
5	10.04	11.55
10	9.18	9.28

V. CONCLUSION

This magnetotransistor has been fabricated on the standard CMOS technology. The structure is the same as bipolar-transistor of NPN structure, which consists of three terminals of emitter, base and collector. The unique feature of this device is the LOCOS oxide implemented around emitter area to reduce the leakage current by limit the carrier injection area. The device can detected a vertical magnetic field applied on the chip by Hall Effect. The carrier deflection due to Lorentz force influences to current variation between base and collector ( $\Delta I_{BC}$ ), which is proportion to magnetic field applied.

From the results in Fig. 7, 8 and Table.2, the sensitivity of magnetotransistor is proportion to both emitter width and deflection length. Considering, at the same deflection length, the sensitivity decreases as emitter width increases, while at the same emitter width the sensitivity increases as deflection length increases.

The result shows increase injection width or deflection length increases cause to the sensitivity and the deflection length of 20 micrometer is the best sensitivity from this experiment. The result can develop magnetotransistor for higher sensitivity and performance.

In Figure 9 and 10, shows a diagram explaining the phenomena. In wide emitter (Fig. 9a), only part of deflection current has been directed to the base compared to the short emitter (Fig. 9b), which most of deflection current has been added to the base. More deflection current means more  $\Delta I_{BC}$  and results in higher sensitivity (eq. (3) and (4)).

Same explanation can be applied for the deflection length variation as well. In Fig. 10 shows more deflection current injected to the base when deflection length (L) increases from L1 to L2 and result is higher sensitivity as well.

ACKNOWLEDGMENT

The author, T. Phetchakul, would like to thank the National Research Council of Thailand (NRCT).

REFERENCES

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology," *Circuit Syst* (1989) 701-704.
- [2] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device," *IEEE Electron Devices Lett*, vol. EDL-5, pp.357-358, 1984
- [3] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor", *IEEE Trans. Electron Device*, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986.
- [4] P. Sottip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun and A. Poyai, "The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology", *ECTI-CON Association*, pp.219, 2010.
- [5] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, E. Chaowicharat, P. Peng pad, C. Hruanun and A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination - Deflection Effect", *IEEE Sensor - Journal*, Vol.10, no.2, pp. 294-299, 2010.

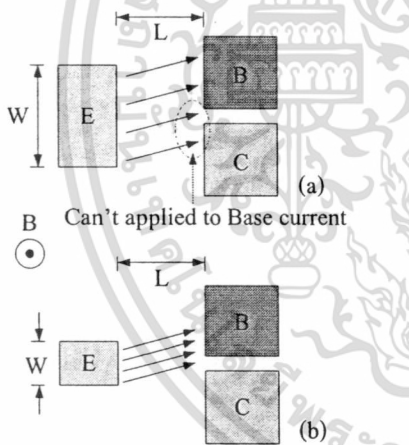


Figure 9. Compared carrier deflection of electron, which the same deflection length, (a) Emitter wide and (b) Emitter narrow.

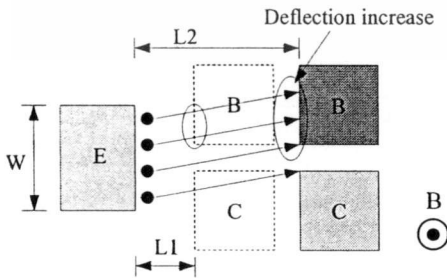


Figure 10. Compare carrier deflection of deflection length different, which the same emitter width.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ECTI-CON 2010

The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics,  
Computer, Telecommunications and Information Technology

Empress Convention Centre  
Chiang Mai, Thailand  
19-21 May 2010

Copyright © 2010 ECTI. All rights reserved.

IEEE Catalog Number: CFP1006E-GDR

ISBN: 978-974-672-491-3

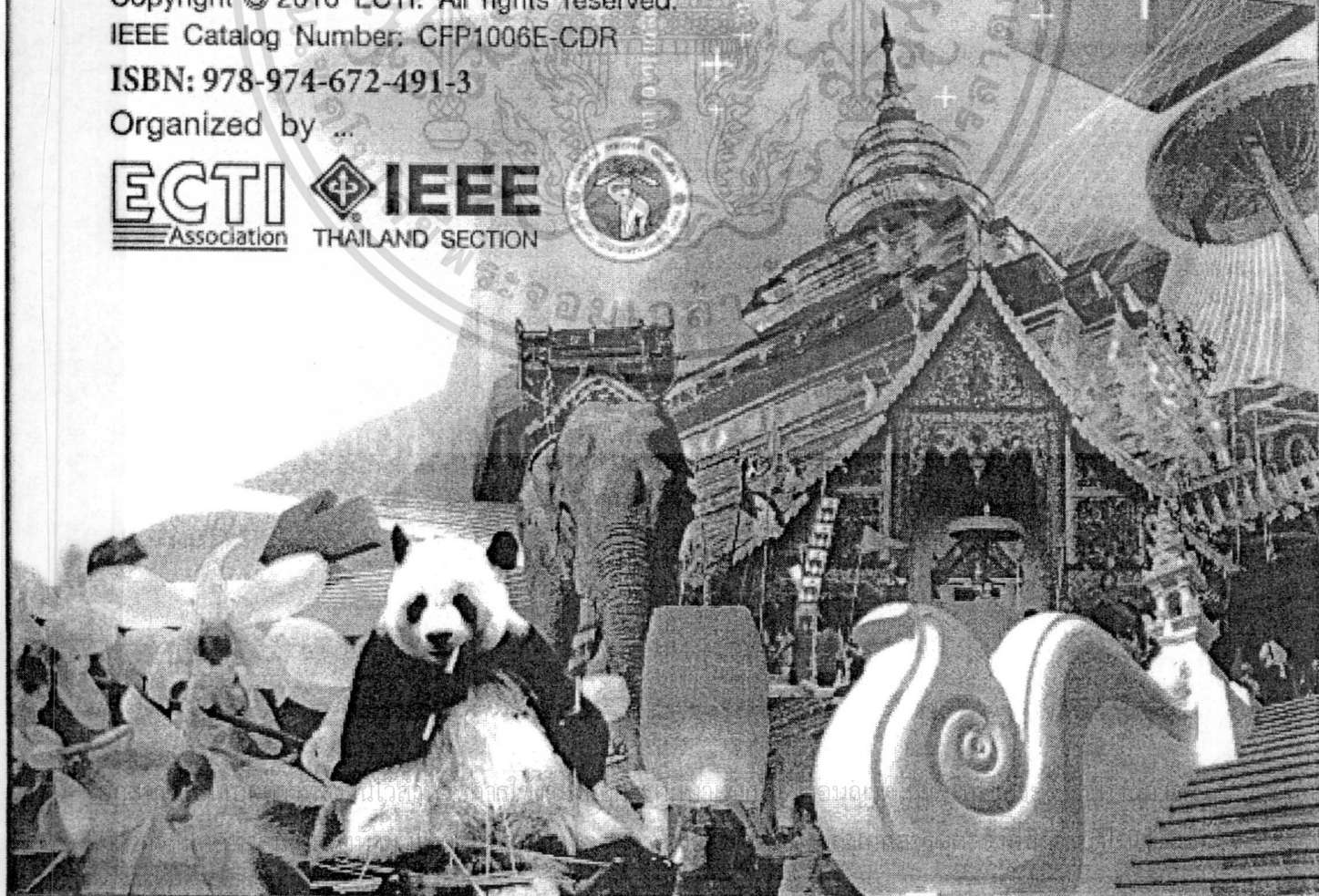
Organized by ...

**ECTI**  
Association



**IEEE**

THAILAND SECTION



# The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology

Panyakorn Sottip<sup>1</sup>, Toempong Phetchakul<sup>1</sup>, Chana Leepattarapongpan<sup>2</sup>, Naritchapan Penpondee<sup>2</sup>, Putapon Pengpad<sup>2</sup>, Arckom Srihapat<sup>2</sup>, Charndet Hruanun<sup>2</sup> and Amporn Poyai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. Email: panyakorn\_s@hotmail.com

<sup>2</sup>Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand.

**Abstract-** This paper presents the low power magnetotransistor detect magnetic field density in vertical direction. The devices can detect magnetic field by Lorentz force act upon minority carrier in base and difference between base and collector current ( $\Delta I_{CB}$ ) was occurred. The structure of the low power magnetotransistor consist of one emitter, one collector and one base contact and designed decrease emitter injection area was 5  $\mu\text{m}$  and growth LOCOS oxide around emitter area. The structure was generated and simulated by TCAD Sentaurus simulation package and shows increase sensitivity of the low power magnetotransistor when compare the three terminals magnetotransistor. From the experiment, the low power magnetotransistor can operate at bias current less than 1 mA and high sensitivity is 20.64 mV/T. The device increase sensitivity 2.53 times at bias current 5 mA and decrease power consumption 85% when compare the three terminals magnetotransistor.

The LOCOS oxide (local oxidation) has been added around emitter area (Fig. 1b) to reduce the leakage current by limit the injection area. This method reduces power consumption of the device and also enhances its sensitivity.

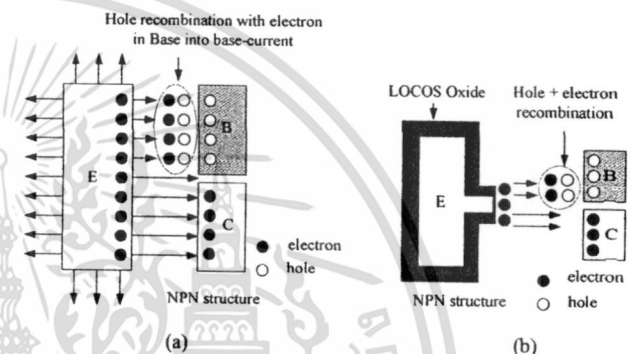


Figure 1. Magnetotransistor structure (a) Three terminals magnetotransistor and (b) Low power magnetotransistor.

## I. INTRODUCTION

Magnetic sensor is a device built for magnetic field detection. There are two main techniques which commonly be used such as; Hall effect – diode, transistor (semiconductor devices) and Magnetoresistive effect – Giant Magnetoresistance (GMR) [1-5]. Currently many devices, that based on the hall effect, have been used widely in many magnetic sensor applications since they possibly response to relatively low magnetic field, high sensitivity, wide temperature and frequency ranges, compatible with integrated circuit and support variety applications [1-5].

Magnetotransistor is one of a magnetic field sensing device which uses Hall effect theory. In early development of this device, it was consist of five terminals which are one emitter, two bases, and two collectors. Its mechanism is based on carrier deflection and modulated current injection [2]. The model was still suffered form low sensitivity and need high biasing current. Next development could reduce it terminal to three terminals namely three terminal magnetotransistor (TTMT) which has NPN structure consisted of one emitter, one base and one collector (Fig. 1a). This design help improving its sensitivity but still need high bias current since large leakage current occurred at the side of the emitter and, with a large emitter size, decent amount of majority carriers (electron) cannot be deflected between both terminal contacts.

Consequently development of the low power magnetotransistor (LPMT) which has designed improvement form the former one is emerged. The three terminals magnetotransistor still has been used with NPN structure.

## II. SIMULATION AND FABRICATION

### A. Operating principle

The operating principle of the low power magnetotransistor is based on the carrier recombination - deflection in the presence of magnetic field, the Hall Effect. This can be analyzed in Fig. 2. It shows the displacement of electron current,  $J_{nx}$ , at an angle of  $\theta_H$ , because of the Lorentz force due to magnetic field,  $B$ , perpendicular to the direction of electrical current.

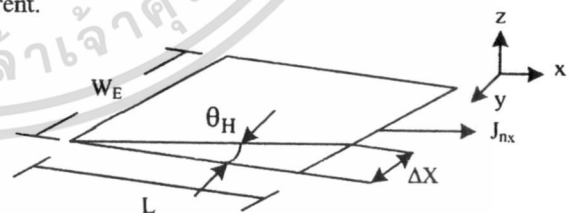


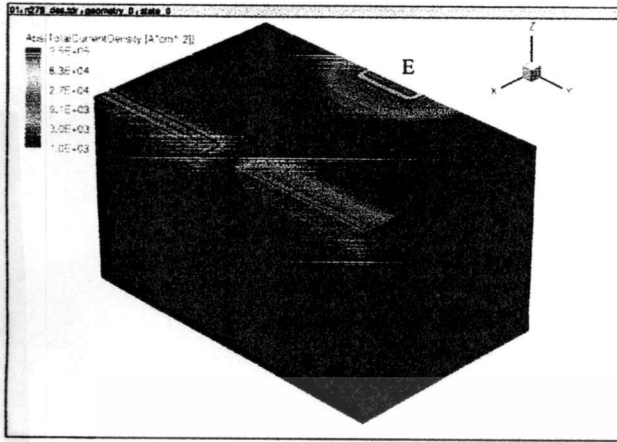
Figure 2. Area of carriers deflection (electron).

Emitter current is a combination of base and collector current can be express by

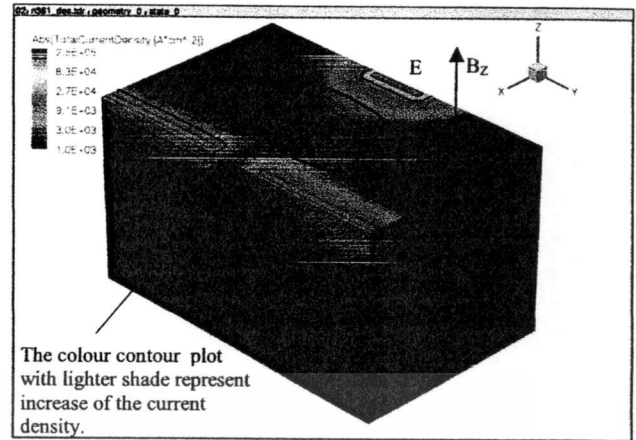
$$I_E = I_B + I_C \quad (1)$$

It can also be shown in term of electron carrier density, as shown in (2).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

Figure 3. The current density by 3-D modeling: (a) zero magnetic field and (b) vertical magnetic field constant.

$$I_E = J_{nx} \cdot W_E \cdot d \quad (2)$$

Where,  $W_E$  is the emitter width,  $d$  is effective depth of the current.

Electron deflection angle can be represented by (3) which shows the relationship between electron mobility,  $\mu_n$ , and magnetic field strength,  $B_z$ . Equation. 4 shows the relationship for electron displacement,  $\Delta X$ .

$$\tan \theta_H = \mu_n \cdot B_z \quad (3)$$

$$\Delta X = L \cdot \mu_n \cdot B_z \quad (4)$$

The resulting electrical current is the difference between base and collector currents, and can be represented by (5) which shows the relationship with the base width,  $L$ , and the electron deflection angle,  $\theta_H$ .

$$\Delta I_{CB} = J_{nx} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_H \quad (5)$$

The equation for relative sensitivity and absolute sensitivity for detecting the magnetic field is shown in (6) and (7), respectively.

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot B_z} \quad (6)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B} \quad (7)$$

Where,  $\Delta V$  is the representation of differential current in term of output voltage. [3]

### B. The Simulation

Fig. 3 shows simulation results of virtual structure replicated the device. The structure was generated and simulated by TCAD Sentaurus simulation package. Current density flow

in the device was shown as a color contour plot with lighter shade represent increasing of the current density. As can be seen when magnetic field  $B_z$  has been applied to the device in Fig. 3(b), the deflection current has been added to the terminals which causes current density especially on the base terminal more intensified compared to the result with no magnetic field applied in Fig. 3(a).

### C. Device structure and Fabrication

Schematic of the low power magnetotransistor has been shown in Fig. 4. It has a similar structure to NPN transistor with p-type substrate used as the base. Emitter and collector have been formed by implantation technique with n-type species to complete both p-n junctions. The LOCOS oxide has been implemented around emitter region as a semi-isolated structure which reduces area of leakage current injection. The size of emitter has been scaled down to 5 microns when compared to space between base and collector of 20 microns. This 1:4 ratio is sufficient to make deflection current moved away from each sensing terminal in larger fraction of main stream current. There is 10 microns space between the two sensing terminal, base and collector ( $L$ ) and the emitter which is optimized for most deflective bending.

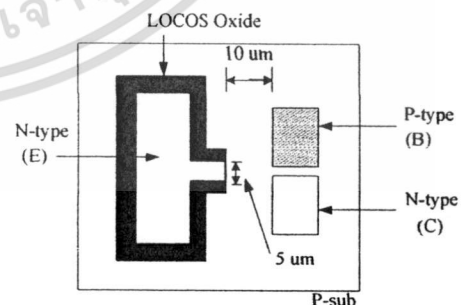


Figure 4. The Low power magnetotransistor structure (NPN).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The device has been fabricated by CMOS manufacture as shown in Fig. 5. The process started with p-type substrate and thermal oxidation process was carried to make field oxide. A silicon nitride film then was deposited on the field oxide (Fig. 5a) then it was patterning by photolithography technique for opening nitride windows to reveal the field oxide underneath it. Then LOCOS process was followed as shown in Fig. 5b. Collector and emitter area were formed by  $N^+$  arsenic ion implantation (Fig. 5c) then base ohmic contact was made by another implantation of  $P^+$  boron ion (see Fig. 5d). Finally aluminium deposition and patterning for contact formation were done by sputtering technique and photolithography technique respectively to finish the device (Fig. 5e).

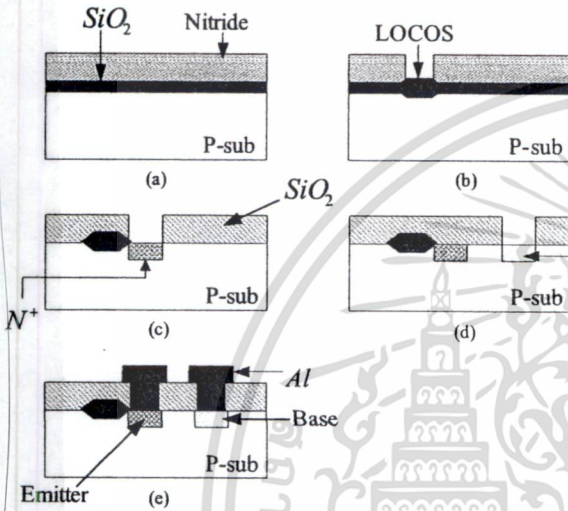


Figure 5. Process flow for MT: (a) growth  $SiO_2$  on Si surface; (b) Locos process; (c) emitter and collector terminal by arsenic implantation; (d) base by boron implantation and (e) metal pad for wire bonding.

### III. RESULT AND DISCUSSION

#### A. Interface circuit

A circuit that bias the device is shown in Fig. 6. For NPN transistor like this structure majority carrier is electron and it is the one that sense to magnetic field. So constant current source has been use to bias base and collector through  $R_B$  and  $R_C$  respectively. Current from both base and collector then will be combined at emitter.

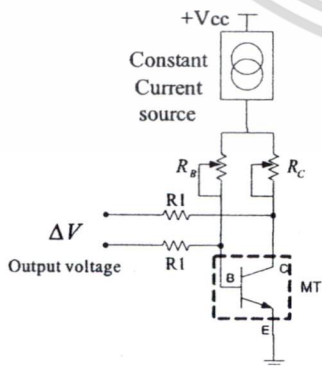


Figure 6. Sensor interface circuit.

If there is no magnetic induction ( $B_z=0$ ) applied to the device (perpendicular to the device surface),  $I_B$  and  $I_C$  will be in constant as well. But when magnetic induction has been applied to the device, Lorentz force will be induced and cause deflection of the both current. This changes the net current on each terminal and lead to voltage change between these two terminals can be express by

$$V_{OUT} = \Delta I_B \cdot R_B - \Delta I_C \cdot R_C \quad (8)$$

where  $\Delta I_B$  and  $\Delta I_C$  is the variation of base and collector current,  $V_{OUT}$  is output voltage.

#### B. Vertical magnetic field response

The response magnetic field in perpendicular direction of the device has been shown in Fig.7 and Fig.8 which come form simulation and experiment results respectively. The simulation curve has been produced by TCAD Sentaurus simulation package. Magnetic field has been applied perpendicular to device surface from 0-0.4 Tesla (0.1 Tesla/step). TTMT and LPMT have been compared. The results show that TTMT has sensitivity of 10.61 mV/T and LPMT has sensitivity of 13.28 mV/T which is 25% improvement when bias at 5 mA.

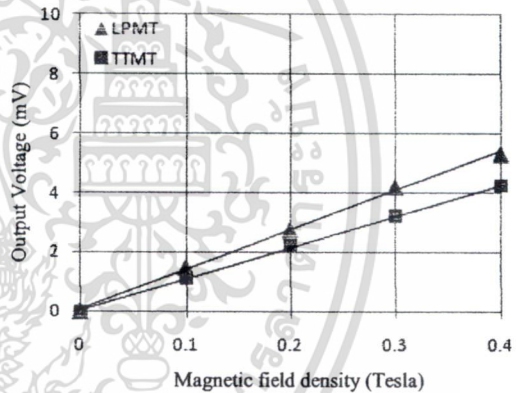


Figure 7. Comparison simulation between the three terminals magnetotransistor and the low power magnetotransistor.

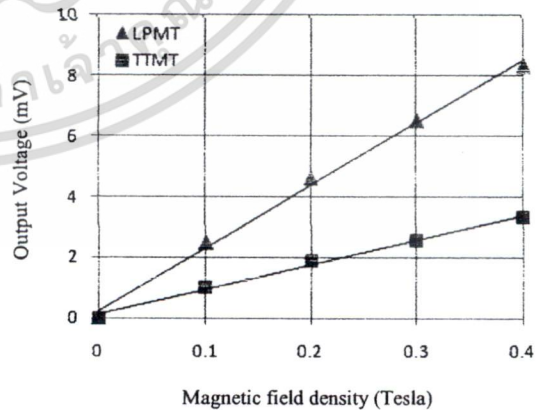


Figure 8. Comparison measured between the three terminals magnetotransistor and the low power magnetotransistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 8 shows experimental results compared performance of TTMT and LPMT which gives sensitivity of 8.14 mV/T for TTMT and 20.64 mV/T for LPMT which has 2.53 time improvement at 5 mA bias current. The experimental results even show more enhance over the simulation results due to limit of virtual space in the simulation which is not represent the real device and more parameter adjustment for simulator is still need to make a good match with the real results.

Fig. 9 shows the response magnetic field in vertical direction ( $B_z$ ) and electron current in  $+x$  direction. Therefore, the resulting Lorentz force and holes deflection will be in  $-y$  direction. As a result, both base and collector current will be changed. The carrier recombination-deflection of  $\Delta I_{CB}$  can cause the output voltage to magnetic field will be higher. The increases in magnetic field density can cause larger electron deflection, and therefore, larger difference between the two currents.

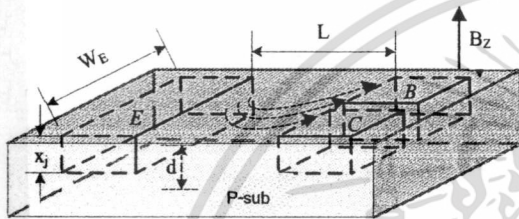


Figure 9. Carrier deflection (electron) in response to vertical magnetic field.

#### C. The effect of emitter current

Fig. 10 shows the vertical magnetic field output voltage response at emitter bias current of 0.4, 0.6, 0.8, 1, 3 and 5 mA. The magnetic field density was varied in the range of 0 to 0.4 Tesla. From the result, it shows monotonic increase of output response as a function of field density. Furthermore, at the same field density, the output voltage and sensitivity also increase as a function of emitter current.

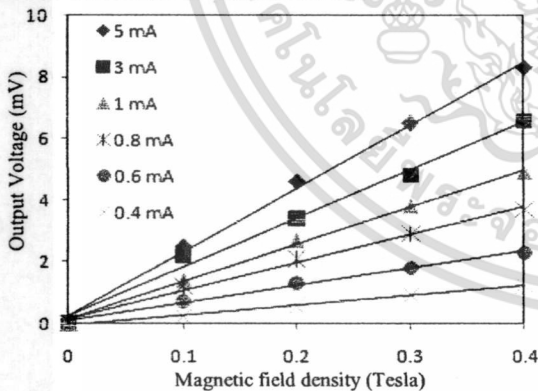


Figure 10. Vertical magnetic field response as a function of emitter.

Table I shows a comparison of magnetic field sensitivity with different low emitter current. The relative sensitivity can be calculated according to (7). The results show that the sensitivity increase as a function of emitter current since it increases the amount of injected carrier from emitter and also that of deflected carrier.

TABLE I Comparison of magnetic field sensitivity with difference emitter current.

$I_E$ (mA)	$S_A$ (mV/T)
0.4	3.13
0.6	5.74
0.8	9.12
1.0	12.25
3.0	15.80
5.0	20.64

Experimental results also describe increasing of device's sensitivity depend on increment of bias current as shown in Fig. 11. Moreover the results show good linearity of the output signal device versus applied magnetic field. As we can see from table I, which compared calculated sensitivity of both devices, with same sensitivity on both device, LPMT need lower bias current which is about 85% reduction from TTMT's consumption.

#### IV. CONCLUSION

The low Power Magnetotransistor (LPMT) is a magnetic sensing device developed from the three terminals magnetotransistor (TTMT) which based on the same CMOS processing technology designed for integrated circuit compatible. Additional feature of LPMT that make it different from TTMT is LOCOS implementation to surround emitter region. This aims to reduce leakage current around emitter area hence this can enhance device's sensitivity and reduce device's bias current for normal operation. From the experimental results found that LPMT has higher sensitivity than TTMT. This is an advantage of LPMT since it can be operated at comparable performance with TTMT but used 85% lower bias current than TTMT. Furthermore it has good linearity of output voltage versus applied magnetic field which is good for many applications.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Thai Microelectronic center and the Department of Electronic, KMITL. Author T.Phetchakul, would like to thank the Thailand Research Fund.

#### REFERENCES

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology," *Circuit Syst* (1989) 701-704.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals," *Sensors and Actuators A*, 58 (1997) 137-140.
- [3] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device," *IEEE Electron Devices Lett*, vol. EDL-5, pp.357-358, 1984
- [4] Lj. Ristic, T. Smy, H.P. Baltes, "A lateral magnetotransistor structure with linear response to the magnetic field," *IEEE Trans. Electron. Dev.* ED-36 (1989) 1076-1089.
- [5] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," *IEEE Trans. Electron Device*, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# NECTEC Technical Journal

ISSN 1513-2145

An Elastic Animation Render Farm on Cloud Computing Using Open Source Software <i>Ekasit Kijisipongse, Suriya U-ruekolan, and Sornthep Vannarat</i>	1
Binomial Distribution Classifying Habitat Type using Atmospheric Data from Field Sensor in Thailand Cloud Forest <i>Wittaya Pheera, Peerasak Sangarun, Mullica Jaroensutasinee, and Krisanadej Jaroensutasinee</i>	7
Dissolved Oxygen Level Monitoring in Shrimp Aquaculture using Embedded System <i>Kamol Kaemarungsi, Khongpan Rungprateepthaworn, Sommai Chokrung, Supatra Manatrinon, Prachumpong Dangsakul, Jakkaphob Intha, Anuchit Leelayutho, Thanika Duangtanoo, Phisanu Duangtanoo, Witsarawat Chantaweksomboon, Charuwalee Huadmai, and Rachaporn Kienprasi</i>	15
Evaluation of Quadratic Surface Descriptors for Computational Reassembling of Archaeological Artifacts <i>Udomchai Techavipoo, Sanparith Marukatat, and Thitiporn Chanwimaluang</i>	21
Load Balancing in Indexing for Content-based Video Search on Peer-to-Peer Networks <i>Chaiyut Praditong-ngam and Juggapong Natwichai</i>	25
Necessary Condition for Underground Hypocentre Location When Using The Least Square Error Approach <i>Songkord Thirachai and Jittiwut Suwatthikul</i>	33
Optimizing Weight Factors in Multi-Objective Geometric Programming <i>Theerachet Soorapanth</i>	37
Sea Surface Temperature and Its Anomaly in The Gulf of Thailand and The Andaman Sea <i>Peeravit Koad, Mullica Jaroensutasinee, and Krisanadej Jaroensutasinee</i>	43
Simulated Studies of Well and Channel Engineering for 0.8 $\mu\text{m}$ Buried Channel PMOSFET <i>Anucha Ruangphanit, Surasak Niemcharoen, Nopphon Phongphanthra, and Amporn Poyai</i>	51
Synthesis, Characterization, and Photocurrent of $\text{TiO}_2$ Nanotubes Growth in Mixed Electrolytes <i>Pacharee Krongkitsiri, Udom Tipparach, Supakorn Phukird, and Khanchai Tunlasakun</i>	56
Time Series Analysis of Dengue Fever in Northeastern Thailand <i>Siriwan Wongkoon, Mullica Jaroensutasinee, and Krisanadej Jaroensutasinee</i>	61
Total Sliding Mode Position Control of a Linear Variable Reluctance Motor <i>Ruchao Pupadubsin, Nattapon Chayopitak, Niyom Nulek, Suebsuang Kachapornkul, Praon Jitkreeyam, Pakasit Somsiri, and Kanokvate Tungpimolrut</i>	67
Web Server Anomaly Detection using Principle Component Analysis <i>N. Sukityam, P. Tangamchit, C. Issariyapat, and P.Pongpaibool</i>	73
กระบวนการจัดการการเปลี่ยนแปลงและเครื่องมือสนับสนุนตามหลักการของ CMMI <i>วีระชัย จันทร์สุด, นิธิภัทร ว่องชิงชัย และอภิณหพร เมธาวัชรนันนที</i>	78
การตรวจคุณภาพเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เทคนิคการประมวลผลเชิงภาพดิจิทัล <i>กรรณทิพย์ กิรติรัตน์พุกษ์ และวศิน ลินธุภิญโญ</i>	86
การแบ่งส่วนภาพรังสีเอกซ์ของฟันด้วยการแปลงเวฟเล็ท <i>นศินทร พัฒนชัย, นงลักษณ์ โค้ววาริสารัช และจันทร์จิรา ลินทะนะโยธิน</i>	91

**ผลของระยะเบี่ยงเบนและความกว้างการฉีดพาหะต่อความไวของแมกนีโตทรานซิสเตอร์**  
**The Deflection Length and Injection Width on the Sensitivity of Magnetotransistor**

ปัญญากร โสדתพิชัย<sup>1</sup>, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล<sup>1</sup>, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์<sup>2</sup>, พุทธิพล เฟื่องพัด<sup>2</sup>, นริชพันธ์ เป็นผลดี<sup>2</sup>,  
 อาคม ศรีหาแพท<sup>2</sup>, ชาญเดช หรูนันต์<sup>2</sup> และอัมพร โพธิ์ไชย<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

E-mail: panyakon\_s@hotmail.com

**ABSTRACT** – This paper present a study deflection length and emitter width effect on the sensitivity of magnetotransistor. The magnetotransistor can detect vertical magnetic field density and the structure consist emitter, base and collector on p-substrate. The device can detect magnetic field by Hall Effect theory and carrier deflection cause to difference between base and collector current ( $\Delta I_{CB}$ ) so relate magnetic field ( $B_z$ ). From experiment compare emitter width 4, 5 and 10 micrometer at deflection length 10 and 20 micrometer. The result at increase emitter width cause sensitivity decrease and the deflection length 20 micrometer is the best sensitivity. The data result can develop magnetotransistor for high sensitivity and performance.

**KEY WORDS** – Magnetotransistor, Injection Width, Deflection length.

**บทคัดย่อ** – บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลของระยะเบี่ยงเบนและความกว้างพื้นที่การฉีดพาหะของอิมิตเตอร์ที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยศึกษาออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วย อิมิตเตอร์, เบส และคอลเลคเตอร์ บนฐานรองชนิดพี อุปกรณ์สามารถตรวจสอบสนามแม่เหล็กได้โดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ คือการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) โดยในการทดลองหาค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กนี้ ทำการออกแบบให้พื้นที่การฉีดพาหะของอิมิตเตอร์เท่ากับ 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร และระยะเบี่ยงเบน 10 และ 20 ไมโครเมตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อพื้นที่การฉีดพาหะเพิ่มขึ้น ทำให้ความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กลดลง และความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 20 ไมโครเมตร มีค่ามากกว่าที่ระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตร เมื่อให้ความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะเท่ากันและไบอัสที่กระแสเท่ากัน ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไป

**คำสำคัญ** – แมกนีโตทรานซิสเตอร์, ความกว้างการฉีดพาหะ, ระยะเบี่ยงเบน.

### 1. บทนำ

เซนเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์ที่สำคัญสองอย่างคือ (1) ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เช่น แมกนีโตไดโอด, แมกนีโตทรานซิสเตอร์ เป็นต้น และ (2) ปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetoresistive Effect) เช่น Giant Magnetoresistance (GMR) ที่ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น ในปัจจุบันเซนเซอร์แม่เหล็กได้มีการพัฒนาให้มีโครงสร้างที่หลากหลายมาก ตามแต่วัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน ซึ่งผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ได้นั้นแตกต่างกันออกไป โดยเซนเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ได้มีบทบาทและถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วงที่กว้าง, ค่าความไวในการตอบสนองสูง, สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิและความถี่ที่กว้าง, สามารถสร้างและใช้ร่วมกับวงจรรวมได้ [1]

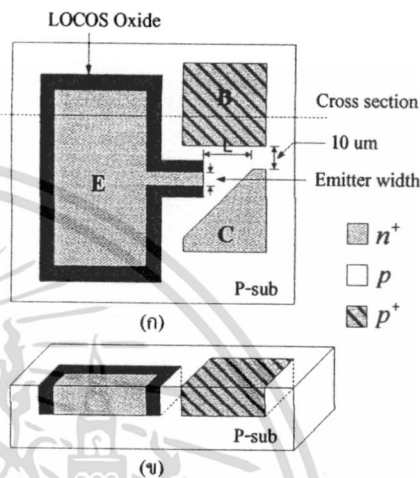
บทความนี้นำเสนอเซนเซอร์แม่เหล็กชนิดแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลในแนวนอน (Lateral Magnetotransistor) ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection) เนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) รวมทั้งทำการศึกษา ออกแบบและสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ระยะเบี่ยงเบนและความกว้างของอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างอิมิตเตอร์กับความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก อีกทั้งทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไบอัสอิมิตเตอร์และค่าแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ [1-3]

## 2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

### 2.1 โครงสร้างอุปกรณ์

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนที่มีโครงสร้างแบบ เอ็น-พี-เอ็น (NPN) ซึ่งประกอบขึ้นด้วย อิมิตเตอร์ (E), เบส (B) และคอลเลคเตอร์ (C) ที่สร้างขึ้นบนฐานรองชนิดพี (P-substrate) และมีชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ซึ่งถูกสร้างขึ้นล้อมรอบอิมิตเตอร์ โดยพื้นที่การฉีดพาหะของอิมิตเตอร์ (Emitter width:  $W_E$ ) ออกแบบให้มีขนาด 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร สำหรับระยะเบี่ยงเบน

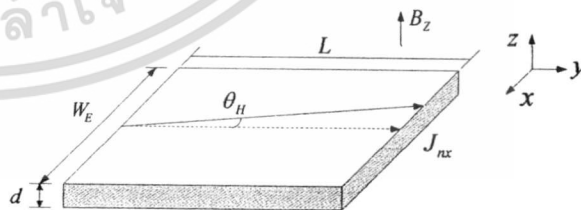
(Deflection length : L) ออกแบบให้มีขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตร และระยะระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์มีขนาด 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 1 รูปแบบโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) ด้านบน (Top view) และ (ข) ด้านตัดขวาง (Cross section)

### 2.2 หลักการทำงาน

การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ตามหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ดังรูปที่ 2 แสดงให้เห็นพื้นที่การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีกระแสพาหะอิเล็กตรอนคือ  $J_{nx}$ , พื้นที่การฉีดพาหะคือ  $W_E$ , ระยะการเบี่ยงเบนคือ L และมุมเบี่ยงเบนคือ  $\theta_H$  โดยสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) มีทิศตั้งฉากกับระนาบของฐานรอง



รูปที่ 2 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (อิเล็กตรอน)

โดยกระแสอิมิตเตอร์เป็นผลรวมของกระแสเบส ( $I_B$ ) กับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 1 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสพาหะ (Carrier density) ดังสมการที่ 2

$$I_E = I_B + I_C \quad (1)$$

$$I_E = J_{nx} \cdot W_E \cdot d \quad (2)$$

โดยที่  $J_{nx}$  คือความหนาแน่นกระแสพาหะอิเล็กตรอนในอิมิตเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2 โดยที่  $I_E$  คือกระแสอิมิตเตอร์,  $W_E$  คือความกว้างของอิมิตเตอร์ และ  $d$  คือความหนาแน่นของอิมิตเตอร์

เมื่อ  $J_{nx}$  คือความหนาแน่นกระแสพาหะ,  $W_E$  คือความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะ และ  $d$  คือความลึกของรอยต่อ (Junction depth)

ในภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก กระแสพาหะเคลื่อนที่ตามแนวเส้นประ แต่เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ ( $B_z$ ) ในทิศทางตั้งฉาก ส่งผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องจากแรงลอว์เรนซ์ ไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม  $\theta_H$  โดยมุมของการเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่า mobility ( $\mu_n$ ) และค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ (3)

$$\tan \theta_H = \mu_n \cdot B_z \quad (3)$$

การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนั้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4

$$\Delta I_{CB} = J_{nx} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_H \quad (4)$$

โดยสมการแสดงความไวของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) เขียนได้สองแบบ คือ 1.ค่าความไวสัมพัทธ์ (Relative sensitivity,  $S_R$ ) และ 2.ค่าความไวสัมบูรณ์ (Absolute sensitivity,  $S_A$ ) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_z} \quad (5)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \quad (6)$$

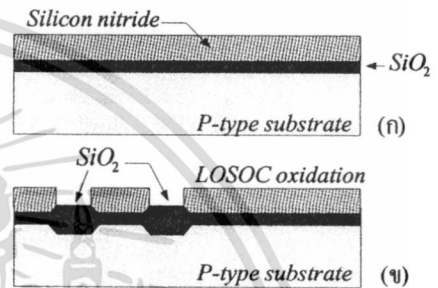
เมื่อ  $\Delta V$  คือการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ที่แสดงในรูปของค่าแรงดันไฟฟ้า

### 3. การบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

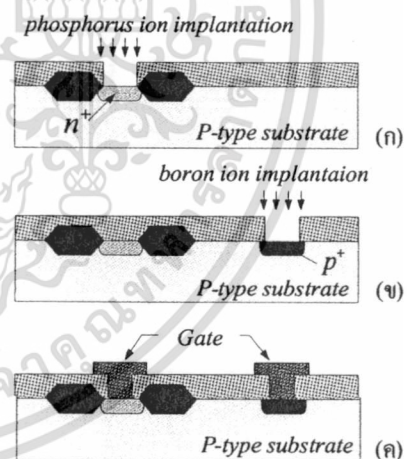
สำหรับกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์นั้น อาศัยเทคโนโลยีกระบวนการผลิตแบบซิมอส (CMOS process) โดยเริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดพี สภาพความต้านทาน 2-4  $\Omega$ -cm สร้างซิลิคอนไดออกไซด์และทำการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ดังรูปที่ 3 (ก) จากนั้นใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องสำหรับการสร้างชั้นออกไซด์หนาดังรูปที่ 3(ข)

จากนั้นทำการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องสำหรับการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสเพื่อสร้างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ดังรูปที่ 4(ก) และกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องสำหรับสร้างขั้วเบสจากการยิงฝังประจุโบรอนดังรูปที่ 4(ข) ต่อมาใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องคอนแทคและทำการสร้างชั้นฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างขั้วโลหะ จากนั้นทำการ Passivation ด้วยชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์และกระบวนการสุดท้ายเป็นการสร้างขั้วโลหะสำหรับต่อใช้งานซึ่งแสดงดังรูปที่ 4(ค) และรูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

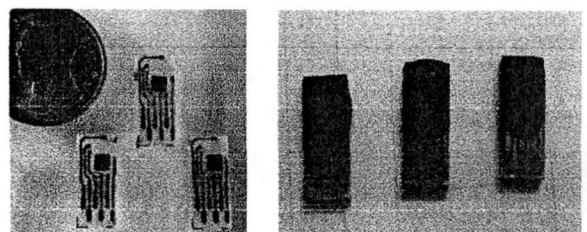
ลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องคอนแทคและทำการสร้างชั้นฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างขั้วโลหะ จากนั้นทำการ Passivation ด้วยชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์และกระบวนการสุดท้ายเป็นการสร้างขั้วโลหะสำหรับต่อใช้งานซึ่งแสดงดังรูปที่ 4(ค) และรูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์มฟิล์มบาง (ก) ซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนไนไตรด์และ (ข) ชั้นออกไซด์หนา



รูปที่ 4 การสร้างขั้วอิมิตเตอร์, เบส และคอลเลกเตอร์ (ก) การยิงฝังประจุฟอสฟอรัส, (ข) การยิงฝังประจุโบรอน และ(ค) การสร้างขั้วโลหะสำหรับต่อใช้งาน

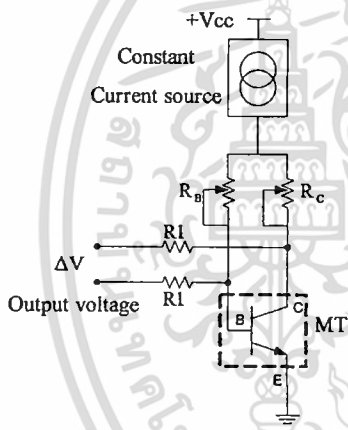


รูปที่ 5 ภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว (ก) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ติดตั้งในแผ่นลายวงจร และ (ข) หลังการเคลือบเบรซิ่ง

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 วงจรการวัดผล

วงจรวัดผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 เป็นวงจรที่ใช้สำหรับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างชนิด NPN ซึ่งพาหะส่วนมากที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กคือ อิเล็กตรอน โดยวงจรประกอบไปด้วยส่วนของ แหล่งจ่ายกระแสคงที่สำหรับให้ไบอัสขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  และ  $R_C$  ตามลำดับ โดยที่กระแสเบส ( $I_B$ ) และกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) จะรวมตัวกันเกิดเป็นกระแสอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ) ส่วนค่าแรงดันออกเฟสสามารถปรับเป็นศูนย์ได้โดยการปรับ  $R_B$  และ  $R_C$  ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์  $\Delta I_{CB}$  อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า  $\Delta V$



รูปที่ 6 วงจรวัดผลการทดลอง

สมการที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า ( $V_{out}$ )

$$V_{out} = \Delta I_B \cdot R_B - \Delta I_C \cdot R_C \quad (7)$$

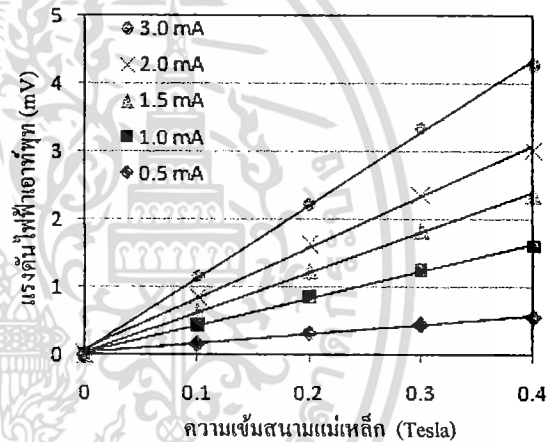
เมื่อ  $\Delta I_B$  และ  $\Delta I_C$  คือการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ตามลำดับ

4.2 การสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งที่ระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตร ( $L = 10 \mu m$ )

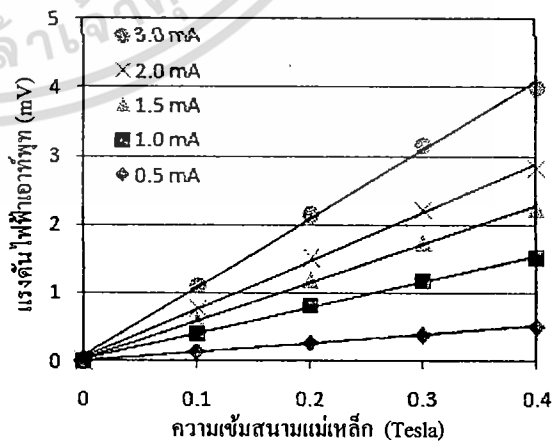
ในการวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยจ่ายกระแสไบอัส 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 มิลลิแอมป์ และเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่าง 0-0.4 เทสลา (ปรับที่ละ 0.1 เทสลา)

จากรูปที่ 7 แสดงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ในรูปการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตรและมีความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะเท่ากับ 4 ไมโครเมตร

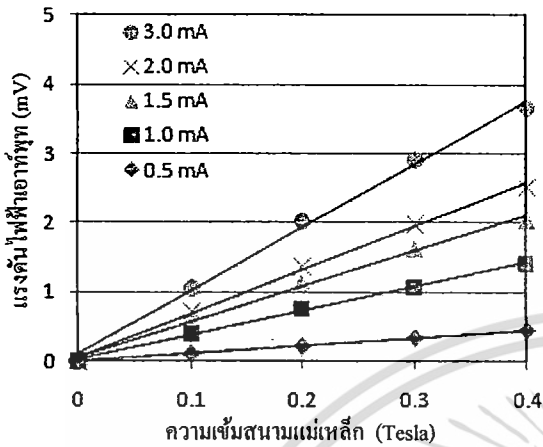
รูปที่ 8 และ 9 แสดงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ในรูปการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตร และมีความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะเท่ากับ 5 และ 10 ไมโครเมตรตามลำดับ



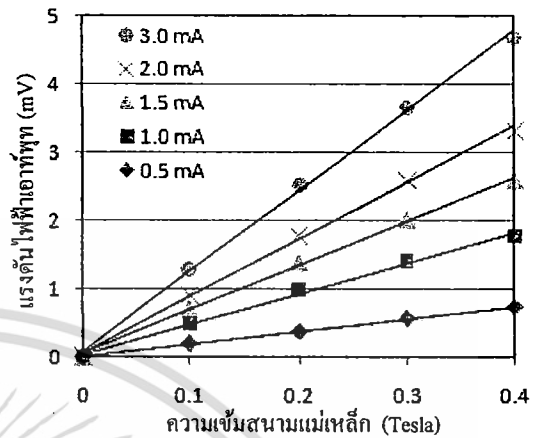
รูปที่ 7 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตร และความกว้างของอิมิตเตอร์ 4 ไมโครเมตร



รูปที่ 8 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตร และความกว้างอิมิตเตอร์ 5 ไมโครเมตร



รูปที่ 9 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตร และความกว้างอิมิตเตอร์ 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 10 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 20 ไมโครเมตร และความกว้างอิมิตเตอร์ 4 ไมโครเมตร

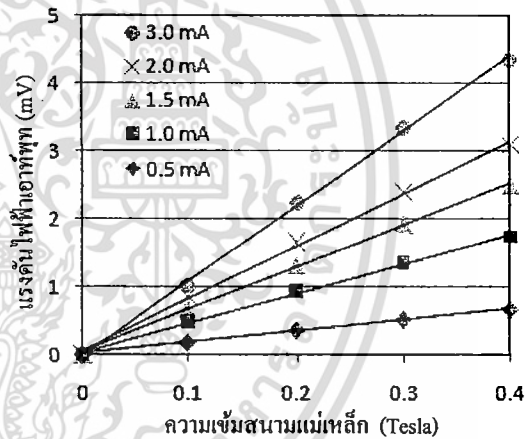
ตารางที่ 1. การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีพื้นที่การฉีดพาระยะต่างๆ ที่  $L = 10 \mu\text{m}$

กระแสไบอัส (mA)	ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (mV/T)		
	W = 4 $\mu\text{m}$	W = 5 $\mu\text{m}$	W = 10 $\mu\text{m}$
0.5	1.41	1.27	1.13
1.0	4.04	3.83	3.51
1.5	5.92	5.61	5.12
2.0	7.52	7.08	6.29
3.0	10.75	10.04	9.18

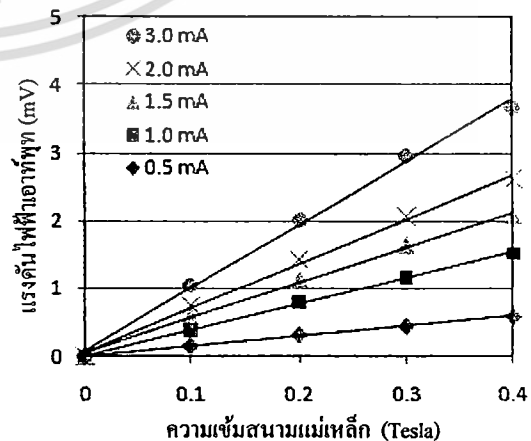
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่คำนวณ ได้ตามสมการที่ 6 ที่มีระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตร และมีความกว้างของพื้นที่การฉีดพาระยะเป็น 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร เมื่อให้กระแสไบอัสค่าแตกต่างกัน

#### 4.3 การสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งที่ระยะเบี่ยงเบน 20 ไมโครเมตร ( $L = 20 \mu\text{m}$ )

รูปที่ 10, 11 และ 12 แสดงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีระยะเบี่ยงเบนพาระยะ 20 ไมโครเมตร และมีความกว้างของพื้นที่การฉีดพาระยะเป็น 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 11 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 20 ไมโครเมตร และความกว้างอิมิตเตอร์ 5 ไมโครเมตร



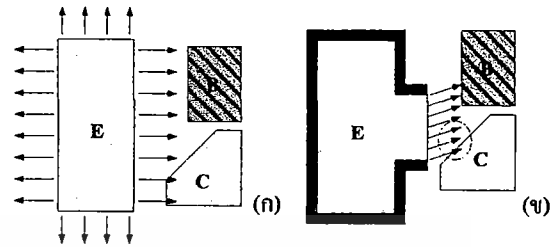
รูปที่ 12 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 20 ไมโครเมตร และความกว้างอิมิตเตอร์ 10 ไมโครเมตร

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีระยะเบี่ยงเบน 20 ไมโครเมตร และมีความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะเป็น 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร เมื่อให้กระแสไบอัสค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 2. การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีพื้นที่การฉีดพาหะค่าต่างๆ ที่  $L = 20 \mu\text{m}$

กระแสไบอัส (mA)	ความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็ก (mV/T)		
	$W = 4 \mu\text{m}$	$W = 5 \mu\text{m}$	$W = 10 \mu\text{m}$
0.5	1.85	1.65	1.47
1.0	4.49	4.36	3.83
1.5	6.49	6.23	5.21
2.0	8.34	7.72	6.57
3.0	11.77	11.05	9.28

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 และ 2 พบว่า 1. ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้กระแสไบอัสเพิ่มขึ้น 2. เมื่อพิจารณาที่กระแสไบอัสค่าเท่ากัน พบว่าค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มีค่าลดลงเมื่อความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะ ( $W_p$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะมีผลต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ และ 3. เมื่อพิจารณาที่ความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะค่าเดียวกันและให้กระแสไบอัสเท่ากัน พบว่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 20 ไมโครเมตร มีค่ามากกว่าที่ระยะเบี่ยงเบน 10 แสดงว่าระยะเบี่ยงเบนพาหะมีส่วนต่อค่าความไวของต่อสนามแม่เหล็กเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 13 โดยรูปที่ 13(ก) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะในทุกพื้นที่จากอิมิตเตอร์ ซึ่งชั้นออกไซด์หนาที่ถูกรังขึ้นล้อมรอบอิมิตเตอร์มีส่วนช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของพาหะทางด้านข้างที่สามารถทำให้เกิดเป็นกระแสรั่วที่ทำให้ความไวในการตอบสนองน้อยลงได้ และรูปที่ 13(ข) แสดงการเลี้ยวเบนของพาหะขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แสดงให้เห็นว่าพื้นที่การฉีดพาหะของอิมิตเตอร์ขนาดที่กว้างทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะไม่สามารถเบี่ยงเบนจากคอลเลคเตอร์ไปยังเบสได้ทำให้ค่าแรงดันเอาท์พุทและค่าความไวมีค่าต่ำลง ดังนั้นเมื่อระยะเบี่ยงเบน ( $L$ ) เพิ่มขึ้นทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะสามารถเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความไวเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 13 การเคลื่อนที่ของพาหะจากอิมิตเตอร์ (ก) การเคลื่อนที่ของพาหะทางด้านข้างที่มีผลต่อกระแสรั่ว และ (ข) การเบี่ยงเบนพาหะที่ไม่สามารถเปลี่ยนจากคอลเลคเตอร์เป็นถึงเบสได้

### 5. สรุปผลการทดลอง

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ได้ จากการทดลองพบว่า 1.การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทสูงขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น 2. ค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มีค่าลดลงเมื่อความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะ ( $W$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น และ 3. ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบน 20 ไมโครเมตร มีค่ามากกว่าที่ระยะเบี่ยงเบน 10 ไมโครเมตร เมื่อให้ความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะเท่ากันและไบอัสที่กระแสเท่ากัน ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถนำไปพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไป

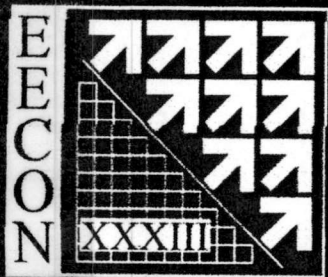
### เอกสารอ้างอิง

[1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology", *Circuit Syst* (1989) 701-704.

[2] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun and A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination – Deflection Effect", *IEEE Sensor-Journal*, Vol.10, no.2, pp. 294-299, 2010.

[3] P. Sottip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun and A. Poyai, "The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology", *ECTI-CON Association*, pp.219, 2010.

ไม่วารณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



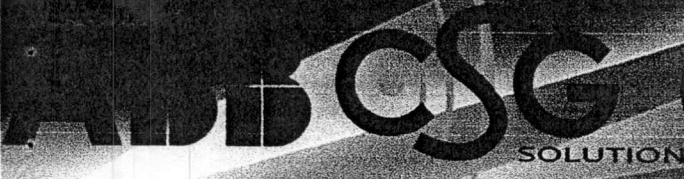
# การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-33)

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- ไฟฟ้านิวทริกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)



ร่วมจัดโดย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



# การศึกษาสัมประสิทธิ์และการชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ A Study of Temperature Coefficient and Compensation of Magnetotransistor

อากม ศรีหาแพท<sup>1</sup>, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์<sup>1</sup>, พุทธิพล เฟื่องพัด<sup>1</sup>, นริชพันธ์ เป็นผลดี<sup>1</sup>, ชาญเดช หอรอนันต์<sup>1</sup>,  
อัมพร โพธิ์ไช<sup>1</sup>, ปัญญากร โสตกพิท<sup>1</sup> และ เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

51/4 หมู่ที่ 1 วังคะเคียน อำเภอมือง ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9

<sup>2</sup> สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2326-4550

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของอุณหภูมิและวิธีการชดเชยอุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) จากการทดสอบวัดค่าแรงดันเอาท์พุทของอุปกรณ์ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25-125 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นและมีค่าสูงเท่ากับ 7.9 mV/C เปรียบเทียบกับค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของตัวอุปกรณ์ที่มีค่า 0.25 mV/Gauss ทำการทดลองการชดเชยอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์และอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ พบว่าอุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งแตกต่างจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีสมการชดเชยอุณหภูมิที่เป็นเชิงเส้นที่ดีมีความคลาดเคลื่อน 1.1 % เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆต่อไป

คำสำคัญ: อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก, การชดเชยอุณหภูมิ

## Abstract

This paper presents temperature coefficient study of magnetic sensors which is a structure of magnetotransistor (MT). Off-set voltage of the device was tested on temperature range from 25-125°C. The temperature coefficient in this range shows good linearity and has a value of 7.9mV/C. When compare it with device's sensitivity which is 0.25mV/Gauss. The experiments compare temperature compensation method between using thermistor and magnetotransistor as a temperature compensation device. The result shows thermister non-linearity compensated function but magnetotransistor as a thermal sensor itself shows good linearity and the error less than 1.1 % which will be suitable for field application.

Keywords: Magnetotransistor, Temperature coefficient

## 1. บทนำ

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เช่น แมกนีโตไดโอด, แมกนีโตทรานซิสเตอร์, อุปกรณ์แมกเฟลด์ เป็นต้น [1] แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีบทบาทและถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถสร้างและใช้ร่วมกับวงจรรวมได้ แต่เนื่องจากอาศัยเทคโนโลยีการสร้างชิปที่ขึ้นอยู่กับพื้นฐานของวัสดุซิลิคอนจึงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น แสง, อุณหภูมิ, รั้งสี เป็นต้น [1-4] เป็นผลให้อุปกรณ์มีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กน้อยลงและก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนมากขึ้น ดังนั้นการนำอุปกรณ์เพื่อมาชดเชยจึงเป็นสิ่งจำเป็น และค่าที่ได้จากสมการการชดเชยถูกใช้เป็นตัวตั้งต้นของการวัดค่าสนามแม่เหล็กในแต่ละครั้ง ณ อุณหภูมินั้นๆ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและวิธีการชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection) เนื่องจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) ด้วยวิธีการชดเชยอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิชนิดตัวต้านทาน (Thermister) และการชดเชยด้วยโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ต่อร่วมกันสองตัว เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันเอาท์พุทแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในสภาวะการทำงานปกติ

## 2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์และหลักการทำงาน

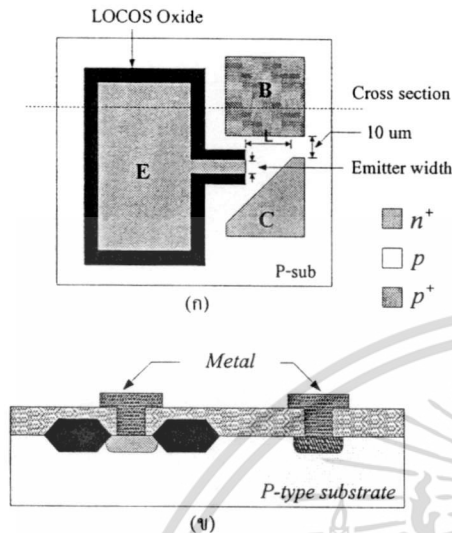
### 2.1 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แสดงรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 1 เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็น-พี-เอ็น ชนิดกระแสไหลตามแนวอน ซึ่งประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และคอลเลคเตอร์ C สร้างขึ้นบนฐานรองชนิดพี (P-substrate) และชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ถูกสร้างขึ้นล้อมรอบอิมิตเตอร์ โดยพื้นที่การฉีดพาหะของอิมิตเตอร์ (Emitter width) ออกแบบให้มีขนาด 5 ไมโครเมตร ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



ระยะความกว้างเบส (L) ให้มีขนาด 20 ไมโครเมตรและระยะระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์ มีขนาด 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 1 รูปแบบโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง

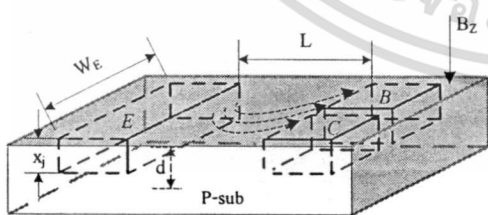
## 2.2 หลักการทำงาน

การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์อาศัยการเคลื่อนที่เพียงบนของพาหะเนื่องจากความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ตามหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) โดยกระแสอิเล็กตรอนเป็นผลรวมของกระแสเบส ( $I_B$ ) กับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 1 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสพาหะ (Carrier density) ได้ดังสมการที่ 2 [5]

$$I_E = I_B + I_C \quad (1)$$

$$I_E = J_{nx} \cdot W_E \cdot d \quad (2)$$

เมื่อ  $J_{nx}$  คือความหนาแน่นกระแสพาหะ,  $W_E$  คือความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะอิเล็กตรอน และ  $d$  คือความลึกของรอยต่อ (Junction depth)



รูปที่ 2 การเคลื่อนที่เพียงบนของพาหะอิเล็กตรอน [5]

ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์  $\Delta I_{CB}$  ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง ( $B_z$ ) มีผลให้พาหะเคลื่อนที่ในแนวแกน y และเพียงบนในมุม  $\theta_{Hy}$  สมการความสัมพันธ์

แสดงได้ตามสมการที่ 3 และมุมการเบี่ยงเบนสามารถหาได้ตามสมการ  $\tan \theta_{Hy} = \mu \cdot B_z$  [5-6]

$$\Delta I_{CB(v)} = J_{nx} \cdot d \cdot \Delta W_E \quad (3)$$

โดยที่  $\Delta W_E = \Delta Y = \mu \cdot L \cdot B_z$  (4)

แทนสมการที่ 4 ในสมการที่ 3 สามารถหาสมการ  $\Delta I_{CB(v)}$  ดังสมการที่ 5

$$\Delta I_{CB(v)} = J_{nx} \cdot d \cdot L \cdot \mu \cdot B_z \quad (5)$$

โดยที่  $\mu$  สภาพความคล่องตัวของพาหะ และ  $B_z$  คือค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

ในสมการความสัมพันธ์นั้นแสดงให้เห็นว่าเอาท์พุทของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอุปกรณ์, ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและสภาพความคล่องตัวของพาหะ ซึ่งค่าสภาพความคล่องตัวนี้มีผลต่อปัจจัยของอุณหภูมิภายนอกตามสมการความสัมพันธ์  $\mu$ แปรผัน  $T^{-2.5}$  เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอกสามารถทำให้แรงดันเอาท์พุทไม่คงที่, สามารถเพิ่มแรงดันออฟเซต และมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ได้ โดยสมการที่ 6 แสดงสมการค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_z} \quad (6)$$

เมื่อ  $\Delta B$  คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

## 3. การทดลองและผลการทดลอง

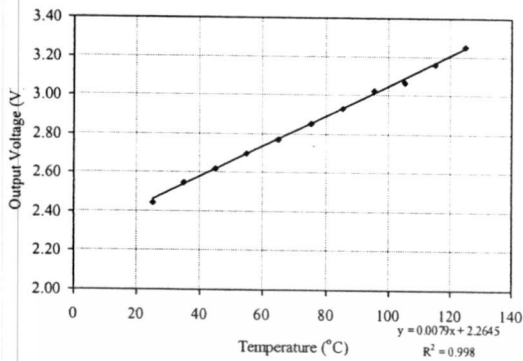
### 3.1 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่คล้ายกับโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งค่า built-in voltage ของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามความสัมพันธ์ที่ 7

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{p_{po}}{p_{no}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{n_{no}}{n_{po}} \right) \quad (7)$$

โดยที่  $k$  คือค่าคงที่ของ Boltzmann  $T$  คือค่าอุณหภูมิหน่วยเป็นเคลวิน  $q$  คือค่าประจุไฟฟ้ที่อิเล็กตรอนและ  $p_{po}, p_{no}, n_{no}$  และ  $n_{po}$  คือค่าความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนที่อยู่ในแต่ละส่วนของรอยต่อ

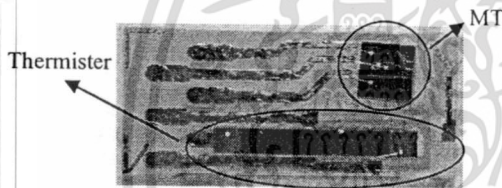
รูปที่ 3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทและอุณหภูมิ โดยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ซึ่งคำนวณได้จากค่าความชันของสมการเส้นตรงตัวแทนมีค่าเท่ากับ 7.9 mV/C ที่อัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1000 เท่า



รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

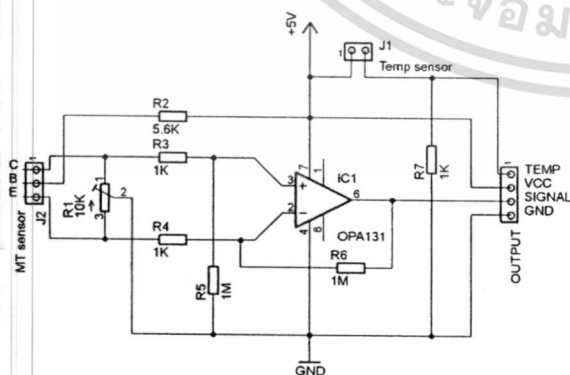
### 3.2 การชดเชยอุณหภูมิแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยอุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์

รูปที่ 4 แสดงรูปถ่ายอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์และเทอร์มิสเตอร์ที่ติดอยู่บนแผ่นลวดวงจรเดียวกัน เพื่อใช้ในการสร้างระบบการชดเชยอุณหภูมิให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยใช้เทอร์มิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ



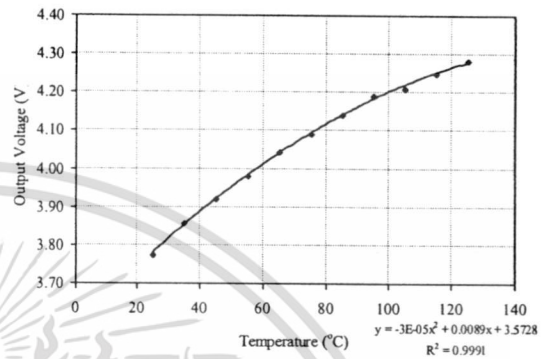
รูปที่ 4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์และเทอร์มิสเตอร์บนแผ่นลวดวงจร

รูปที่ 5 แสดงวงจรของระบบชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณสำหรับตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์และวงจร half bridge สำหรับเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าขาออกของตัวเทอร์มิสเตอร์ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าขาออกของทั้งแมกนีโตทรานซิสเตอร์และเทอร์มิสเตอร์ถูกนำไปคำนวณหาค่าความสัมพันธ์เพื่อใช้เป็นสมการชดเชยอุณหภูมิต่อไป



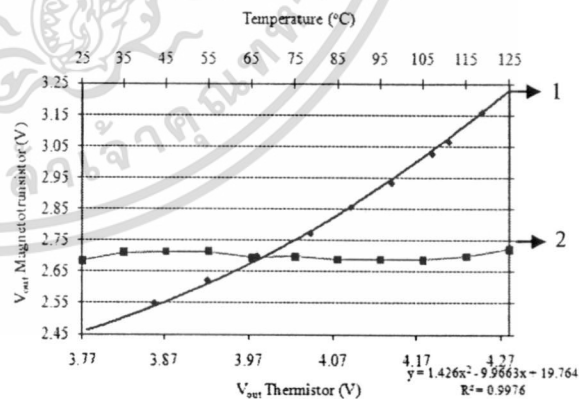
รูปที่ 5 วงจรวัดผลสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยอุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 25-125 °C และทำการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ ซึ่งจากกราฟการทดลองแสดงความชันของกราฟเป็นแบบพหุนาม  $y = -3E-05x^2 + 0.0089x + 3.5728$  ที่  $R^2 = 0.9991$



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์

จากกราฟสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์แสดงให้เห็นว่าความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์ส่งผลให้สมการการชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้เทอร์มิสเตอร์เป็นตัววัดอุณหภูมิแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงที่รูปที่ 7 ซึ่งจากกราฟการทดลองเส้นที่ 1 แสดงความชันของกราฟเป็นแบบพหุนาม เช่นเดียวกับเทอร์มิสเตอร์ตัวเดียว  $V_{out Mag} = 1.426(V_{out Temp})^2 - 9.9663(V_{out Temp}) + 19.764$  ที่  $R^2 = 0.9976$  กราฟเส้นที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์และเทอร์มิสเตอร์ภายหลังการชดเชยที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งกราฟที่ได้ไม่เป็นลักษณะแนวเส้นตรงมีความคลาดเคลื่อนสูง



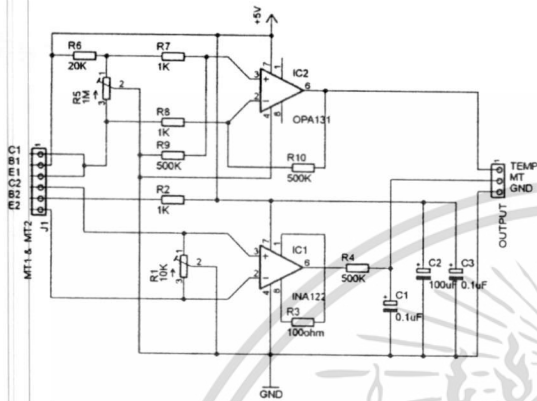
รูปที่ 7 การชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์-เทอร์มิสเตอร์

### 3.3 การชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์

เนื่องจากสมการชดเชยที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ให้ค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงดังนั้นมีการปรับใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์มาใช้

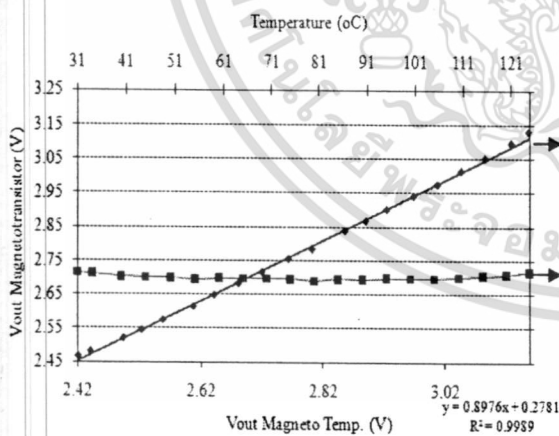
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

วัดอุณหภูมิเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ แสดงค่าความเป็นเชิงเส้นที่ดี (จากหัวข้อ 3.1) แต่กรณีที่นำแมกนีโตทรานซิสเตอร์มาใช้วัดเฉพาะอุณหภูมินั้นต้องออกแบบวงจรไบอัส กระแสที่ไม่เป็นผลให้อุปกรณ์สามารถตรวจวัดสนามแม่เหล็กได้ดังแสดง ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 วงจรไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

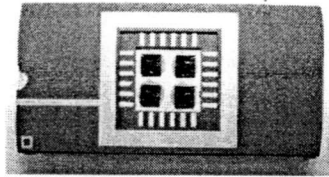
จากรูปเห็นได้ว่าขาสัญญาณทั้งสองข้างของตัวอุปกรณ์ถูกนำมาต่อเชื่อมกันเพื่อหักล้างการเปลี่ยนแปลงแรงดันระหว่างขาสัญญาณทั้งสองขาในกรณีที่อยู่ที่ภายใต้สนามแม่เหล็กรูปที่ 9 แสดงค่าความสัมพัทธ์ของสมการชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งมาเป็นตัววัดอุณหภูมิ (กราฟเส้นที่ 1) และแสดงกราฟภายหลังการชดเชยอุณหภูมิที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ซึ่งเห็นว่ากราฟภายหลังการชดเชย (กราฟเส้นที่ 2) มีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ 1.1%



รูปที่ 9 การชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์

จากรูปสมการชดเชยอุณหภูมิของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นตัววัดอุณหภูมินี้แสดงความสัมพันธ์ที่ดีมีค่าความชันเท่ากับ  $V_{out\ Mag} = 0.8976(V_{out\ Temp}) + 0.2781$  ที่  $R^2 = 0.9989$

รูปที่ 10 แสดงรูปถ่ายอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สองตัวที่ต่อร่วมกันในบรรจุภัณฑ์เตรียมพร้อมที่นำไปใช้กับวงจรไบอัสต่อไป



รูปที่ 10 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สองตัวที่ต่อร่วมกันในบรรจุภัณฑ์

#### 4. สรุปผลการทดลอง

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเท่ากับ  $7.9\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถชดเชยทำงานจากผลของอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์และแมกนีโตทรานซิสเตอร์เองได้ถูกนำมาใช้เป็นตัววัดอุณหภูมิสำหรับวงจรชดเชยซึ่งแมกนีโตทรานซิสเตอร์เองนั้นให้ผลเชิงเส้นที่ดีกว่าผลของเทอร์มิสเตอร์ซึ่งสมการชดเชยที่ได้นี้ถูกนำไปใช้ในการปรับค่าสัญญาณขาออกของตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยสามารถหักล้างผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากอุณหภูมิไปได้สำหรับอุณหภูมิในช่วง  $25\text{-}125^{\circ}\text{C}$  โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ 1.1%

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่ง เติมพงษ์ เทีชรกุล ขอขอบคุณสภากิจแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยและศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการออกแบบและกระบวนการสร้าง

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology", *Circuit Syst* (1989) 701-704.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals", *Sensors and Actuators A*, 58 (1997) 137-140.
- [3] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device", *IEEE Electron Devices Lett*, vol. EDL-5, pp.357-358, 1984
- [4] Lj. Ristic, T. Smy, H.P. Baltes, "A lateral magnetotransistor structure with linear response to the magnetic field", *IEEE Trans. Electron. Dev.* ED-36 (1989) 1076-1989.
- [5] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun and A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination - Deflection Effect", *IEEE Sensor - Journal*, Vol.10, no.2, pp. 294-299, 2010.
- [6] P. Sottip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun and A. Poyai, "The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology", *ECTI-CON Association*, pp.219, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

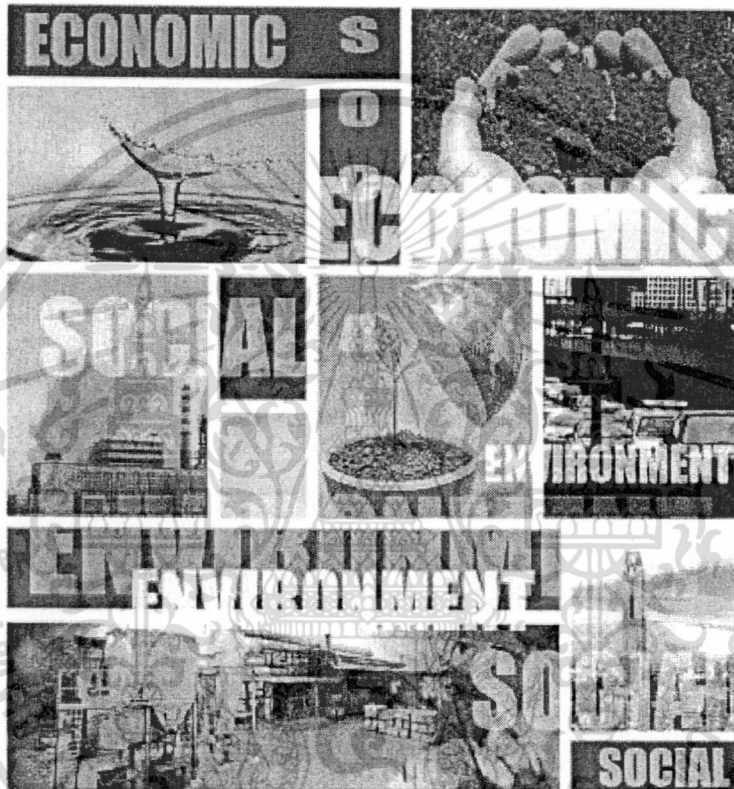


การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สอ.บ.บ.ม. นำไปใช้  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT

# ขอเชิญร่วมประชุมวิชาการ ทางรอดของประเทศไทย



ในภาวะวิกฤต ทางด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม



19-20 พฤศจิกายน 2553 ณ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ป่าชุกตาและอภิปราช โดย  
ศ.นพ.ประเวศ วะสี, ดร.ณรงค์ชัย อัครเศรณี, ดร.พิจิตต์ รัตตกุล, คุณณรงค์ โชควัฒนา

- ผู้สนใจเสนอผลงาน ให้ส่งทะเบียนส่งต้นฉบับผ่านระบบที่ <http://mfusymposium53.mfu.ac.th> ภายในวันที่ 15 กันยายน 2553
- อัตราค่าลงทะเบียน
  - 1,500 บาท กรณีลงทะเบียนและชำระเงิน ภายในวันที่ 15 ตุลาคม 2553
  - 2,000 บาท กรณีลงทะเบียนและชำระเงิน หลังวันที่ 15 ตุลาคม 2553
- \*\* สมัครสมาชิกเว็บไซต์ที่ <http://mfusymposium53.mfu.ac.th>
- สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติมที่ ส่วนบริการงานวิจัย โทรศัพท 0-5391-6358 , 0-5391-6389 หรือ E-mail: [research@mfu.ac.th](mailto:research@mfu.ac.th)
- ผลงานวิจัยที่ผ่านการคัดเลือกโดยผู้ทรงคุณวุฒิให้นำเสนอ จะได้รับมรดกพิมพ์ Proceeding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาผลความกว้างของอิมิตเตอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

## The Study Emitter Width Effect on the Performance of Magnetotransistor

เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล<sup>1</sup>, ปัญญากร โสทธิพิชญ์<sup>1</sup>, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์<sup>2</sup>, พุทธิพล เพ็งพิศ<sup>2</sup>, นริชพันธ์ เป็นผลดี<sup>2</sup>

อาคม ศรีหาแพท<sup>3</sup>,ชาญเดช หรือนันต์และอัมพร โพธิ์ไย<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถนนลาดพร้าว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2326-4550 E-mail: panyakon\_s@hotmail.com

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

51/4 หมู่ที่ 1 วังตะเคียน อำเภอเมือง ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลของความกว้างอิมิตเตอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยศึกษาออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งซึ่งโครงสร้างประกอบด้วย อิมิตเตอร์, คอลเลกเตอร์และเบส ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{cb}$ ) ที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) ศึกษาเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ค่าความกว้างอิมิตเตอร์ 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร ที่ระยะความกว้างเบส 10 และ 20 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะความกว้างอิมิตเตอร์ 4 และ 5 ไมโครเมตรมีค่าความไวที่สูง 11.77 และ 11.55 mV/T ที่กระแสไบอัส 3 mA และที่ระยะความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรมีความเป็นเชิงเส้นดี ซึ่งข้อมูลที่ได้มีส่วนในการพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นวงจรรวมในอุปกรณ์ต่อไปได้

คำสำคัญ: แมกนีโตทรานซิสเตอร์, ความกว้างอิมิตเตอร์, ความกว้างเบส

### Abstract

This paper investigates effects of emitter width a Three Terminal Magnetotransistor (TTMT). The experiment has been design to used the magnetotransistor, which consist of emitter, base and collector terminals, to detect vertical magnetic field. The Lorentz force occurred in the device cause deflecting current ( $\Delta I_{cb}$ ) in which is a function of magnetic intensity ( $B_z$ ). A study of magenetic detection sensitivity has been done compared emitter width of 4, 5 and 10 micron with base width of 10 and 20 micron. Experimental results show that the magnetransistor has high sensitivity for emitter width of 4 and 5 micron at 11.77 and 11.55mV/T respectively on 3 mA bias current. The device with bese width of 20 micron demonstrates good linearity. All these experiments results can help us to have a further development on the TTMT in the future.

Keywords: Magnetotransistor, Emitter width, Base width

### 1. บทนำ

เซนเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์ที่สำคัญสองอย่างคือ 1. ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เช่น แมกนีโตไดโอด, แมกนีโตทรานซิสเตอร์ เป็นต้น และ 2. ปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetoresistive Effect) เช่น Giant Magnetoresistance (GMR) ที่ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิส เป็นต้น[1] ในปัจจุบันเซนเซอร์แม่เหล็กได้มีการพัฒนาให้มีโครงสร้างที่หลากหลายมาก ตามแต่วัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน ซึ่งผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ได้นั้นแตกต่างกันออกไป โดยเซนเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ได้มีบทบาทและถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วงที่กว้าง, ความไวในการตอบสนองสูง, สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิและความถี่ที่กว้าง, สามารถสร้างและใช้ร่วมกับวงจรรวมได้ [1-3]

บทความนี้นำเสนอเซนเซอร์แม่เหล็กชนิดแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection) เนื่องจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{cb}$ ) รวมทั้งทำการศึกษาออกแบบและสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ความกว้างอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างอิมิตเตอร์กับความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก อีกทั้งทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไบอัสอิมิตเตอร์และค่าแรงดันเอาท์พุทของอุปกรณ์ที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

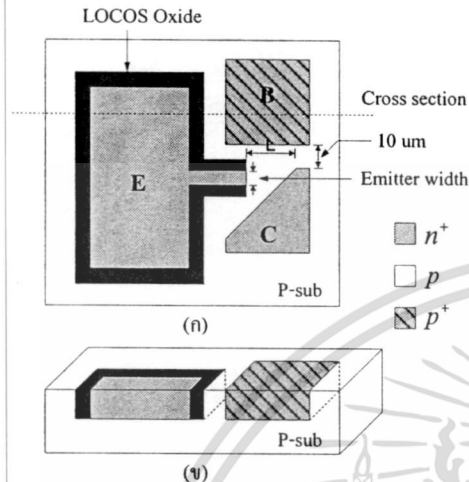
### 2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

#### 2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แสดงรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 1 เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็น-พี-เอ็น ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ซึ่งประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และคอลเลกเตอร์ C สร้างขึ้นบนฐานรองชนิดพี (P-substrate) และชั้นออกไซด์หนา (LOCOS

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

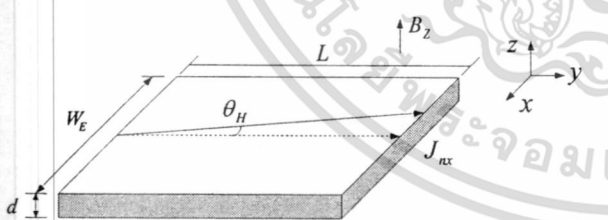
Oxide) ถูกสร้างขึ้นล้อมรอบอิมิตเตอร์ โดยพื้นที่การฉีดพาหะของอิมิตเตอร์ (Emitter width) ออกแบบให้มีขนาด 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร ออกแบบระยะความกว้างเบส (L) ให้มีขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตร และระยะระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์ มีขนาด 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 1 รูปแบบโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) ด้านบน (Top view) และ (ข) ด้านตัดขวาง (Cross section)

## 2.2 หลักการทำงาน

การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์อาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ตามหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ดังรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นพื้นที่การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีกระแสพาหะอิเล็กตรอน คือ  $J_{nx}$ , พื้นที่การฉีดพาหะคือ  $W_E$ , ระยะการเบี่ยงเบนคือ  $L$  และมุมเบี่ยงเบนคือ  $\theta_H$  โดยสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของฐานรอง



รูปที่ 2 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (อิเล็กตรอน)

โดยกระแสอิมิตเตอร์เป็นผลรวมของกระแสเบส ( $I_B$ ) กับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 1 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสพาหะ (Carrier density) ได้ดังสมการที่ 2

$$I_E = I_B + I_C \quad (1)$$

$$I_E = J_{nx} \cdot W_E \cdot d \quad (2)$$

เมื่อ  $J_{nx}$  คือความหนาแน่นกระแสพาหะ,  $W_E$  คือความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะ และ  $d$  คือความลึกของรอยต่อ (Junction depth)

ในภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก กระแสพาหะเคลื่อนที่ตามแนวเส้นประ แต่เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ ( $B_z$ ) ในทิศทางตั้งฉาก ส่งผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม  $\theta_H$  โดยมุมของการเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่า mobility ( $\mu_n$ ) และค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ (3)

$$\tan \theta_H = \mu_n \cdot B_z \quad (3)$$

การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4

$$\Delta I_{CB} = J_{nx} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_H \quad (4)$$

โดยสมการแสดงค่าความไวของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) เขียนได้สองแบบ คือ 1.ค่าความไวสัมพัทธ์ (Relative sensitivity,  $S_R$ ) และ 2.ค่าความไวสัมบูรณ์ (Absolute sensitivity,  $S_A$ ) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

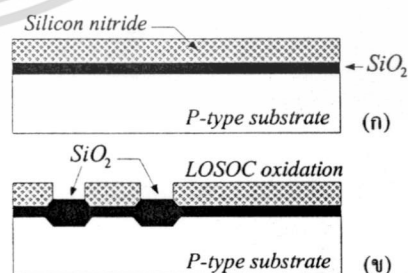
$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_z} \quad (5)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \quad (6)$$

เมื่อ  $\Delta V$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ที่แสดงในรูปของค่าแรงดันไฟฟ้า

## 3. กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

สำหรับกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์อาศัยเทคโนโลยีกระบวนการผลิตแบบซิมอส โดยเริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดที่ สภาพความต้านทาน 2-4  $\Omega\text{-cm}$  สร้างซิลิคอนไดออกไซด์และทำการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ดังรูปที่ 3 (ก) จากนั้นใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องสำหรับการขึ้นออกไซด์หน้าดังรูปที่ 3 (ข)

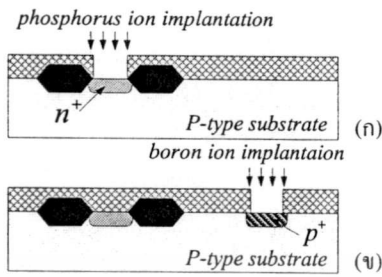


รูปที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์มบาง (ก) ซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนไนไตรด์ และ (ข) ชั้นออกไซด์หนา

จากนั้นทำการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องสำหรับการอิงฝั่งประจุฟอสฟอรัสเพื่อสร้างขั้วอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ดังรูปที่ 4(ก) และ

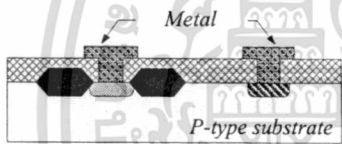
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องสำหรับสร้างขั้วเบสจากการอิง  
ฟิงประจุโบรอนคิงรูปที่ 4(ข)

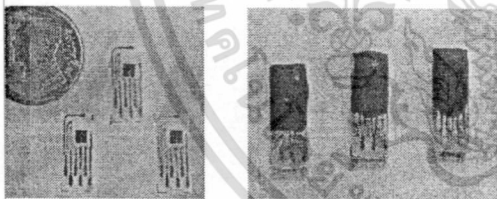


รูปที่ 4 การสร้างขั้วอิมิตอร์, เบส และคอลเลคเตอร์ (ก) การอิงฟิงประจุ  
ฟอสฟอรัสและ (ข) การอิงฟิงประจุโบรอน

ต่อมาใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องคอนแทกและทำการ  
สร้างชั้นฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปีดเคอร์ริงและกระบวนการโฟโตลิโธ  
กราฟีเพื่อสร้างขั้วโลหะ จากนั้นทำการ Passivation ด้วยชั้นฟิล์ม  
ซิลิคอนไนไตรด์ และกระบวนการสุดท้ายเป็นการสร้างขั้วโลหะสำหรับ  
ต่อใช้งาน โดยอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์แสดงคิงรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดง  
ภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

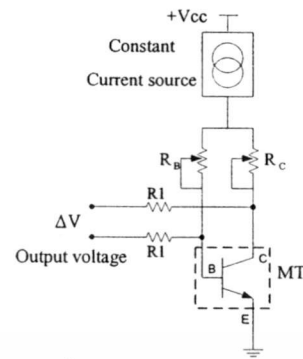


รูปที่ 6 ภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์ (ก) แมกนีโต-  
ทรานซิสเตอร์ดีเอ็นแผ่นลางวงจรและ(ข) หลังการเคลือบเรซิน

#### 4. การทดลองและผลการทดลอง

##### 4.1 วงจรวัดผลการทดลอง

วงจรวัดผลการทดลองแสดงคิงรูปที่ 7 เป็นวงจรที่ใช้สำหรับ  
แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างชนิด NPN ซึ่งพาหะส่วนมากที่  
ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กคือ อิเล็กตรอน โคขงจรประกอบไปด้วย  
ส่วนของ แหล่งจ่ายกระแสคิงสำหรับให้ไบอัสเบสและคอลเลคเตอร์  
ผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  และ  $R_C$  ตามลำดับ โดยที่กระแสเบส ( $I_B$ ) และกระแส  
คอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) รวมตัวกันเป็นกระแสอิมิตอร์ ( $I_E$ ) แรงดันออฟเซต  
สามารถปรับเป็นศูนย์ได้โดยการปรับ  $R_B$  และ  $R_C$  ความแตกต่างระหว่าง  
กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์  $\Delta I_C$  อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า  $\Delta V$



รูปที่ 7 วงจรวัดผลการทดลอง

สมการที่ 7 แสดงสมการความสัมพันธ์ของความแตกต่างระหว่างกระแส  
เบสและกระแสคอลเลคเตอร์ที่อยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า ( $V_{out}$ )

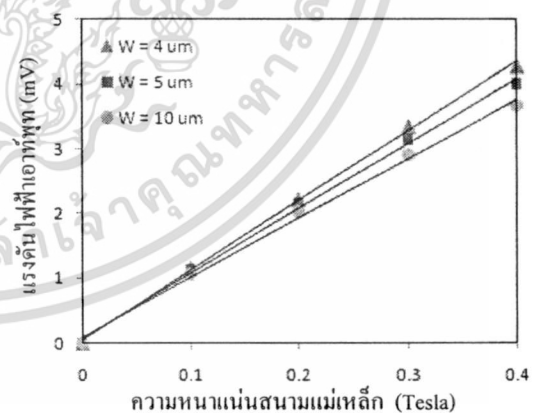
$$V_{OUT} = \Delta I_B \cdot R_B - \Delta I_C \cdot R_C \quad (7)$$

เมื่อ  $\Delta I_B$  และ  $\Delta I_C$  คือการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสและกระแส  
คอลเลคเตอร์ตามลำดับ

##### 4.2 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งที่ระยะความ

กว้างเบส 10 ไมโครเมตร ( $L=10 \mu m$ )

รูปที่ 8 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้ง ( $B_z$ )  
ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบระยะความกว้างเบส 10  
ไมโครเมตร โดยเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก 0-0.4 T  
เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีพื้นที่ความกว้างอิมิตอร์แตกต่าง  
กันคือ 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร ซึ่งทำการทดลองที่กระแสไบอัส 3 mA



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตและสนามแม่เหล็กของ  
อุปกรณ์ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่ความกว้างอิมิตอร์ค่าต่างๆ

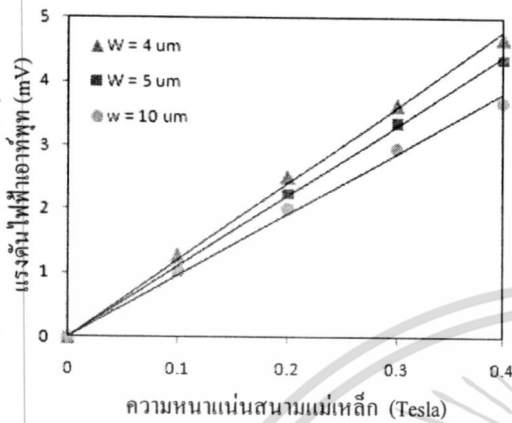
##### 4.3 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งที่ระยะความ

กว้างเบส 20 ไมโครเมตร ( $L=20 \mu m$ )

รูปที่ 9 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้ง ( $B_z$ )  
ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบระยะความกว้างเบส 20  
ไมโครเมตร โดยเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก 0-0.4 T

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.1 และเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีพื้นที่ความกว้างอิมิตเตอร์แตกต่างกันคือ 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร ซึ่งทำการทดลองวัดที่กระแสไบอัสเท่ากับ 3 mA เช่นเดียวกัน



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตและสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่ความกว้างอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

#### 4.4 การเปรียบเทียบความไวของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity)

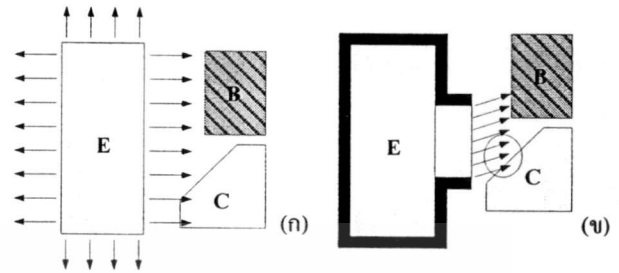
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6 ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบระยะความกว้างเบส 10 และ 20 ไมโครเมตร โดยทำการทดลองเปรียบเทียบที่การออกแบบระยะความกว้างอิมิตเตอร์ 4, 5 และ 10 ไมโครเมตร

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่าความไวที่ความกว้างอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

ความกว้างอิมิตเตอร์ $W_E$ (ไมโครเมตร)	ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (mV/T)	
	L=10 $\mu\text{m}$	L=20 $\mu\text{m}$
4	10.75	11.77
5	10.04	11.55
10	9.18	9.28

ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะมีผลต่อค่าความไวของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กนั้นคือเมื่อพื้นที่การฉีดพาหะมีขนาดกว้างขึ้นทำให้ค่าความไวของการตอบสนองลดลงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 โดยรูปที่ 10 (ก) แสดงการเคลื่อนที่พาหะในทุกพื้นที่ของอิมิตเตอร์ซึ่งการสร้างชั้นออกไซด์หนาที่ถูกรังล้อมรอบอิมิตเตอร์มีส่วนช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของพาหะด้านข้างที่สามารถทำให้เกิดเป็นกระแสรั่วได้ และรูปที่ 10 (ข) แสดงการเลี้ยวเบนของพาหะขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแสดงให้เห็นว่าพื้นที่อิมิตเตอร์ขนาดที่

กว้างทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เบี่ยงเบนของพาหะที่ไม่สามารถเบี่ยงเบนจากคอลเลคเตอร์ไปทีเบสได้ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตและค่าความไวมีค่าต่ำ



รูปที่ 10 การเคลื่อนที่ของพาหะอิมิตเตอร์ (ก) การเคลื่อนที่ที่พาหะด้านข้างที่มีผลต่อกระแสรั่วและ (ข) การเคลื่อนที่ที่เบี่ยงเบนที่ไม่สามารถเปลี่ยนจากคอลเลคเตอร์เป็นขั้วเบส

#### 5. สรุปผลการทดลอง

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ได้ จากการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสามารถทำให้แรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น และการทดลองที่ความกว้างอิมิตเตอร์ค่าต่างๆแสดงถึงพื้นที่การฉีดพาหะอิมิตเตอร์ที่แคบสามารถทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตและค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีค่าสูงและที่ระยะความกว้างเบสที่ 20 ไมโครเมตรมีความเหมาะสมมากกว่า 10 ไมโครเมตร ซึ่งข้อมูลสามารถนำไปพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไป

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่ง เติมพงษ์ เพ็ชรกุล ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

[1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology", *Circuit Syst* (1989) 701-704.  
 [2] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun and A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination - Deflection Effect", *IEEE Sensor - Journal*, Vol.10, no.2, pp. 294-299, 2010.  
 [3] P. Sottip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun and A. Poyai, "The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology", *ECTI-CON Association*, pp.219, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้